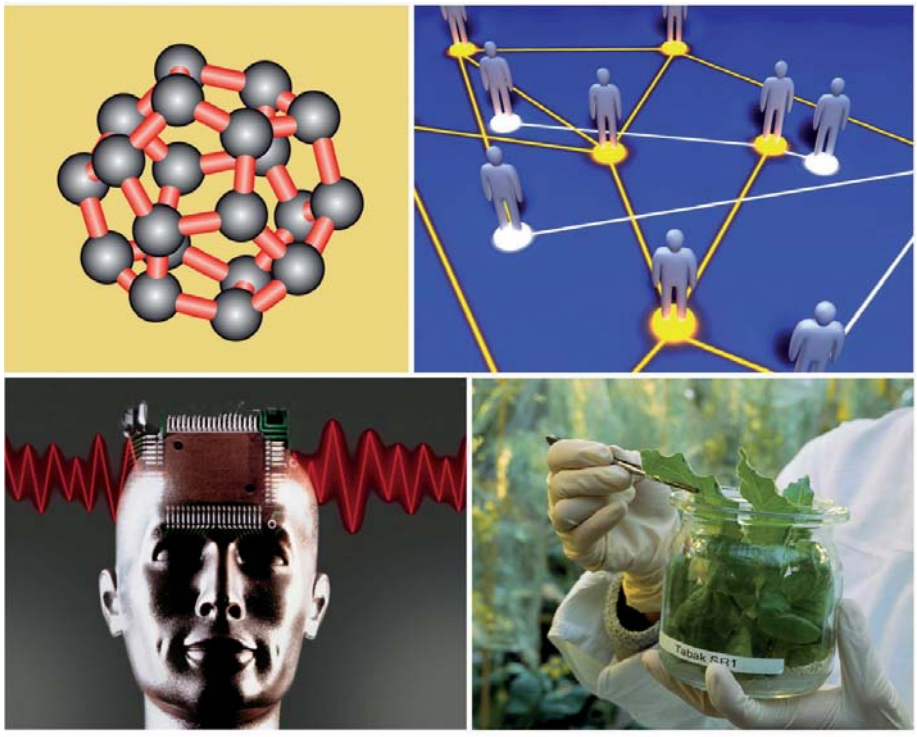
Fraunhofer
INT

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR NATURWISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE TRENDANALYSEN

Thomas Kretschmer (Hrsg.)

Neue Technologien

Kernthemen des Technologiemonitorings am INT zwischen 1996 und 2009



FRAUNHOFER VERLAG

Fraunhofer-Institut für
Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen

Thomas Kretschmer (Hrsg.)

Neue Technologien

Kernthemen des Technologiemonitorings am INT zwischen 1996 und 2009

FRAUNHOFER VERLAG

Kontaktadresse:
Fraunhofer-Institut für
Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen
Appelsgarten 2
53879 Euskirchen
Telefon 02251 18-1
Telefax 02251 18-277
E-Mail info@int.fraunhofer.de
www.int.fraunhofer.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.
ISBN: 978-3-8396-0075-7

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by FRAUNHOFER VERLAG, 2010
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Telefax 0711 970-2508
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL http://verlag.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.
Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Vorwort

Eine wichtige Aufgabe des Fraunhofer-Instituts für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (INT) besteht seit vielen Jahren in der kontinuierlichen Beobachtung und Analyse der internationalen Forschungslandschaft durch die Erfassung und Auswertung der hierfür relevanten Informationsquellen. Für dieses so genannte Technologiemonitoring gibt es zwar eine Reihe methodischer Ansätze, jedoch hat sich bis heute keine Vorgehensweise wirklich fest etabliert. Daher wurde in den 1990er Jahren am INT schrittweise ein pragmatischer Weg gesucht und gefunden, um einen strukturierten Zugang zur Analyse der Informationsvielfalt über naturwissenschaftlich-technische Entwicklungen zu gewährleisten.

Die vorliegende Publikation stellt wesentliche Ergebnisse vor, die im Rahmen des Aufgabengebiets Technologiemonitoring am INT seit Mitte der 1990er Jahre erarbeitet wurden. Zunächst werden in der Einleitung die wesentlichen Aspekte der Vorgehensweise zur Strukturierung des Monitoringprozesses am INT skizziert. Ein erstes Kapitel gibt einen Überblick zu den naturwissenschaftlich-technologischen Feldern, die die im Rahmen der Monitoringaufgabe zu beobachtenden Themenstellungen definieren.

Den Hauptteil des Buches bilden weit mehr als 150 Einzelbeiträge über neue Technologien, die zwischen 1996 und 2009 von Mitarbeitern des INT erarbeitet wurden. Das Spektrum der Themen dürfte einen guten Überblick der wichtigsten technologischen Entwicklungen in diesem Zeitraum geben. Obwohl viele ältere Beiträge aus inhaltlicher Sicht zum jetzigen Zeitpunkt nicht mehr hochaktuell sein können, haben viele der dort aufgezeigten grundlegenden Zusammenhänge und langfristigen Trendaussagen bis heute ihre Gültigkeit behalten.

Zur besseren Übersicht wurden die Beiträge vom Herausgeber in insgesamt 13 Themenfeldern zusammengefasst. Jedem dieser Felder ist eine graphische Darstellung der zeitlichen Abfolge der Entstehung der Beiträge vorangestellt. Die Themenfelder werden wiederum den seit einigen Jahren zur Strukturierung der Analyse- und Vorausschauarbeit am INT gewählten vier Oberbegriffen Materie & Energie, Information & Wissen, Natur & Leben sowie Wirtschaft & Gesellschaft zugeordnet.

An der Erarbeitung der Einzelbeiträge haben folgende Autoren mitgewirkt (in alphabetischer Reihenfolge):

- Dipl.-Ing. Thomas Euting
- Dr. Matthias Grüne
- Dipl.-Ing. Guido Huppertz
- Dr. Marcus John
- Dr. Roman Kernchen

- Dipl.-Phys. Jürgen Kohlhoff
- Dipl.-Geogr. Denise Köppen
- Dr. Thomas Kretschmer
- Dr. Stefan Metzger
- Dipl.-Ing. Wolfgang Nätzker
- Dr. Ulrik Neupert
- Dr. Claudia Notthoff
- Dr. Wilhelm Ochs
- Dipl.-Ing. Frank Pfeil
- Dipl.-Ing. Stefan Reschke
- Dr. Klaus Ruhlig
- Dr. Michael Suhrke
- Dr. Birgit Weimert
- Dr. Henner Wessel
- Dr. Uwe Wiemken
- Dr. Hans-Georg Zach

Für die graphischen Darstellungen und für die Erstellung der Druckvorlage war Silvia Weniger verantwortlich. Die Auswahl und Freigabe der Bilder wurde von Gina Hillmann betreut.

Euskirchen, Oktober 2009

Thomas Kretschmer[1]

(Herausgeber)

[1] Dr. Thomas Kretschmer leitete bis Anfang 2009 die Abteilung Technologieanalysen und -vorausschau des INT.

Inhalt

Einleitung: Technologiemonitoring am INT **1**

1 Naturwissenschaftlich-technische Themenfelder der Zukunft **5**

Materie & Energie 5
Information & Wissen 9
Leben & Natur 10
Wirtschaft & Gesellschaft 12

2 Technologische Kernthemen zwischen 1996 und 2009 ..... **15**

Werkstoffe **17**

Formgedächtniswerkstoffe 18
Magnesiumwerkstoffe 20
Funktionskeramiken 22
Organisch modifizierte Keramiken 24
Hochtemperaturfeste Werkstoffe 26
Schichtverbunde 28
Strukturkeramiken 30
Holzwerkstoffe 32
Faserverstärkte Kunststoffe 34
Flüssigkristalline Werkstoffe 36
Stähle 38
Diamanttechnologie 40
Metallische Gläser 42
Keramik-Matrix-Verbundwerkstoffe 44
Dreidimensionale Faserverbundwerkstoffe 46
Magnetwerkstoffe 48
Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe 50
Funktionspolymere 52
Hochtemperatur-Supraleiter 54
Hochleistungspolymere 56
Multifunktionale Werkstoffe 58
Aerogele 60
Textile Werkstoffe 62
Hochleistungsmetalle 64
Kohlenstofffaserverstärkte Kohlenstoffe 66

Materielle Strukturen **69**

Metamaterialien 70
Smart Materials 72
Künstliche Muskeln 74
Intelligente Textilien 76
Elektronisches Papier 78
Nanoröhren 80
Adaptive Fahrzeugstrukturen 82
Werkstoffe im Leichtbau 84

Nanotechnik ... 86
Adaptronik ... 88
Mikrotechnologien ... 90
Fullerene ... 92
Prozesse und Verfahren ... **95**
Oberflächenkatalyse ... 96
Pulvermetallurgie ... 98
Oberflächentechnologien ... 100
Katalyse ... 102
Schweißtechnologien ... 104
Sol-Gel-Verfahren ... 106
Trenntechnologien ... 108
Supramolekulare Chemie ... 110
Rastersondentechniken ... 112
Tribologie ... 114
Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung ... 116
Rapid Prototyping ... 118
Kombinatorische Chemie ... 120
Plasmatechnik ... 122
Membrantechnologien ... 124
Lasergestützte Materialbearbeitung ... 126
Katalysatoren ... 128
Klebetechnologien ... 130
Fertigungs- und Bearbeitungstechnologien ... 132
Energietechnik ... **135**
Energy Harvesting ... 136
Superkondensatoren ... 138
Geothermische Energie ... 140
Mikro-Brennstoffzellen ... 142
Hochleistungs-Mikrowellenquellen ... 144
Thermoelektrische Generatoren ... 146
Batterien ... 148
Photovoltaik ... 150
Wasserstofftechnologie ... 152
Mittel- und Hochenergielaser ... 154
Brennstoffzellen ... 156
Werkstoffe der Energietechnik ... 158
Informationsverarbeitung: Grundlagen und Konzepte ... **161**
Cloud Computing ... 162
Autonomic Computing ... 164
Schwarmintelligenz ... 166
Neuroinformatik ... 168
Information Retrieval ... 170
Digitale Sprachverarbeitung ... 172
Fuzzy-Logik ... 174
Selbstorganisierende Systeme ... 176
Soft Computing ... 178

Kryptologie ... 180
Metacomputer ... 182
Quantencomputer ... 184
Neuronale Netze ... 186
Informationsverarbeitung: Technologien, Komponenten und Systeme ... 189
Zukünftige Mobilfunksysteme ... 190
Cognitive Radio ... 192
Netzwerksicherheit ... 194
Intelligente Antennen ... 196
Supercomputer ... 198
RFID-Technologie ... 200
Authentifizierungs- und Identifizierungsverfahren ... 202
Betriebssysteme ... 204
Programmiersprachen ... 206
Powerline-Kommunikation ... 208
Elektronik ... 211
Spintronik ... 212
Neue Halbleiter ... 214
Polytronik ... 216
Bioelektronik ... 218
Magnetoelektronik ... 220
Halbleiter-Leistungselektronik ... 222
Molekularelektronik ... 224
Anwendungsspezifische Integrierte Schaltungen (ASICs) ... 226
Galliumarsenid-Technologie ... 228
Werkstoffe der Mikrolektronik ... 230
Speicherbausteine ... 232
Mikroprozessoren ... 234
Chipfertigung ... 236
Mikroelektronik ... 238
Optische Technologien ... 241
Tailored Light ... 242
Flachbildschirme ... 244
Lithographieverfahren ... 246
Integrierte Optik ... 248
Optische Materialien ... 250
Adaptive Optik ... 252
Nichtlineare Optik ... 254
Holographie ... 256
Displaytechnologien ... 258
Halbleiterlaser ... 260
Photonik ... 262
Sensortechnik ... 265
Sprengstoffdetektion ... 266
Digitale Photographie ... 268
Künstliche Nasen ... 270
Biometrie ... 272

Terahertz-Strahlen ... 274
Smart Dust ... 276
Infrarot-Sensoren ... 278
Chemische Sensoren ... 280
Laser-Radar ... 282
Mustererkennung ... 284
Faseroptische Sensoren ... 286
Biosensoren ... 288
Biologische Technologien ... 291
Synthetische Biologie ... 292
Biotechnologie ... 294
Gentechnik ... 296
Bionik ... 298
Biomimetische Werkstoffe ... 300
Umwelt- und Medizintechnik ... 303
Biomonitoring ... 304
Gehirn-Computer-Schnittstellen ... 306
Tissue Engineering ... 308
Human Factors Engineering ... 310
Werkstoff-Recycling ... 312
Nachwachsende Werkstoffe ... 314
Implantatmaterialien ... 316
Produktion und Infrastruktur ... 319
Rettungsroboter ... 320
Kleinstsatelliten ... 322
Industrielle Logistik ... 324
Serviceroboter ... 326
Raumfahrttechnik ... 328
Luftfahrttechnik ... 330
Schienen- und Straßenverkehrstechnik ... 332
Integrierte Verkehrskonzepte ... 334
Verkehrstechnik ... 336
Produktions- und Managementtechnologien ... 338
Virtuelle Welt ... 341
Augmented Reality ... 342
Medienkonvergenz ... 344
Ambient Intelligence ... 346
Geoinformationssysteme ... 348
E-Learning ... 350
Finite-Elemente-Methode ... 352
Simulationstechnik ... 354
Multimedia ... 356
Computergestützte Planung, Steuerung und Fertigung ... 358
Abbildungsverzeichnis ... 361

Einleitung: Technologiemonitoring am INT

Das Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-technische Trendanalysen (INT) hat seit vielen Jahren die Aufgabe, die allgemeine naturwissenschaftlich-technische Entwicklung hinsichtlich ihrer langfristigen Relevanz für Staat und Wirtschaft zu analysieren. Das Ziel ist, Informationen über die wichtigsten Problemstellungen, Ergebnisse und Aktivitäten aus diesem Bereich zu beschaffen und auszuwerten und damit eine Basis für langfristige Technologieprognosen und Planungsprozesse bereitzustellen

Eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Wahrnehmung dieser Aufgabe ist die möglichst umfassende Beobachtung der gesamten nationalen und internationalen Forschungs- und Technologieszene. Diese heutzutage häufig auch als „Monitoring" bezeichnete Aufgabe beinhaltet zwangsläufig einen Vollständigkeitsanspruch hinsichtlich der zu beobachtenden naturwissenschaftlichen und technologischen Bereiche.

Um die enorme Informationsflut zu strukturieren, die zumindest prinzipiell für ein umfassendes Technologiemonitoring in Betracht kommt, hat es sich für die Arbeit im INT als sinnvoll erwiesen, drei Kategorien (Ebenen) von Informationsquellen zu unterscheiden (s. Abb. 1).

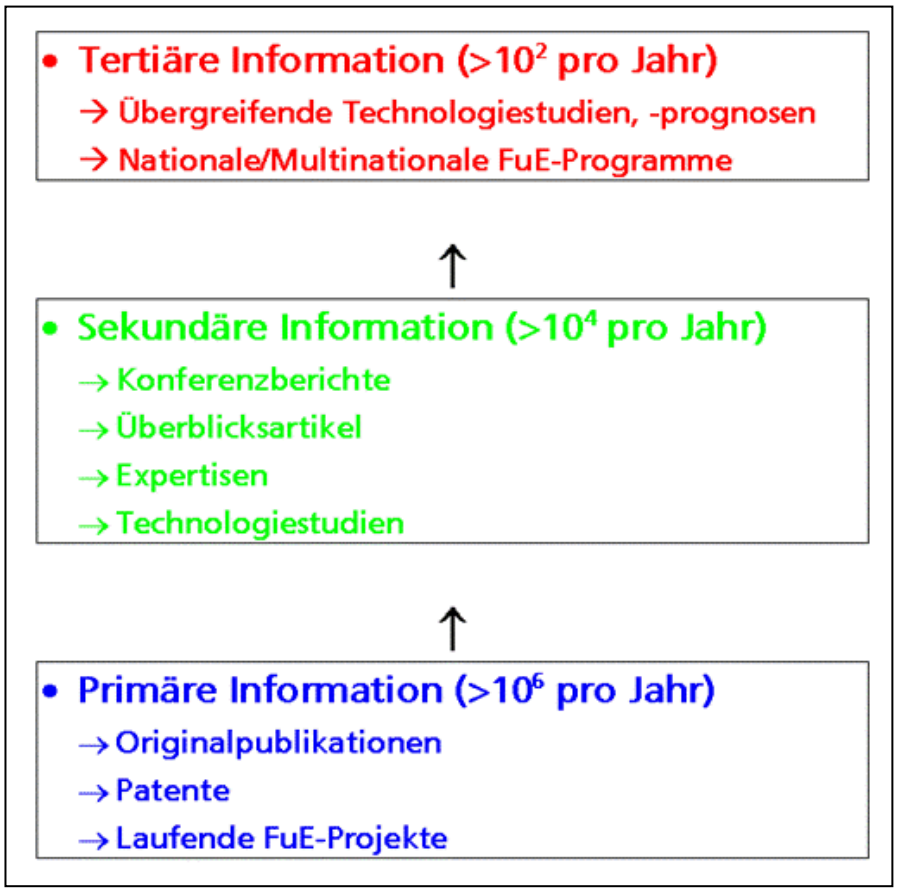


Abb. 1: Informationsquellen für Technologiemonitoring

Auf der untersten (primären) Ebene findet man Originalpublikationen über Forschungsprojekte und -erkenntnisse sowie Patente. Aufgrund der enormen Anzahl von im Prinzip auszuwertetenden Quellen kommt dieser Typ auch bei großem personellen Aufwand nicht für ein systematisches flächendeckendes Monitoring in Frage. In erster Linie muss man sich auf die zweite Ebene von Informationen konzentrieren, die sich auf Artikel, Berichte und Studien mit Überblickscharakter abstützt. Unbedingt erforderlich ist eine möglichst vollständige Erfassung und Auswertung der Informationen auf der obersten (tertiären) Ebene, die aus hochaggregierten Studien und Programminformationen besteht.

Daher werden durch das INT im Rahmen des Technologiemonitoring seit Mitte der 1980er Jahre systematisch technisch-wissenschaftliche Zeitschriften und Informationsdienste, Jahres- bzw. Ergebnisberichte und Hauszeitschriften von Institutionen mit hoher FuE-Relevanz, Beschreibungen und Ergebnisdarstellungen internationaler Forschungsprogramme sowie Publikationen über technologische Zukunftsanalysen und Prognosen erfasst und ausgewertet. Hinzu kommen Aussagen, die sich aus den unmittelbaren Kontakten mit externen Wissensträgern in Forschung, Industrie und Amtsbereichen sowie aus der Auswertung von Studien und Expertisen, die das INT an externe Fachinstitutionen vergibt, stammen.

Eine weitere wichtige Voraussetzung für ein erfolgreiches Technologiemonitoring ist die thematische Eingrenzung und Strukturierung der Informationsvielfalt (Objektbereich des Monitoring). Hierfür bieten sich im Prinzip verschiedene wissenschaftlich-technische Taxonomien und Systematiken an, wie sie z.B. in Wissenschaftsklassifikationen, Patent- oder Bibliotheksdatenbanken verwendet werden. Die genauere Analyse eine Reihe solcher Klassifizierungen und Taxonomien hat jedoch gezeigt, dass sich keiner dieser Ansätze zur direkten Übernahme zur Strukturierung des Technologiemonitoring am INT eignen, da sie entweder zu detailliert sind oder zu einseitig bestimmte technologische Blickwinkel in den Vordergrund stellen.

Um das in Betracht kommende Gebiet dennoch in möglichst pragmatischer Form überschaubar und strukturierbar zu machen, wurde Anfang der 1990er Jahre auf der Basis einer Reihe von „tertiären" Quellen (s.o.) ein integrierendes Begriffssystem abgeleitet, das die wesentlichen Themenfelder mit Zukunftsrelevanz benennt[2]. Diese Synopse besteht auf der obersten Ebene aus über dreißig Wissenschafts- und Technologiefeldern (siehe Abb. 2). Es diente sowohl zur Strukturierung der Analyse- und Vorausschauarbeit am INT als auch als Thesaurus einer fast 10.000 Dokumente umfassenden Datenbank, in der bis Anfang dieses Jahrzehnts Literatur zu Hochtechnologien erfasst wurde (siehe Abb. 3).

[2] T. Kretschmer: Forschungs- und Technologiefelder der Zukunft - Analyse nationaler und internationaler Prognosen und Programme, April 1992, Fraunhofer INT, Interner Bericht TP 2/92

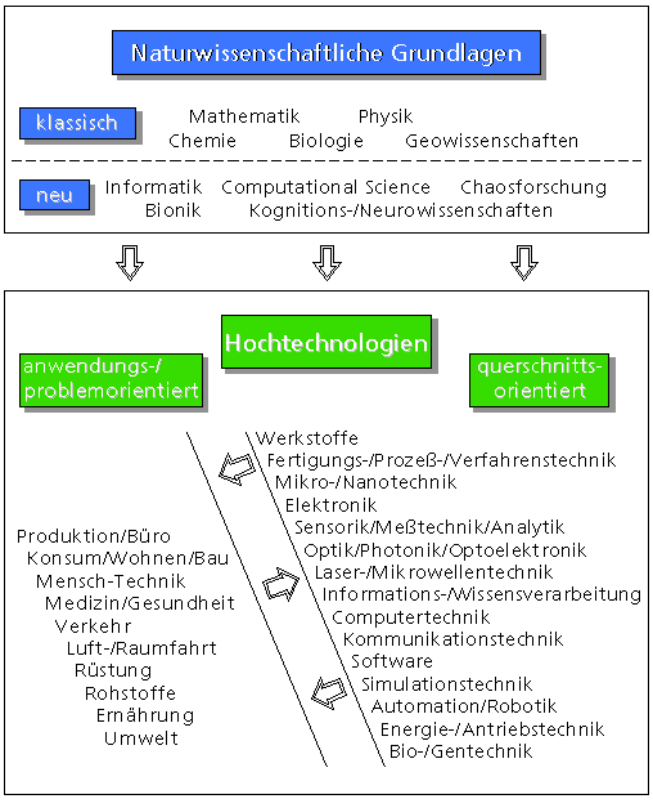


Abb. 2: Integrierendes naturwissenschaftlich-technologisches Begriffssystem (Stand: 1992)

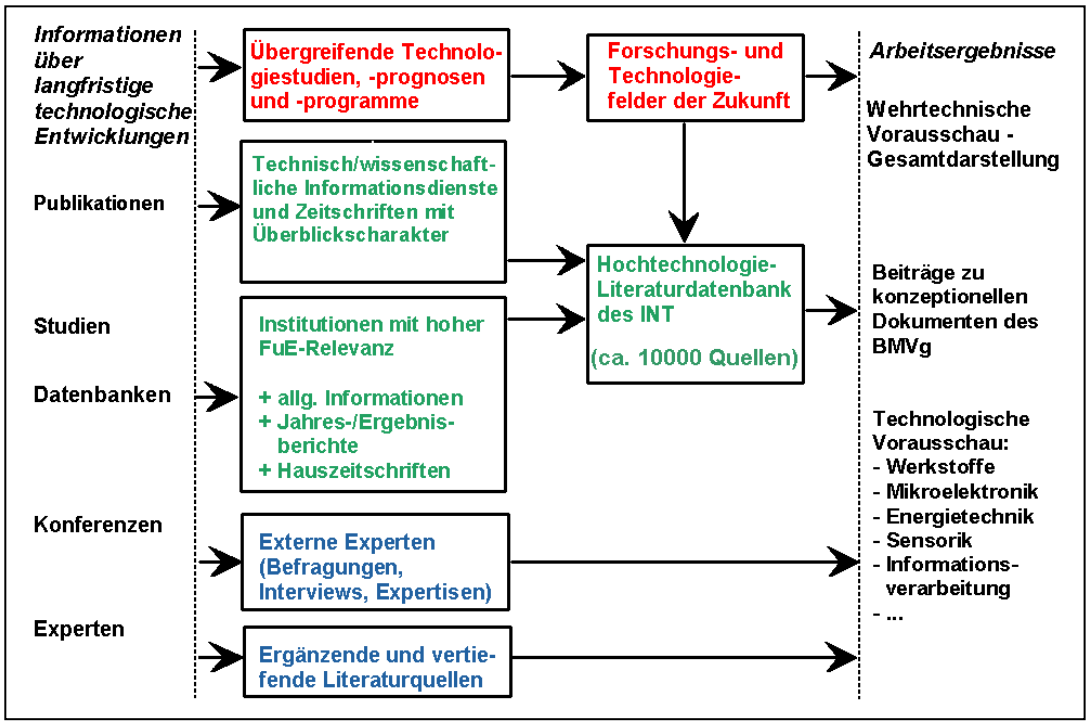


Abb. 3: Informationsstruktur „Technologieanalysen und -vorausschau“ (Stand: 1992)

Durch die kontinuierliche Auswertung der wichtigsten zukunftsorientierten naturwissenschaftlich-technologischen Gesamtdarstellungen (Zukunftsanalysen, Prognosen, Szenarien, Strategien, Programme, Pläne) im nationalen und internationalen Bereich wurde dieser Ansatz seitdem ständig erweitert und aktualisiert. Das aktuelle Bild (siehe Abb. 4, S. 5) umfasst derzeit über fünfzig Wissenschafts- und Technologiefelder, zwischen denen vielfältige Überschneidungen und Querbezüge bestehen. Je nach ihrer inhaltlichen Ausrichtung lassen sich diese Felder den vier übergreifenden Themenclustern Materie & Energie, Information & Wissen, Natur & Leben sowie Wirtschaft & Gesellschaft zuordnen.

1 Naturwissenschaftlich-technische Themenfelder der Zukunft

Der folgende Überblick fasst die wichtigsten Aspekte eines Gesamtbildes zusammen, das im Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (INT) Ende der 1990er Jahre aufgestellt wurde. Dieses Bild wurde seitdem ständig aktualisiert. Es hat sich gezeigt, dass die außerordentlich dynamische naturwissenschaftlich-technologische Entwicklung der letzten fünfzehn Jahre auf der hier dargestellten begrifflichen Aggregationsebene nur zu marginalen Veränderungen geführt hat. Daher decken die in Abb. 4 benannten über fünfzig Forschungs- und Technologiefelder praktisch alle Themenbereiche ab, die im Rahmen des Technologiemonitorings im INT im Zeitraum zwischen 1996 und 2009 zu berücksichtigen waren.

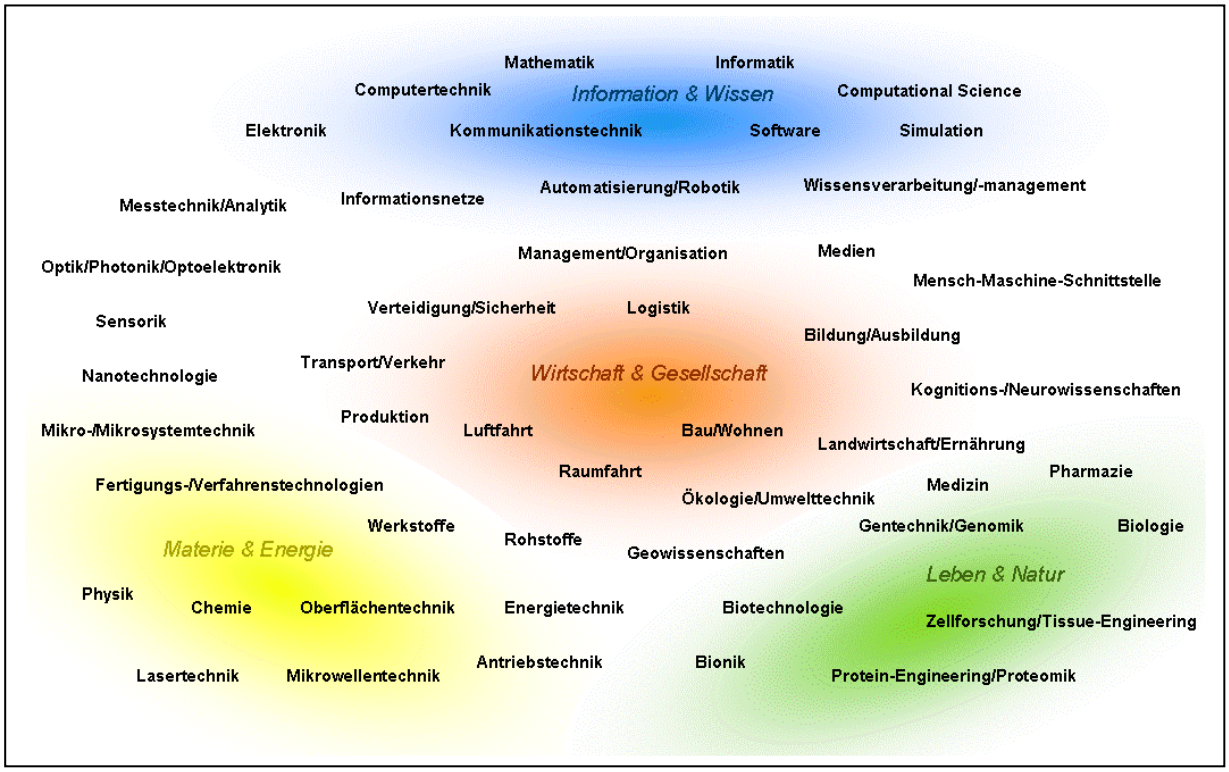


Abb. 4: Forschungs- und Technologiefelder der Zukunft

Materie & Energie

Die beiden klassischen naturwissenschaftlichen Grundlagendisziplinen Physik und Chemie gelten auch in Zukunft als unverzichtbare Basis für alle technischen Neu- und Weiterentwicklungen. Insbesondere die Physik bildet durch die Breite ihres Untersuchungsbereiches, der von der Struktur der Materie auf subnuklearer Ebene bis zu den Grund-

fragen über die Ursprünge des Kosmos reicht, nach wie vor die Grundlage der modernen Naturwissenschaften. Ihr dominierendes Forschungsziel ist die Vereinheitlichung der vier klassischen physikalischen Fundamentalkräfte, d.h. von starker, schwacher, elektromagnetischer und gravitativer Wechselwirkung. Weitere übergreifende Trends der modernen Physik sind die zunehmenden Möglichkeiten zur direkten Manipulation auf atomarer Ebene sowie die theoretische und experimentelle Erschließung von Phänomenen, die im so genannten mesoskopischen Bereich zwischen mikro- und makroskopischer Betrachtungsweise liegen (z.B. Molekül-Cluster). Eine herausragende Stellung nimmt die moderne Festkörperphysik aufgrund ihrer Anwendungsnähe und ihrer Bedeutung als wissenschaftliches Fundament der Mikroelektronik ein.

Die Chemie als Wissenschaft von den Stoffumwandlungen steht in besonders enger Beziehung zur Entwicklung der modernen Technik, da sich ihre Forschungsergebnisse häufig unmittelbar in der industriellen Nutzung umsetzen lassen. Ein Schwerpunkt ist z.Zt. die Werkstoffchemie mit Fragestellungen über die Zusammenhänge zwischen makroskopischen Materialeigenschaften und mikroskopischer (atomarer) Struktur. Einen wichtigen Impuls hat die moderne Chemie durch die Möglichkeiten der so genannten Computational Science erhalten. Hierbei reicht das Spektrum von der Simulation von Reaktionsprozessen bis zu Berechnungen im Bereich von molekularen und supramolekularen Strukturen. Damit wird z.B. das computergestützte Design neuer Moleküle mit bestimmten gewünschten Eigenschaften möglich. Wachsende Bedeutung gewinnt die Katalysatorforschung, wo das bisher vorherrschende empirische Wissen über Katalyseprozesse zunehmend durch theoretisch fundierte Analysen auf Mikrostrukturebene ersetzt wird. Generell sind die Fortschritte in allen Bereichen der Chemie eng mit der rasanten Entwicklung bei den analytischen Methoden (z.B. Spektroskopie) gekoppelt.

Praktisch alle technologischen Zukunftsanalysen und -programme weisen dem Gebiet der Werkstoffe eine Schlüsselstellung im Spektrum der Technologien für das 21. Jahrhundert zu. Dabei liegen die Schwerpunkte sowohl bei der Verbesserung bereits etablierter Werkstoffe als auch bei der Entwicklung neuer Materialien. So werden die konventionellen Werkstoffklassen, d.h. in erster Linie die Metalle, Keramiken und Polymere auch weiterhin eine dominierende Rolle im gesamten Technikbereich einnehmen. Darüber hinaus werden zunehmend neuartige Werkstoffkonzepte realisiert, die wesentlich durch das neue Prinzip des so genannten Material Tailoring gekennzeichnet sind. Hierbei steht die gedachte Nutzung eines Werkstoffes von Anfang an im Vordergrund. Ausgehend vom Nutzungsprofil eines geplanten Produktes wird der hinsichtlich seiner Eigenschaften optimale Werkstoff zunächst theoretisch entworfen und anschließend stofflich realisiert. In den meisten Fällen handelt es sich bei diesen maßgeschneiderten Lösungen um Werkstoffverbunde, bei denen die gezielte Kombination verschiedener Materialien zu Eigenschaften führt, die mit keiner der Komponenten allein erreichbar wären. Ein großes Anwendungspotenzial haben die so genannten Intelligenten Strukturen und Materialien, die selbstständig auf Änderungen der Umgebungsbedingungen reagieren können. Diese bilden die Grundlage eines neuen technischen Konzeptes, das durch die Begriffe Smart Materials oder Adaptronik charakterisiert wird.

Ummittelbar mit dem Bereich der Werkstoffe verknüpft ist der Bereich der Fertigungs- und Verfahrenstechnik. Er umfasst im Prinzip alle Technologien der stofflichen Werkschöpfungskette, die vom Rohstoff über Werkstoffkomponenten, Werkstoff, Halbzeug und Bauteil bis zum Endprodukt oder System reicht. Die derzeit aktuellsten übergeordneten Ziele sind hier die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und die vermehrte Berücksichtigung des so genannten produktionsintegrierten Umweltschutzes. Beiden Zwecken dient die zunehmende Automatisierung der Prozesse, die wiederum durch vielfältige Neuentwicklungen im Bereich der Sensortechnik sowie der Steuerungs- und Regelungssysteme ermöglicht wird. Neben einer Vielzahl von werkstoffspezifischen Fertigungsverfahren ragt insbesondere die Schicht- und Oberflächentechnik als besonders innovationsträchtig heraus. Sie bietet die Möglichkeit der Aufgabentrennung zwischen einem gegebenfalls preiswert herstellbaren konventionellen Basiswerkstoff, der Festigkeits- und Steifigkeitsaufgaben übernimmt, und der Beschichtung bzw. der entsprechend modifizierten Oberfläche, die über zusätzliche Funktionseigenschaften verfügt.

Ein herausragender Trend der modernen Technik ist die zunehmende Miniaturisierung und Integration von Funktionselementen zu immer leistungsfähigeren Bauelementen und Systemen. Die unumstrittene Vorreiterrolle nimmt hier die Mikroelektronik ein, doch auch in anderen Technologiefeldern wie z.B. Mechanik, Optik oder Sensortechnik wird der Trend zur Miniaturisierung und Integration immer stärker. Mit dieser so genannten Mikrotechnik oder Mikrosystemtechnik entsteht ein neues übergeordnetes Technologiekonzept, das sich im Wesentlichen auf elektronische, mechanische, optische und chemische Funktionselemente abstützt.

In Mikrotechnik gefertigte Komponenten sind eine wichtige Basis der Photonik. Hierunter fasst man alle Technologien zusammen, bei denen Signale auf optischem Wege erzeugt, übertragen und empfangen werden. Da allerdings informationsverarbeitende Systeme auf rein optischer Basis auf absehbare Zeit nicht zu verwirklichen sein dürften, kommt dem Gebiet der Optoelektronik als Schnittstelle zwischen optischer Übertragung und elektronischer Verarbeitung der Daten auch langfristig eine steigende Bedeutung zu.

Als Nanotechnik bezeichnet man die Herstellung, Untersuchung und Anwendung von Strukturen, Schichten und Oberflächen, deren kritische Abmessungen und Toleranzen von 100 nm bis hinab zu atomaren Größenordnungen (< 1 nm) reichen. Sie befindet sich im Gegensatz zur Mikrotechnik noch vielfach im Anfangsstadium der technischen Nutzung. In vielen Zukunftsanalysen wird die umfassende Erschließung des Nanobereichs als eine der derzeit größten wissenschaftlichen Herausforderungen angesehen. Als Endziel dieser Entwicklung steht die Vision einer neuen Ingenieurwissenschaft auf atomarer und molekularer Ebene mit enormen Auswirkungen für den gesamten Technikbereich.

Die Mikroelektronik, als die dominierende Schlüsseltechnologie der letzten Jahrzehnte, bleibt auch in Zukunft geprägt durch die auf Silizium basierende planare Integrationstechnik. Allerdings dürfte die seit vielen Jahren fast gesetzmäßig eingehaltene Zunahme der Komplexität der Schaltkreise bei Strukturabmessungen im Nanometerbereich an Grenzen stoßen. Damit ist in ungefähr 15 Jahren zu rechnen. Weitere Leistungssteigerungen sind dann noch durch dreidimensionale Chipstrukturen oder langfristig durch den Übergang zur so genannten Molekularen Elektronik zu erwarten. Bereits heute füh-

ren Halbleitermaterialien wie Galliumarsenid, Galliumnitrid oder Siliziumkarbid zu neuen Möglichkeiten vor allem in der Hochfrequenztechnik und in Hochtemperaturanwendungen. Insgesamt noch am Anfang ihrer technischen Umsetzung steht die so genannte Magnetoelektronik, die auf der Nutzung magnetischen Eigenschaften von Elektronen basiert.

Eine sehr enge Nachbarschaft zur „klassischen" Elektronik bzw. Mikroelektronik weist das Gebiet der Mikrowellentechnik auf. Sie hat in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte zu verzeichnen. Hier spielen alle Werkstoffe, Komponenten und Systeme eine Rolle, die für Frequenzen im GHz-Bereich verwendet werden. Wesentliche technische Trends sind die zunehmende Bedeutung von Halbleitern als Basismaterial und die damit verbundenen Bemühungen um Integration und Miniaturisierung.

In den vergangenen vier Jahrzehnten haben sich Laser von komplizierten Laborgeräten zu zuverlässigen Komponenten mit vielfältigen Anwendungen in Technik, Naturwissenschaft und Medizin entwickelt. Derzeit wird weltweit mit erheblichen Anstrengungen an der Weiterentwicklung bestehender Strahlquellen und an neuen Lasertypen für verschiedene Anwendungen gearbeitet. Wichtige übergeordnete Entwicklungsziele sind hierbei Miniaturisierung, stabilere und kompaktere Bauweisen, höhere Leistungen, bessere Strahlqualitäten sowie verbesserte Handhabbarkeit und Erhöhung der Wirkungsgrade. Sowohl im Niederenergie- als auch im Hochenergiebereich wird die Bedeutung der Halbleiterlaser stark zunehmen.

Hauptaufgabe der Energietechnik ist auch in Zukunft die hinreichende und dabei möglichst effiziente und umweltschonende Versorgung mit Energie. Daher sind in diesem Bereich nach wie vor enorme Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen zu beobachten. Einen Schwerpunkt bildet dabei die Entwicklung alternativer bzw. regenerativer Energieversorgungslinien, wie z.B. Wind, Biomasse oder Solarenergie. Dennoch werden die heute gebräuchlichen Primärenergieträger, d.h. Erdöl, Erdgas, Wasserkraft, Kohle und Kernenergie, noch jahrzehntelang dominieren. Nur durch ihre Verwendung dürfte die Forderung nach preiswerter Energie in großen Mengen zu realisieren sein. Aus heutiger Sicht scheint der weltweite Vorrat an fossilen Energievorräten zumindest in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts auch einen noch erheblich steigenden weltweiten Energiebedarf decken zu können. Die Erzeugung vergleichbarer Energiemengen aus Kernspaltung ist zwar technisch möglich, ihre Realisierung jedoch aufgrund von Akzeptanzproblemen fraglich. Die Kernfusion wird allenfalls langfristig zur Verfügung stehen. Außerdem ist ihre politische Durchsetzbarkeit trotz der im Vergleich zur Kernspaltung deutlich geringeren Endlagerproblematik noch offen. Langfristig wird die Solarenergie eine immer größere Bedeutung gewinnen.

Bei vielen Entwicklungen innerhalb der Energietechnik, insbesondere im Bereich der Antriebe, stehen Umweltaspekte im Vordergrund. Herausragender Trend ist die steigende Bedeutung der elektrischen Energieform auf allen Funktionsebenen. Gleichzeitig nimmt der Einsatz elektronischer bzw. computergestützter Steuerungen und Regelungen (inklusive der jeweils geeigneten Software) ständig zu. Besondere Impulse gibt es außerdem durch die Entwicklung neuer Werkstoffe und Strukturen zur Erhöhung der Prozesstemperaturen in Verbrennungskraftmaschinen oder zur Optimierung von chemischen,

mechanischen und elektromagnetischen Energiespeichern sowie von Brennstoff- oder auch Solarzellen.

Information & Wissen

In den letzten Jahrzehnten hat sich der Faktor Information immer stärker zur dominierenden Einflußgröße in praktisch allen gesellschaftlichen Bereichen entwickelt. Die Fähigkeit zum Umgang mit Information ist zur entscheidenden Grundlage für Wissenschaft, Forschung, Bildungswesen, Technik, Produktion und Verwaltung geworden.

Die klassische wissenschaftliche Grundlagendisziplin in diesem Bereich ist die Mathematik. Ihre Entwicklung wird derzeit wesentlich durch die Auflösung der Schranken zwischen der sog. reinen und der angewandten Mathematik geprägt. Insbesondere der Einsatz von Hochleistungsrechnern zur Problemlösung hat vielen mathematischen Zweigen neuen Aufschwung gebracht, wie z.B. der Zahlen- und Graphentheorie. In direktem Bezug zur Mathematik steht die Informatik als wissenschaftliche Basis der Informationsverarbeitung (Computer Science).

Der gesamte Bereich der Computertechnik wird nach wie vor entscheidend durch die Dynamik der Mikroelektronik bestimmt. Neben den Weiterentwicklungen auf Komponentenebene haben hier auch Fortschritte auf dem Gebiet der Rechnerarchitekturen, wie z.B. Mehrrechnerstrukturen und Parallelverarbeitung, großen Einfluss. Völlig neue informationsverarbeitende Systeme auf rein optischer Basis könnten ggf. langfristig auf der Basis der photonischen Kristalle zu verwirklichen sein. Noch weiter in die Zukunft reichen alle Überlegungen bezüglich molekularer Computer oder DNA-Computer. Hier ist eine technische Umsetzung derzeit nicht erkennbar.

Zielvorstellung der modernen Kommunikationstechnik ist die Errichtung eines flächendeckenden breitbandigen Kommunikationsnetzes mit der Fähigkeit, weltweit zwischen beliebigen Orten jede Art von Information zu übertragen. Hier nimmt insbesondere das Internet die dominierende Treiberfunktion wahr. Die zukünftige Kommunikationsinfrastruktur wird im Wesentlichen auf der Integration der Informationsübertragung über Festnetze, terrestrischen Mobilfunk und Satelliten basieren.

Aufgrund der außerordentlichen Dynamik im Hardwarebereich erweist sich zunehmend die Software als begrenzender Faktor für die Einführung und Funktionsfähigkeit neuer informationsverarbeitender Systeme. Hier setzt sich das Konzept des Software-Engineering durch, d.h. der ingenieurmäßigen Herstellung, Implementierung und Wartung von Software. Dennoch ist auch langfristig nicht mit der vollautomatischen Erstellung hochkomplexer Softwarepakete zu rechnen. Anvisiert wird die Realisierung von Softwarefabriken, in denen qualitativ hochwertige und fehlerfreie Software aus vorhandenen Bausteinen montiert wird.

Ein herausragender Trend der modernen Informationsverarbeitung ist die Einbeziehung der semantischen Ebene, d.h. der Übergang vom Umgang mit Daten zum Umgang mit Wissen. Wissensverarbeitende Systeme haben die Fähigkeit, den Kontext der zu bearbei-

tenden Daten zu berücksichtigen und in Beziehung zu bereits gespeicherten Inhalten zu setzen. Unter Verwendung von Regeln und Schlussfolgerungen kann so neues Wissen geschaffen werden. In diesem Zusammenhang erhält auch das Gebiet der Künstlichen Intelligenz neue Impulse. Zunehmende Bedeutung erlangt das so genannte Soft Computing, eine Bezeichnung für die Verarbeitung nicht genau festgelegter oder unscharf definierter Daten. Als erfolgversprechende Lösungsansätze sind hier die Fuzzy-Systeme, die Neuronalen Netze und die Evolutionären Algorithmen zu nennen. Anwendung finden derartige Technologien z.B. im Bereich Bildverarbeitung/Mustererkennung, der darüber hinaus stark von den Fortschritten bei der Rechen- und Speicherkapazität profitiert.

Eine besonders zukunftsträchtige Forschungsdisziplin an der Schnittstelle von bereits etablierten Wissenschaftsbereichen wie Psychologie, Philosophie, Gehirnforschung oder Linguistik ist die so genannte Kognitionswissenschaft. Sie beschäftigt sich aus interdisziplinärer Sicht relativ abstrakt mit der Natur des menschlichen Wissens. Auch hier bilden Computermodelle der zugrundeliegenden mentalen Prozesse des Denkens, Erkennens, Sprechens und Lernens ein wesentliches Forschungsinstrument. In engem Bezug hierzu entsteht z.Zt. die Neuroinformatik. Ihr Hauptziel ist die technische Nachbildung von Funktionsweisen und Grundbausteinen des menschlichen Gehirns.

Die Informationstechnologien sind Ausgangspunkt für eine Reihe neuer Technologien, die auf der zunehmenden Leistungsfähigkeit von Computern basieren. Hier ist z.B. die Multimedia-Technik als wichtigste Entwicklung im Bereich der Mensch-Maschine-Schnittstelle zu nennen. Auch bei der Automation/Robotik ist mit weiteren großen Fortschritten zu rechnen, obwohl die ursprünglich etwas euphorischen Einschätzungen insbesondere im Hinblick auf mobile Landroboter inzwischen einer nüchterneren Erwartungshaltung gewichen sind.

Als Schnittstelle zwischen informationsverarbeitenden Systemen und der realen Umwelt bilden Sensoren eine wesentliche Voraussetzung für die Nutzung maschineller Intelligenz in technischen Systemen. Wichtige Trends in der Sensorik sind die zunehmende Miniaturisierung und die damit häufig verbundene Steigerung der Empfindlichkeit und der Selektivität sowie die Integration der Auswerteelektronik. Insgesamt befindet sich die Sensorik damit in einer Übergangsphase von der reinen Signalumsetzung zur intelligenten Informationsverarbeitung.

Leben & Natur

Während die großen Innovationszyklen in der Technikgeschichte bisher vor allem durch Basisinnovationen in der Physik und der Chemie ausgelöst wurden, werden sie in diesem Jahrhundert stark von der Biologie und den damit verwandten Disziplinen geprägt sein. Insbesondere die Fortschritte im Bereich der modernen Biochemie, d.h. des Studiums der chemischen Struktur biologisch relevanter Substanzen und Reaktionen, haben wesentlich zum Übergang der Biologie von einer deskriptiven zu einer analytischen Naturwissenschaft beigetragen.

Eine ähnlich herausragende Stellung für die Technik, wie sie heute z.B. die Festkörperphysik aufgrund ihrer Anwendungsnähe inne hat, könnte in Zukunft von der Biotechnologie eingenommen werden. Dabei handelt es sich um eine Synthese aus Biochemie, Mikrobiologie und Ingenieurwissenschaften. Ihr Ziel ist die technische Nutzung der Eigenschaften von Organismen oder von Zellen bzw. Zellteilen. Die Grundlage der modernen Biotechnologie wurde erst in der jüngeren Zeit durch das Verständnis der molekularen Basis zellulärer Funktionen und durch die Möglichkeiten zu deren Manipulation (Biomolekulares Engineering) gelegt. Die aufsehenerregendste und die größte Dynamik entwickelnde Arbeitsmethode der Biotechnologie ist die Gentechnik. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, einem Organismus eine ihm bisher fremde Erbanlage stabil einzupflanzen. Die in diesen Bereichen zu erwartenden Fortschritte werden in Zukunft zunehmende Auswirkungen auf viele andere Hochtechnologien haben.

Bereits heute hat die Biotechnologie eine hohe Bedeutung für industrielle Anwendungen. Das gilt schon traditionell für den Ernährungsbereich. Hier reicht das Spektrum der Erzeugnisse biotechnologischer Verfahren von Molkerei- oder Fisch- und Fleischprodukten über Backhefen bis hin zu Farb- und Geschmacksstoffen. In der Landwirtschaft gehören Tierfutter, Einsäuerungs- und Kompostierungsverfahren, Schädlingsbekämpfungsmittel sowie der gesamte Bereich der Pflanzen- und Tierzucht zu ihren besonders erwähnenswerten Anwendungen.

Auch in der chemischen Industrie und bei der Erzeugung synthetischer Energieträger spielt die Biotechnologie eine Rolle. Interessant sind hier z.B. der Einsatz im Bereich der Metallanreicherung sowie die Produktion von Ethanol oder Biomasse. Dazu kommt in zunehmendem Maße der querschnittliche Einsatz von Biosensoren, bei denen hochselektive biologische Meßfühler zur Signalübertragung und -auswertung z.B. auf einem Siliziumchip aufgebracht sein können. Hier spielen unter anderem monoklonale, also in ihren biochemischen Eigenschaften absolut identische Antikörper eine wichtige Rolle. Aufgrund ihrer enormen Variationsmöglichkeiten bei der Erkennung chemischer Substanzen sind diese auch ein wichtiges Hilfsmittel für die Entwicklung von Medikamenten.

Für die Zukunft wird in allen genannten Bereichen eine deutliche Erweiterung biotechnologischer Anwendungen vorausgesagt. Hierbei werden die bedeutendsten Erfolge in der Medizin erwartet. So sollen pathogene Mikroorganismen besser verstanden und ihre Schwachstellen gezielt bekämpft werden können. Auf lange Sicht sind auch durchgreifende Erfolge bei der Abwehr von Erbkrankheiten möglich.

Ein Beispiel für die zunehmende Rückbesinnung auf naturnahe Lösungen ist die Bionik (auch Biomimetik). Dieses interdisziplinäre Forschungsgebiet an der Schnittstelle zwischen Biologie und Technik hat das Ziel, aus biologischen Funktions-, Struktur- und Organisationsprinzipien Lösungsmöglichkeiten für technische Probleme abzuleiten.

Die wahrscheinlich größten Herausforderungen an die Forschung und Technologie der Zukunft stellen sich im Umweltbereich. Die bisher praktizierte Anwendung der Umwelttechnik beschränkt sich bis heute im Wesentlichen auf die Maßnahmen zur Behandlung von bereits eingetretenen bzw. vorhersehbaren Umweltschäden (Eindämmung, Reparatur, Sanierung). Hier setzt sich als neuer Ansatz zunehmend die Suche nach umfassen-

den Strategien zum optimalen Umgang mit der Umwelt durch. Ziel ist es, ökologische Probleme durch geeignete Maßnahmen gar nicht erst entstehen zu lassen oder so quellennah wie möglich zu mindern. Forschungsziele mit hohem Innovationspotential sind hier insbesondere durch das Zusammenwirken einer Vielzahl von Einzelentwicklungen aus verschiedenen Technologiefeldern erreichbar. Eine wichtige Strategie zur frühzeitigen Vermeidung von Umweltbelastungen ist z.B. die immer stärkere Nutzung von maschineller Intelligenz in Produktion und Konsum durch die Möglichkeiten von Elektronik, Sensorik und Informationstechnik.

Da die globalen Aspekte der Umwelt- und Ressourcenschonung immer stärker in den Vordergrund des politischen und wirtschaftlichen Interesses rücken, gewinnen die Geowissenschaften als Grundlagendisziplin in diesem Bereich immer größere Bedeutung. Enorme Fortschritte haben hier insbesondere die Entwicklungen im Bereich der Sensorik und Messtechnik sowie die Möglichkeiten zur satellitengestützten Beobachtung gebracht. Darüber hinaus befindet sich dieses Wissenschaftsgebiet in einem tiefgreifenden Wandel, da es sich hinsichtlich der theoretischen Basis immer stärker auf computergestützte Modellbildung abstützt. Von der Anwendung der Methoden der Computational Science profitiert insbesondere die moderne Atmosphären- und Klimaforschung. Weitere aktuelle geowissenschaftliche Themenschwerpunkte sind die Meeresforschung und die Seismologie.

Das gesamte Gesundheitswesen wird zukünftig immer stärker durch die Auswirkungen der Informationstechnik geprägt. Betroffen sind neben der Verwaltung insbesondere die Bereiche Erforschung, Prävention, Diagnose und Therapie von Erkrankungen sowie Rehabilitation. Eine immer größere Rolle spielen hier die Möglichkeiten zur Ortsunabhängigkeit der jeweiligen Akteure (Tele-Medizin). Im Zusammenhang mit der zunehmenden Überalterung der Industriegesellschaften wird der Einsatz von Robotern in der Medizin, insbesondere im Pflegebereich, immer wichtiger.

Wirtschaft & Gesellschaft

Eine große Gruppe von Hochtechnologiefeldern wird im Wesentlichen durch ihre Nähe zu bestimmten Anwendungen charakterisiert oder leitet sich aus der Suche nach bestimmten Problemlösungen aus übergeordneter wirtschaftlicher oder gesellschaftlicher Sicht ab. Häufig enthalten diese Felder Spezifikationen von Querschnittstechnologien, die auf bestimmte Anwendungen zugeschnitten sind.

So war die Raumfahrttechnik bis in die jüngste Vergangenheit Motor für eine Vielzahl technologischer Entwicklungen in Bereichen wie Kommunikationstechnik, Sensorik, Miniaturisierung und Automatisierung. Im Rahmen der Ost-West-Konfrontation wurden die Erfolge in der Raumfahrt in beiden Lagern zum großen Teil als ein Maß für die allgemeine wirtschaftlich/technische Leistungsfähigkeit herausgestellt, und daher waren die entsprechenden Programme ausreichend mit Mitteln ausgestattet. Heute treten in der zivilen Raumfahrttechnik zunehmend die Aspekte des wissenschaftlichen und ökonomischen Nutzens in den Vordergrund, wie er z.B. bei der kommerziellen Nutzung von

Satelliten gegeben ist. Daher wird derzeit wegen ihrer sehr hohen Kosten intensiv über den Sinn der bemannten Weltraumfahrt diskutiert. Generell besteht Übereinstimmung, dass zur Begründung zukünftiger Weltraum-Großprojekte wie bemannter Mondstationen oder Marsmissionen nur übergeordnete wissenschaftliche, politische und kulturelle Motive herangezogen werden können. Selbst im erdnahen Bereich erzwingen die hohen Entwicklungs- und Betriebskosten der bemannten Raumfahrt eine Konzentration auf wenige internationale Programme.

Neben der Durchführung und der Vorbereitung von Grundlagenprojekten, die Fragen der Entstehung, des Wesens und der Zukunft des Sonnensystems und des ganzen Weltalls untersuchen, dient die Mehrzahl der derzeitigen Raumfahrtaktivitäten der Schaffung einer erdnahen Infrastruktur, wobei hier die Zahl der den Weltraum nutzenden Staaten stark zunimmt. Insbesondere für die Wirtschaft der hochentwickelten Industriestaaten ist die Nutzung der Satellitentechnik inzwischen unverzichtbar geworden.

Immer stärker steigt die Bedeutung von Technologiefeldern, die mit den unmittelbaren Lebensbereichen des modernen Menschen verknüpft sind (z.B. Arbeit, Freizeit, Wohnen). Herausragender Trend ist hier das durchgehende Eindringen des Computers in das berufliche und private Umfeld des Menschen (Informationsgesellschaft). Viele der derzeit zu erkennenden innovativen Konzepte lassen sich in Form von übergreifenden Leitideen darstellen, die unter Stichworten wie Fabrik, Büro, Haus, Stadt, Krankenhaus oder Verkehr der Zukunft firmieren.

Vor allem die Arbeitswelt wird zukünftig immer stärker durch die Informationstechnik geprägt. Dies führt im Bereich der Produktion zu höchster Flexibilität bei der Umstellung der Fertigung auf neue Produkte. Das kann so weit gehen, dass Produktvarianten nur noch als virtuelle „Schubladenlösungen" bereitgehalten werden müssen. Immer größere Bedeutung erlangen Konzepte, mit denen man aus der Ferne auf produzierende Systeme zuzugreifen kann (Tele-Arbeit, Tele-Diagnose, Tele-Wartung usw.). Im Bereich der Büroarbeit setzt sich der Trend zum so genannten Mobilen Büro fort.

Auch die moderne Bau- und Gebäudetechnik profitiert wesentlich von informationstechnischen Entwicklungen. So führt die Konzeption von Gebäuden mit hinreichend intelligenten Klima- und Belüftungssystemen zur effizienteren Energienutzung und zur nachhaltigen Verbesserung des Wohn- und Arbeitsklimas. Die Notwendigkeit zu effizienten und nachhaltigen Lösungen steht auch im Vordergrund der Entwicklungsbemühungen im Verkehrsbereich. Hierzu gehört neben neuen Antriebskonzepten vor allem der durchgehende Einsatz von moderner Elektronik, Sensorik und Computertechnik im Bereich der Transportsysteme und Verkehrsinfrastruktur.

Thomas Kretschmer

2 Technologische Kernthemen zwischen 1996 und 2009

Die folgenden über 150 Einzelbeiträge zu Kernthemen der technologischen Entwicklung wurden zwischen 1996 und 2009 von Mitarbeitern des INT im Rahmen des Aufgabengebiets Technologiemonitoring erarbeitet. Sie wurden für diese Publikation in insgesamt 13 Themenfelder zusammengefasst.

Jedem Feld ist eine graphische Übersicht zur zeitlichen Abfolge der Entstehung der Einzelbeiträge vorangestellt. Darüber hinaus orientiert sich die Gliederung wie folgt an der seit einigen Jahren im Rahmen der Analyse- und Vorausschauarbeit am INT gewählten Struktur (s. Kap. 1):

Materie & Energie

- Werkstoffe
- Materielle Strukturen
- Prozesse und Verfahren
- Energietechnik

Information & Wissen

- Informationsverarbeitung: Grundlagen und Konzepte
- Informationsverarbeitung: Technologien, Komponenten und Systeme
- Elektronik
- Optische Technologien
- Sensortechnik

Natur & Leben

- Biologische Technologien
- Umwelt- und Medizintechnik

Wirtschaft & Gesellschaft

- Produktion und Infrastuktur
- Virtuelle Welt



Materie & Energie
e & Energie
Materie & Energie
Materie & Energie
Materie & Energie
Materie & Energie
Mate



Materie & Energie

Werkstoffe

Formgedächtnis-werkstoffe	2009	
	2008	
	2007	
Magnesiumwerkstoffe		
Funktionskeramiken	2006	
Organisch modifizierte Keramiken	2005	
Hochtemperaturfeste Werkstoffe	2004	
Schichtverbunde		Strukturkeramiken
Holzwerkstoffe	2003	Faserverstärkte Kunststoffe
Stähle	2002	Flüssigkristalline Werkstoffe
Metallische Gläser		Diamanttechnologie
	2001	Keramik-Matrix-Verbundwerkstoffe
Magnetwerkstoffe		Dreidimensionale Faserverbundwerkstoffe
	2000	Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe
Funktionspolymere	1999	
	1998	Hochtemperatur-Supraleiter
Hochleistungspolymere		Multifunktionale Werkstoffe
Aerogele	1997	Hochleistungsmetalle
Textile Werkstoffe		Kohlenstofffaserverstärkte Kohlenstoffe
	1996	



Formgedächtniswerkstoffe

Als Formgedächtniseffekt bezeichnet man die Fähigkeit eines Werkstoffes, seine Form durch äußere physikalische Einwirkung in definierte alternative Geometrien zu transformieren. Materialien dieses Typs wurden zum ersten Mal Anfang der 1960er Jahre beschrieben. Es handelte sich um bestimmte Metall-Legierungen, die ihre äußere Form in Abhängigkeit von der Temperatur ändern. Seitdem haben diese so genannten Memory-Metalle bereits eine ganze Reihe von Anwendungen gefunden. In letzter Zeit hat der gesamte Bereich der Formgedächtniswerkstoffe nicht zuletzt aufgrund der Entdeckung neuer physikalischer Auslösungsmechanismen (z.B. durch mechanische oder elektromagnetische Einwirkung) eine neue Dynamik erhalten. So sind z.B. heute auch Formgedächtnismaterialien auf Polymerbasis Gegenstand intensiver Forschung, da man sich von deren praxisgerechter Realisierung viele neue Anwendungsmöglichkeiten verspricht.

Die Funktionsweise der konventionellen Memory-Metalle basiert auf einer reversiblen Veränderung ihrer Kristallgitterstruktur (so genannte Austenit-Martensit-Gefügeumwandlung). Dabei nehmen sie je nach Temperatur verschiedene stabile äußere Formen an, da die Modifikation der Gitterstruktur auch zu einer Änderung des Kristallvolumens führt. Im Gegensatz zu den bekannten Thermo-Bimetallen erfolgt die Formänderung bei Memory-Metallen abrupt in einem kleinen Temperaturintervall. Bemerkenswert ist dabei das hohe Arbeitsvermögen pro Volumeneinheit während der Effektentfaltung. Die „Schalttemperatur" kann u.a. durch die Legierungszusammensetzung gezielt eingestellt werden.

Insgesamt unterscheidet man drei Arten von Formgedächtniseffekten. Beim so genannten Einwegeffekt wird der Werkstoff zunächst verformt und „erinnert" sich beim anschließenden Erwärmen oberhalb einer bestimmten Temperatur an seine ursprüngliche geometrische Form. Diese bleibt dann auch bei erneuter Abkühlung erhalten. Dieser Effekt wird bereits für Rohrverbindungen und Spreiznieten, hochzuverlässige Steckverbindungen von Schaltkreisen, Implantate und für die Versteifung von Gewebe genutzt.

Beim Zweiwegformgedächtnis können zwei verschiedene Formen durch Erwärmung und Abkühlung abwechselnd eingenommen werden. Der Effekt kann z.B. in der Automationstechnik für thermomechanische Stellelemente, in der Medizin für Endoskopsteuerungen oder in der Regelungstechnik für Ventilsteuerungen genutzt werden. In der Entwicklung befinden sich z.B. Mikroventile für die Mikrofluidik. Hier kommt es darauf an, die besonders hohe Energiedichte des Formgedächtniseffekts zur Realisierung möglichst kompakter Bauelemente mit hohem Arbeitsvermögen auszunutzen. Eine weitere interessante Anwendungsmöglichkeit dieses Effektes ergibt sich im Bereich künstlicher Finger für Roboter, die von „Muskeln" aus Formgedächtnisdrähten angetrieben werden. Die Temperatursteuerung erfolgt hier direkt über den ohmschen Widerstand der Drähte.

Im Fall einer rein mechanisch induzierten Umwandlung des Gefüges spricht man von Pseudoelastizität oder von mechanischem Formgedächtnis. Dabei kann die innere Struktur allein durch Aufbringen oder Rücknehmen einer mechanischen Spannung zwischen den beiden Formen wechseln. Ein pseudoelastisches Bauteil läßt sich im Vergleich zu

konventionellen Legierungen um etwa das Fünf- bis Zehnfache dehnen oder stauchen und kehrt nach Entlastung in seine ursprüngliche Form zurück. Auch die Pseudoelastizität wird bereits technologisch genutzt, etwa in Dichtungen, für hochdämpfende Legierungen, bei Zahnspangen und als Gummiersatz. Am bekannntesten ist die Nutzung für superelastischen Brillenrahmen, die auch nach extremer Dehnung oder Biegung immer wieder ihre Ursprungsform annehmen.

Bei den Memory-Metallen sind bisher vor allem Nickel-Titan- und Kupfer-Zink-Aluminium-Legierungen erfolgreich eingesetzt worden. Dazu kommen inzwischen auch Legierungen auf Eisenbasis. Nickel-Titan-Legierungen sind aufgrund ihrer Biokompatibilität insbesondere für den Einsatz in der Medizintechnik prädestiniert. Insgesamt setzen die Forschungsbemühungen bei den Memory-Metallen vor allem bei der Suche nach neuen Legierungszusammensetzungen und der Optimierung der thermomechanischen Behandlungsverfahren an. So sollen die gewünschten Formgedächtnisfunktionalitäten mit verbesserten Gebrauchseigenschaften z.B. bei der Materialfestigkeit und der Temperaturbeständigkeit verbunden werden. Ein wichtiges Ziel bildet auch die Verringerung der Werkstoffermüdung nach sehr häufigem Wiederholen der Formänderung.

Bei den Formgedächtnislegierungen mit temperaturunabhängigen Auslösungsmechanismen werden ferromagnetische Memory-Metalle untersucht, bei denen die Strukturänderung durch Anlegen eines externen magnetischen Feldes erreicht wird. Bei diesen kann der Umschaltprozess wesentlich schneller und kontrollierter ablaufen als bei den herkömmlichen temperaturabhängigen Typen.

Neben den Metallen sind auch Polymere mit Formgedächtnis Gegenstand intensiver Entwicklungsbemühungen. Hier bestanden die ersten mit diesem Namen bezeichneten Stoffsysteme jedoch, ähnlich wie die Bimetalle, aus zwei Komponenten. Heute werden auch einkomponentige Formgedächtnispolymere untersucht, die nicht thermisch, sondern mit UV-Licht geschaltet werden. Es gibt auch bereits magnetisch gesteuerte Varianten. Formgedächtnispolymere besitzen ein großes Anwendungspotential in der Medizin, z.B. als bioabbaubare Implantate oder zur intravenösen Medikamentenversorgung mit Kanülen, die mit kleinem Durchmesser appliziert werden können und deren Querschnitt sich bei Körpertemperatur wieder vergrößert. Auch Gefäßstützen (Stents) hätten einige Vorteile gegenüber den bisher eingesetzten metallischen Varianten. So könnten sie mit einer Funktionalität zur lokalen Freisetzung von Wirkstoffen ausgestattet werden und damit die Gefahr eines Wiederverschlusses der Ader verhindern.

Mai 2008 Jürgen Kohlhoff

Magnesiumwerkstoffe

Das chemische Element Magnesium gehört zu den spezifisch leichtesten Metallen. Als Werkstoff hat es allerdings in reiner Form wegen seiner schlechten Verformbarkeit kaum Bedeutung. Diese verbessert sich erst durch Zusatz geringer Mengen verschiedener anderer Stoffe, wobei insbesondere Aluminium, Zink und Mangan eine Rolle spielen. Die so entstehenden Magnesiumlegierungen sind mit einer Dichte von unter 2 g/cm^3 die leichtesten der großtechnisch einsetzbaren metallischen Konstruktionswerkstoffe. Mit ihren gleichzeitig für viele Anwendungen ausreichenden Festigkeitswerten sind sie im Prinzip für den strukturellen Leichtbau prädestiniert. Hier liegt auch ihr zukunftsträchtigstes Anwendungsgebiet. Dabei konkurrieren sie insbesondere mit den faserverstärkten Kunststoffen und dem Aluminium (mit Dichten von ca. 1,4 bzw. 2,7 g/cm^3).

Die Magnesiumwerkstoffe hatten bereits Mitte des letzten Jahrhunderts einen im Vergleich zu ihren damaligen Konkurrenten hohen Entwicklungsstand erreicht, der zu einem relativ umfangreichen Einsatz insbesondere im Automobil- und Flugzeugbau führte. Allerdings ist ihre Nutzung auch mit einigen Problemen verbunden. Hier ist vor allem ihre hohe chemische Reaktionsfähigkeit zu nennen, die besondere Schutzmaßnahmen gegen Selbstentzündung insbesondere beim Schmelzen, Gießen und Zerspanen erfordert. Außerdem ist für die meisten ihrer technischen Anwendungen ein zusätzlicher Korrosionsschutz notwendig. Diese Tatsachen haben mit dazu beigetragen, dass der Einsatz von Magnesium als Konstruktionswerkstoff zwischenzeitlich fast in Vergessenheit geraten war. So kam es zu erheblichen Verlusten an bereits vorhanden gewesenen Kenntnissen und Erfahrungen.

In der letzten Zeit ist jedoch aufgrund der Energieproblematik die Bedeutung des konstruktiven Leichtbaus insbesondere im Fahrzeugbereich so stark gestiegen, dass auch das Interesse an Magnesiumlegierungen wieder zugenommen hat. Allerdings haben die Entwicklungen bei den konkurrierenden Werkstoffen und Bauweisen die Ansprüche der heutigen Anwender erheblich gesteigert. Dies hat im Magnesiumbereich umfangreiche Aktivitäten ausgelöst, die nicht nur Weiter- und Neuentwicklungen bei den Legierungen selbst, sondern praktisch alle für sie relevanten Formgebungs-, Füge- und Beschichtungsverfahren bis hin zum Recycling umfassen.

Inzwischen werden Magnesiumwerkstoffe bereits wieder für eine ganze Reihe von Leichtbauanwendungen vor allem im Automobilbau eingesetzt. Hier werden sie heute für nichttragende und nicht crash-relevante Bauteile verwendet, beispielsweise im Bereich der Motoren oder Getriebe. Im Jahr 2005 hat ihr Anteil bei etwa 10 kg pro Fahrzeug gelegen. Aluminumwerkstoffe liegen derzeit etwa bei 80 kg. Eine weitere erwähnenswerte aktuelle Anwendung finden Magnesiumlegierungen in Gehäusen für Mobiltelephone.

Von den heute eingesetzten Bauteilen aus Magnesiumwerkstoffen werden über 90% im so genannten Druckguss-Verfahren hergestellt. Dieses beruht auf dem Einpressen des flüssigen Gießmetalls in eine Form unter hohem Druck und ermöglicht mit seinen kurzen Taktzeiten die rationelle Herstellung auch sehr komplexer Bauteilgeometrien. Bestimmte

Magnesiumlegierungen sind für diese Prozesstechnologie besonders geeignet, weil sie über ausgezeichnete Gießeigenschaften verfügen. Außerdem haben sie wegen ihrer kleinen Masse nur geringe Wärmespeicherfähigkeiten und kühlen damit schnell ab. Jedoch stoßen die im Druckguss erreichbaren Werkstoffeigenschaften und machbaren Bauteilgrößen an ihre Grenzen. Grundsätzlich dürfte dadurch der Einsatzbereich dieses Verfahrens weitgehend auf komplexe, aber relativ wenig belastete Strukturen beschränkt bleiben.

Bessere Eigenschaften insbesondere im Hinblick auf die erreichbaren Bauteilfestigkeiten sind bei metallischen Werkstoffen im allgemeinen von so genannten Knetlegierungen zu erwarten. Diese sind durch eine geeignete Wahl der Legierungselemente auf eine möglichst gute Umformbarkeit hin optimiert. Sie werden z.B. zu gewalzten Blechen verarbeitet. Damit sind Bauteile mit guten Schlagfestigkeiten bzw. Crasheigenschaften realisierbar. Bei Magnesium-Knetwerkstoffen ist derzeit jedoch erst ein begrenztes Spektrum an Legierungen in Verbindung mit relativ kostenintensiven und wenig an das Material Magnesium angepassten Verarbeitungstechnologien verfügbar. Hier gibt es daher intensive Entwicklungsbemühungen, die zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von Magnesiumblechen auch für schlag- oder crashbeanspruchte Bauteile führen sollen. Darüber hinaus existieren bei einigen Automobilherstellern sogar bereits konkrete Vorstellungen über komplette Fahrzeugkarosserien aus Magnesiumwerkstoffen.

Insgesamt ist festzustellen, dass mittelfristig eine erhebliche Zunahme des Einsatzes von Magnesiumwerkstoffen erwartet werden kann. Dazu tragen die Bemühungen um großtechnisch nutzbare und wirtschaftliche Herstellungs- und Verarbeitungsverfahren bei. Auch die hohe Verfügbarkeit des Rohstoffes Magnesium spielt hier eine Rolle. Mit der Entwicklung größerer Märkte wäre zudem eine deutliche Verringerung der Materialpreise zu erwarten. Auf der Seite der mechanischen Eigenschaften dürften neue Legierungsentwicklungen zu weiteren Verbesserungen von Festigkeit und Verformbarkeit bei Raumtemperatur sowie der Widerstandsfähigkeit gegen Korrosion führen und Einsatztemperaturen über 300°C hinaus ermöglichen. Außerdem haben in den letzten Jahren erhebliche Anstrengungen insbesondere auf der Seite der Beschichtungstechnologien zu wesentlichen Fortschritten bei der Beherrschung der Korrosionsprobleme geführt, was auch das Interesse der Luftfahrtindustrie an dieser Materialklasse wieder steigern könnte.

Mai 2006 Jürgen Kohlhoff

Funktionskeramiken

Unter Keramiken versteht man nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe, die über einen so genannten Sinterprozess hergestellt werden. Hierbei werden die zunächst pulverförmig vorliegenden Ausgangsmaterialien in der Regel unter hohem Druck bei Temperaturen von bis zu ca. 1700°C zu stabilen Formkörpern verbacken. Je nach Hauptanwendungen unterteilt man das weite Feld dieser Werkstoffklasse grob in die Gebrauchskeramiken, wie z.B. Geschirr, Fliesen oder Sanitärprodukte, und in die Technischen Keramiken, bei denen die technische Nutzung und die hierfür erforderlichen Eigenschaften im Vordergrund stehen. Bei besonderen Anforderungen an die mechanische und thermische Beständigkeit spricht man von Strukturkeramiken, während bei den so genannten Funktionskeramiken insbesondere deren elektrische, optische oder magnetische Eigenschaften genutzt werden.

Nichtleitende Funktionskeramiken sind schon lange in vielen Branchen etabliert, wie z.B. dem Automobil-, Maschinen- und Flugzeugbau oder der Energietechnik. Ihr klassisches Einsatzgebiet ist die elektrische Isolation, insbesondere im Hochspannungsbereich. Aufgrund der hohen Isolationsfähigkeit bilden die nichtleitenden Keramiken ein wichtiges Ausgangsmaterial für den Bau von Hochleistungskondensatoren. Hierzu benötigt man Isolatoren mit hohem spezifischen Widerstand, so genannte Dielektrika. Die technisch genutzte fundamentale Eigenschaft von Dielektrika ist die Möglichkeit ihrer Polarisation, d.h. die räumliche Trennung positiver und negativer Ladungen unter Einwirkung eines elektrischen Feldes. Für diesen Effekt ist der atomare Aufbau des Kristallgitters ausschlaggebend. Bei der Keramikherstellung lassen sich die Kondensatoreigenschaften über die Wahl der Ausgangsstoffe, Dotierung und Prozessparameter in weiten Bereichen maßschneidern.

Andere nichtleitende Keramiken zeigen aus sich heraus eine spontane elektrische Polarisation. Solche so genannten Ferroelektrika ermöglichen z.B. die Umwandlung von mechanischer Energie oder Wärme in elektrische Signale und umgekehrt. Auf diesem als piezoelektrisch bzw. pyroelektrisch bezeichneten Effekt basieren vielfältige Anwendungen in Sensorik und Aktorik, wie z.B. die exakte Messung von Druck, Beschleunigung oder Temperatur.

Piezokeramische Bauteile dienen als Frequenzfilter für Mikrowellen z.B. in Mobiltelefonen und in der Radartechnik, als Frequenzgeber ähnlich wie in der Quarzuhr oder für hochpräzise Stellmotoren mit Schrittweiten im Nanometerbereich. Sie sind von wachsender Bedeutung als funktionale Komponenten in mikro-elektromechanischen Bauelementen (MEMS). Zunehmend werden sie genutzt, um störende Schwingungen und Vibrationen zu dämpfen bzw. ganz auszuschalten. Hierzu gehört auch das Verändern der akustischen Signatur. Darüber hinaus können sie langfristig in adaptronischen Anwendungen, wie z.B. variablen Schiffs- oder Flugzeughüllen, eine maßgebliche Rolle spielen.

Das Anwendungspotenzial einer zweiten großen Gruppe von Funktionskeramiken basiert auf der Leitung von Ionen oder Elektronen im Kristallgitter. Zu ihnen zählen Halbleiter, Ionenleiter und Hochtemperatursupraleiter, wobei die jeweilige Art und Stärke der Lei-

tung erheblich von der Temperatur abhängt. Neben ihrer thermischen und mechanischen Stabilität zeichnen sie sich dadurch aus, dass sich ihre späteren elektrischen Eigenschaften durch die Auswahl der eingesetzten Rohstoffe und Herstellungsparameter sehr gut einstellen lassen.

Ionenleitende Keramiken werden vor allem in Batterien eingesetzt, z.B. als Minizellen für Herzschrittmacher sowie in Sensoren wie der Lambda-Sonde für die Motorsteuerung und künftig vermehrt als Membran in Hochtemperatur-Brennstoffzellen. Vielfältige Anwendungen in Sensorik und Hochleistungselektronik haben halbleitende Keramiken, bei denen Elektronen die Ladungsträger sind. Sie findet man z.B. als Sensoren für die Niveau- und Durchflussmengenmessung oder als selbstregelnde Heizelemente. Daneben sind polykristalline Halbleiterkeramiken wie z.B. Zinkoxid oder Siliziumcarbid wichtig als variable Widerstände und Durchschlagssicherungen in der Regelungstechnik. Keramische Wide-Bandgap-Halbleiterwerkstoffe, wie z.B. Siliziumcarbid oder Diamant, erlangen zunehmende Bedeutung als aussichtsreiches Material für störarme Hochleistungselektronik und Hochtemperaturanwendungen .

Keramische Hochtemperatursupraleiter findet man bereits in vielfältigen sensorischen Anwendungen, insbesondere zur hochgenauen Detektion von Magnetfeldern durch so genannte SQUIDs (Superconductive Quantum Interference Devices). Weiterhin dienen sie der Erzeugung von sehr starken Magnetfeldern, die z.B. in Kernspin-Tomographen für Medizin und Technik benötigt werden, sowie zum Einsatz in selbststabilisierenden Magnetlagern. Weitere Nutzungsmöglichkeiten sind die Energiespeicherung mittels supraleitenden Spulen sowie die Steigerung der Energieeffizienz von Elektromotoren. Nach wie vor problematisch ist trotz aller Verbesserungen in den letzten Jahren die Herstellung dichter, mechanisch ausreichend stabiler supraleitender Keramiken unter Beibehaltung der elektrischen und magnetischen Kennwerte. Auch die weitere Steigerung der Übergangstemperatur zwischen normal- und supraleitendem Zustand (Sprungtemperatur) stagniert seit einiger Zeit.

Eine bedeutende Rolle bei den Fortschritten auf dem Gebiet der Funktionskeramiken spielen moderne Methoden der Synthese höchstreiner und neuer Ausgangsstoffe. Ebenso wichtig sind neue Auftrags- und Formgebungsverfahren sowie Methoden des Rapid Prototypings, durch die sich Bauteile mit komplexerer Struktur aufbauen lassen. Auch neuere sehr schnelle Sinterverfahren bei niedrigeren Temperaturen erweitern das Spektrum an herstellbaren Funktionskeramiken erheblich.

Oktober 2005 Stefan Reschke

Organisch modifizierte Keramiken

Organisch modifizierte Keramiken sind molekulare Komposite aus organischen und anorganischen Bausteinen. Diese in Entwicklung und Anwendung noch recht jungen, aber sehr vielversprechenden Werkstoffe sind nichtkristallin, wie gewöhnlicher Kunststoff verarbeitbar und meist optisch transparent. Sie können in der Regel kostengünstig hergestellt und verarbeitet werden. Zu ihrer Herstellung nutzt man das so genannte Sol-Gel-Verfahren, das gleichzeitig auch die wichtigste nasschemische Methode zur Synthese keramischer Pulver definierter Form, Größe und Zusammensetzung ist.

Das Sol-Gel-Verfahren nutzt als keramikgebenden Bestandteil vor allem Metallalkoholate, z.B. von Silizium oder Aluminium. In diesen liegen die Grundbausteine von Siliziumdioxid- oder Aluminiumoxidkeramik (Si-O bzw. Al-O) schon in molekularer Form in einer organischen Verbindung vor. Statt diese metallorganischen Vorstufen nun durch chemische Reaktionen oder Wärmebehandlung zu keramischen Pulvern oder Festkörpern umzuwandeln, können sie auch über verschiedene chemische Reaktionen mit organischen Verbindungen zu polymerartigen Substanzen weiterverarbeitet werden. Derartige Substanzen werden als Hybridpolymere bezeichnet. Sie lassen sich in die Duroplast-ähnlichen organisch modifizierten keramischen Werkstoffe mit sehr klar definierbaren Eigenschaften überführen.

Die drei eigenschaftsbestimmenden strukturellen Basisbausteine von Hybridpolymeren und den daraus abgeleiteten organisch modifizierten Keramiken sind ein anorganisches Silizium-Sauerstoff-Netzwerk, organische Bindeglieder und so genannte funktionale Gruppen. Über Art und relativen Mengenanteil der drei Bausteine im Komposit lässt sich eine Vielzahl von Eigenschaften dieser Keramiken gezielt einstellen. Darüber hinaus kann man im anorganischen Netzwerk das Silizium auch gegen andere metallische Elemente austauschen, um bestimmte Eigenschaften maßzuschneidern. Die Überführung der Hybridpolymere in einen Festkörper erfolgt nach Verarbeitung bzw. Formgebung in der Regel im relativ niedrigen Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und ca. 200°C. Im Gegensatz zu herkömmlichen Keramiken ist kein Sinterprozess nötig. Die Härtung erfolgt in Abhängigkeit von der Art der funktionalen Gruppen meist über thermisch oder durch UV-Licht aktivierte chemische Vernetzungsreaktionen.

Zu den einstellbaren Eigenschaften zählen Form- und Strukturierbarkeit sowie Härte und Elastizität. Weitere wichtige anpassbare physikalische bzw. chemische Eigenschaften sind Dichte, thermische Ausdehnung, optischer Brechungsindex, Polarität, Diffusionsfestigkeit sowie Empfindlichkeit bzgl. Gas- und Ionenkonzentrationen. Zusammen mit den niedrigen Verarbeitungstemperaturen eröffnen sie ein breites und ständig wachsendes Spektrum an Anwendungsoptionen. Die zusätzliche Möglichkeit, Füllstoffe (Partikel, Fasern, Gewebe) in die Hybridpolymermasse einzuarbeiten, erweitert die Anwendungsvielfalt organisch modifizierter Keramiken nochmals.

Im Bereich der Oberflächenfunktionalisierung sind Antikratzbeschichtungen, z.B. auf Brillengläsern aus Kunststoff, seit längerem etabliert. Dabei sorgen die organischen Komponenten des Hybridpolymers für eine gute Anbindung an die Kunststoffoberfläche

und das anorganische Si-O-Netzwerk für die Abriebfestigkeit. Neuere Entwicklungen haben z.B. beschlaghemmende, schmutzabweisende oder klimaregulierende Funktionen zum Ziel. Auch der so genannte Lotuseffekt lässt sich mit organisch modifizierter Keramik besonders gut nutzbar machen. Diese aus der Natur abgeleitete Beschichtung zur Verschmutzungsverhinderung bzw. Selbstreinigung kombiniert einen hydrophoben Werkstoff mit einer pyramidenförmigen Oberflächenstrukturierung im Mikro- und Nanometerbereich. Sie kann durch Prägung und Härtung einer entsprechend modifizierten Hybridpolymerschicht sehr gut nachgeahmt werden.

Eine ähnliche Geometrie, aber einen deutlich höheren anorganischen Anteil zur Verbesserung der mechanischen Belastbarkeit hat die so genannte Mottenaugenstruktur, die zur Entspiegelung auf Glasoberflächen aufgebracht wird. Analoge, geometrisch exakt angeordnete stäbchenförmige Anordnungen ergeben photonische Kristalle, die wichtige Komponenten der optischen Informationstechnologie darstellen. Hybridpolymere lassen sich auch dotieren, um daraus für die Photonik geeignete Beschichtungen herzustellen. Auf ähnliche Weise kann man Sensorschichten für die Konzentrationsmessung von Gasen und Ionen gewinnen.

Weitere Beschichtungen aus organisch modifizierten Keramiken dienen zum Korrosionsschutz und zur Verbesserung der chemischen Beständigkeit sowie als Diffusionsbarrieren für Gase, Flüssigkeiten oder Ionen. Durch Einbau oder Einlagerung von leitfähigen Komponenten wirken sie statischer Aufladung entgegen. Mit einer Mikrostrukturierung versehen machen sie Fingerabdrücke unsichtbar. Als Lackgrundstoff für antimikrobiell beschichtete Verpackungsfolien ermöglichen sie die externe Konservierung von Lebensmitteln. Daneben lässt sich z.B. auch Haptik und Beständigkeit von Lederwaren verbessern. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl dekorativer Anwendungen, die Konsumgüter aus Glas oder Kunststoff optisch veredeln und gleichzeitig gebrauchsfreundlicher (z.B. spülmaschinenfest) machen.

Der Aushärtungsprozess von Hybridpolymeren lässt sich in der mikroelektronischen Maskentechnik nutzen, indem durch selektive Polymerisation Strukturen übertragen werden. Ebenso eigenen sich Hybridpolymere als funktionale und strukturgebende Werkstoffe für die elektrische und optische Verbindungstechnik. In der Mikrosystemtechnik sind sie einerseits als Maskenmaterial einsetzbar, andererseits aber auch zum dreidimensionalen Aufbau von Systemkomponenten aus organisch modifizierter Keramik.

Als Volumenwerkstoffe finden Hybridpolymere vor allem in der Zahnmedizin als Füllungsmaterial und als Ausgangsmaterial für das Rapid Prototyping Verwendung. Zunehmend Bedeutung gewinnen sie ausgehärtet z.B. als Gerüstwerkstoff im Bereich der Rekonstruktiven Medizin bzw. Implantatmedizin und der Prothetik.

Januar 2005 Stefan Reschke

Hochtemperaturfeste Werkstoffe

Materialien, die in technischen Prozessen bei Temperaturen (teilweise weit) oberhalb von 500°C eingesetzt werden, nennt man Hochtemperaturfeste Werkstoffe. Sie spielen insbesondere eine herausragende Rolle bei Energiewandlungsvorgängen, deren Wirkungsgrad mit der Prozesstemperatur steigt, wie z.B. in Gasturbinen. Wichtige Anwendungen finden sie darüber hinaus auch in Bremsscheiben, in Wärmeschutzsystemen der Luft- und Raumfahrt, in Verbrennungsmotoren oder Abgaskrümmern sowie in Werkzeugen und Hilfsmitteln bei der Fertigung von metallischen oder keramischen Bauteilen. Von besonderer Bedeutung ist dabei nicht in erster Linie eine besonders hohe Schmelztemperatur des Materials, sondern im praktischen Einsatz eher der Erhalt einer hohen mechanischen Festigkeit auch bei höchsten Temperaturen. In diesem Sinne hochtemperaturfest sind bestimmte Stähle oder Legierungen, Intermetallische Verbindungen, Keramiken, Verbundwerkstoffe auf Metall- oder Keramikbasis sowie Kohlenstofffaserverstärkter Kohlenstoff.

Die höchsten Einsatztemperaturen von hochwarmfesten Stählen reichen bis zu ca. 700°C. Diese werden von Chrom-Stählen und insbesondere von Chrom-Nickel-Stählen erreicht. Noch größere Hochtemperaturfestigkeiten haben die so genannten Superlegierungen, die speziell für Gasturbinen entwickelt wurden und deren bekannteste Vertreter auf den Elementen Eisen, Nickel oder Kobalt basieren. Während das Gefüge konventioneller metallischer Legierungen normalerweise aus vielen aneinandergrenzenden, unterschiedlich orientierten Kristalliten besteht, die aber alle die gleiche Gitterstruktur haben, weisen Superlegierungen zwei oder mehr Phasen auf. Dadurch werden Versetzungsbewegungen im Material behindert und hohe Einsatztemperaturen auch unter bedeutender mechanischer Beanspruchung ermöglicht. So liegen typische Einsatztemperaturen von Superlegierungen auf Nickel-Basis deutlich über 800°C. Eine nochmalige Erhöhung auf über 1000°C gelingt durch weiterentwickelte Verfahren zur gerichteten bzw. einkristallinen Erstarrung, mit denen sich die Kristallite innerhalb des Materials in Hauptbeanspruchungsrichtung ausrichten lassen. Auch die Oxid-Dispersionsverstärkung mit keramischen Phasen (Oxid-Dispersion-Strengthening = ODS) kann für metallische Legierungen zu weiteren Verbesserungen bei der Hochtemperaturfestigkeit führen. Eine interessante Einzelentwicklung mit zukünftig möglicherweise weitreichenden Auswirkungen z.B. auf den Flugkörperbau sind darüber hinaus Legierungen aus Chrom und dem Refraktärmetall Rhenium.

Der Bereich zwischen den bereits an das Ende ihrer Möglichkeiten gelangenden metallischen Superlegierungen und den noch in einem Entwicklungsprozess befindlichen Strukturkeramiken soll in Zukunft zunehmend durch die so genannten Intermetallischen Phasen abgedeckt werden. Es geht hier also um Einsatztemperaturen, die deutlich über 1000°C liegen. Die wichtigsten für diesen Zweck untersuchten Typen basieren auf den Aluminiden von Titan oder Nickel. Intermetallische Phasen sind metallische Mehrstoffsysteme, die sich grundlegend von klassischen Legierungen unterscheiden. So weichen ihre Kristallstrukturen wesentlich von denen ihrer einzelnen Komponenten ab. Außerdem stehen ihre Bestandteile häufig in stöchiometrischem, also ihrer chemischen Formel ent-

sprechendem Verhältnis zueinander. Nachteile haben sie vor allem auf Grund ihrer inhärenten Sprödigkeit bei Raumtemperatur. Auswege sollen hier z.B. durch Verstärkung mit Siliziumkarbid-Fasern erreicht werden. Faserverstärkte Titanaluminide erreichen Einsatztemperaturen von bis zu 1200°C. Wie die meisten Verbundwerkstoffe mit metallischer Matrix befinden sich verstärkte Intermetallische Phasen jedoch ebenfalls noch nicht im großtechnischen Einsatz.

Auch die anfangs sehr hohen Erwartungen an die Einsetzbarkeit von Strukturkeramiken bei höchsten Temperaturen sind inzwischen einer gewissen Ernüchterung gewichen. Ein Nachteil der für Hochtemperaturanwendungen eigentlich besonders gut geeigneten Nichtoxidkeramiken ist bis heute ihre für den praktischen Einsatz oft zu geringe Korrosionsstabilität. Außerdem hat sich gezeigt, dass es auch weiterhin großer Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen bedarf, um die spezifischen Nachteile keramischer Werkstoffe insbesondere bei der inhärenten Sprödigkeit und der häufig geringen Thermoschockbeständigkeit zu überwinden. Ein wichtiger und in Teilbereichen wie z.B. Bremsscheiben bereits beschrittener Ausweg ist die Nutzbarmachung von Faserverstärkten Keramiken, für die Einsatztemperaturen von bis zu 1800°C für möglich gehalten werden.

Die mit Abstand höchsten Temperaturfestigkeiten aller bekannten Werkstoffe haben Kohlenstofffaserverstärkte Kohlenstoffe (CFC). Ihre mechanische Festigkeit ist in Faserrichtung besonders hoch und fällt in nicht oxidierender Umgebung auch bei Einsatztemperaturen von über 2000°C nicht ab. CFC dringen damit in Temperaturbereiche vor, in denen andere langfaserverstärkte Keramiken aufgrund von Rekristallisationsprozessen auf Dauer nicht mehr einsetzbar sein werden, selbst wenn alle anderen Probleme bzgl. Herstellung und Anwendbarkeit gelöst sind. Im Gegensatz zu fast allen übrigen Materialien wächst die Festigkeit von CFC mit steigender Temperatur sogar, da bei höheren Temperaturen durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten eine festere Einbindung der Fasern in die Matrix erfolgt. Dadurch steigt allerdings gleichzeitig auch die bei Raumtemperatur nicht vorhandene Sprödigkeit des Materials wieder an.

In einer Reihe von Anwendungsbereichen haben sich CFC heute bereits etabliert. So werden sie inzwischen auch in Werkstückträgern für Fertigungsverfahren bei höchsten Temperaturen eingesetzt. Einer weiteren Verbreitung steht bisher immer noch die mangelhafte Oxidationsbeständigkeit entgegen. Diese führt zur Notwendigkeit aufwändiger Schutzverfahren für Fasern und Matrix, wenn diese in oxidierenden Umgebungen eingesetzt werden sollen. Erst weitere Erfolge auf diesem Gebiet werden es den CFC ermöglichen, die ihnen zugesprochene Schlüsselrolle für viele Höchsttemperaturanwendungen (z.B. im Gasturbinenbau) auch tatsächlich einzunehmen.

Generell gilt, dass auf dem Gebiet der Hochtemperaturfesten Werkstoffe theoretisch durchaus das Potential für weitreichende, entscheidende Fortschritte vorhanden ist. Die Praxis hat jedoch gezeigt, dass sich die Weiterentwicklung eher graduell vollzieht und Verbesserungen in kleinen Schritten erreicht werden. Dies wird auch in der absehbaren Zukunft so bleiben.

November 2004 Jürgen Kohlhoff

Schichtverbunde

Verbundwerkstoffe setzen sich aus verschiedenen Materialien oder Stoffgruppen zusammen, deren gezielte Kombination zu Eigenschaften führt, die mit keiner der Komponenten allein erreichbar wären. Neben den Teilchen- und den Faserverbundwerkstoffen steigt die Bedeutung von Schichtverbunden. Hierbei handelt es sich um Strukturen, die schichtweise aus zwei oder mehreren verschiedenartigen Werkstoffkomponenten aufgebaut sind. Wenn dabei eine Komponente hinsichtlich Gewicht, Volumen oder Dicke überwiegt, wird diese als Grund- oder Substratwerkstoff bzw. als Kern bezeichnet.

Schichtverbunde sind besonders geeignet, maßgeschneiderte Lösungen für vorgegebene Anforderungen zur Verfügung zu stellen. Ihre Eigenschaften sind immer anisotrop, also nicht in allen Raumrichtungen gleich verlaufend. Viele Varianten dienen dem Korrosionsschutz eines Kernmaterials unter Beibehaltung seiner sonstigen Eigenschaften. Weitere wichtige Ziele sind hohe Abrieb- sowie hohe Temperaturfestigkeiten. Aber auch nichttechnische Merkmale wie gutes Aussehen spielen in der Praxis eine große Rolle.

Insgesamt ergibt sich eine große Variationsbreite möglicher Eigenschaften von Schichtverbunden. Neben den verwendeten Werkstoffen selbst spielen dabei auch die Schichtdicken und die Art der Bindung der Schichten untereinander eine große Rolle. Für Letztere sind im Wesentlichen die zugrunde liegenden Verbindungstechniken verantwortlich. Ein Schichtwerkstoff kann während des Herstellungsprozesses fest, flüssig, dampf- bzw. gasförmig oder in Lösung vorliegen. Die jeweils entsprechenden Herstellungsverfahren sind das Walzplattieren, Sprengplattieren, Pressschweißen, Löten oder Kleben, das Schmelztauchen oder Spritzen sowie die physikalischen oder chemischen Abscheideverfahren aus der Gasphase (PVD, CVD). Bei der chemischen und elektrochemischen Abscheidung befindet sich der aufzubringende Schichtwerkstoff während der Herstellung in Lösung.

Eine besonders innovative Variante zur Herstellung von Schichtverbunden ist das Fügen mit keramischen Folien, das sich insbesondere für das stoffschlüssige Verbinden von Keramiken und Metallen eignet. Das Grundprinzip besteht darin, dass zwischen die zu verbindenden Werkstoffpartner, die gleichartig oder unterschiedlich sein können, eine speziell für diese Materialpaarung entwickelte Folie gelegt wird. Diese besteht aus Oxiden, Nitriden, Karbiden oder Silikaten und wird über einen Gießprozess hergestellt. Die eigentliche Fügung erfolgt durch einen speziellen Sinterprozess in einem Ofen mit Druckstempel.

Aufgrund der Vielzahl möglicher Komponenten, Verbindungen und Herstellungsverfahren gibt es eine nahezu unüberschaubare Vielzahl von denkbaren Schichtverbunden. Dies gilt erst recht, wenn auch die oberflächenbeschichteten Werkstoffe einbezogen werden. Interessante neuere Entwicklungen zeigen sich insbesondere bei den Laminaten, den Metall-Metall-Verbunden und bei den so genannten Sandwich-Strukturen.

Laminate bestehen aus Schichten, die mittels organischer Klebstoffe miteinander verbunden sind. Sie kommen für die Isolation von Motoren und Getrieben, in Leiterplatten oder auch für dekorative Zwecke (z.B. Furniere) zur Anwendung. Ein bekanntes Beispiel

ist Sicherheitsglas. Es besteht aus zwei Glasscheiben, die von einem plastischen Kleber (z.B. Polyvinylbutyral) zusammengehalten werden. Der Kleber verhindert, dass sich beim Zerbrechen Glassplitter lösen und die Umgebung gefährden können.

So genanntes Arall (Aramid-Aluminium-Laminat) besteht aus zu Bändern verwobenen Aramidfasern, die mit Kleber imprägniert sind und zwischen Schichten aus Aluminiumlegierungen gestapelt werden. Arall weist eine ungewöhnliche Kombination aus Festigkeit, Steifigkeit, Korrosionsbeständigkeit und geringer Masse auf. Auch seine Bruchfestigkeit ist erhöht, da die Ausbreitung von Rissen durch die Grenzflächen des Schichtaufbaus behindert wird. Eine neuartige Problemlösung zur Dämpfung von Körperschall im Fahrzeug- oder Maschinenbau basiert auf mittels eines viskoelastischen Klebers zusammengefügten Stahlplatten. Als Werkstoffe für die Deckbleche können hier beliebige Stahlsorten ohne oder mit allen lieferbaren Oberflächenveredelungen eingesetzt werden. Eine weitere erwähnenswerte Neuentwicklung in diesem Zusammenhang sind Aluminiumschäume mit walzplattierten Deckblechen aus Stahl oder Aluminium. Diese verbinden die geringe Dichte und die funktionell nutzbaren Eigenschaften der Kernlage aus Aluminiumschaum mit der ausgezeichneten Festigkeit und Steifigkeit der Deckbleche.

Weitere auf der flächigen Verbindung von Metallschichten basierende Schichtverbunde sind die Tailored Blanks, die inzwischen aus dem Automobilbau nicht mehr wegzudenken sind. So genannte Transition Joints ermöglichen heute den Einsatz von Tailored Blanks auch aus nicht direkt miteinander verschweißbaren Werkstoffen wie Stahl und Aluminium.

Sandwich-Strukturen bestehen aus einer Stapelanordnung von zwei dünnen Außenschichten aus einem geeigneten Oberflächenmaterial und einem dazwischen befindlichen leichten Füllstoff (z.B. Polymerschaum). Ein wichtiges Beispiel sind die in Fluggeräten genutzten Wabenstrukturen, die auf der Nutzung von Aluminium basieren. Insgesamt können die Waben hexagonale, quadratische, rechteckige oder sinusförmige Querschnittsformen besitzen. Als Baumaterialien werden Aluminium, Glasfasern, Papier, Polymere und andere Stoffe verwendet. Wenn die Hohlräume der Waben mit Schaum oder Glasfasern ausgefüllt sind, wirken die Verbunde auch schallschluckend und schwingungsdämpfend.

Eine wesentliche Weiterentwicklung der konventionellen Schichtverbunde sind die Gradientenwerkstoffe, bei denen die Übergänge von einem Material zum anderen kontinuierlich verlaufen. Diese Vermeidung von abrupten Materialwechseln führt zur Minimierung von Schwachstellen im Bauteilvolumen. So sollen z.B. in dieser Form vorliegende Keramik-Metall-Verbunde höchsten thermischen und mechanischen Belastungen standhalten können.

Mai 2003 Jürgen Kohlhoff

Strukturkeramiken

Die Werkstoffklasse der Keramiken zählt zum Bereich der nichtmetallisch-anorganischen Materialien. Häufig handelt es sich um chemische Verbindungen von Metallen und Nichtmetallen. Ihr innerer Aufbau (Gefüge) ist polykristallin. Die Herstellung erfolgt über den so genannten Sinterprozess, bei dem die keramischen Ausgangspulver bei ca. 70% ihrer Schmelz- oder Zersetzungstemperatur zu einem dichten Formkörper verbacken.

Aufgrund einer Reihe von interessanten nichtmechanischen, z.B. elektrischen, optischen oder magnetischen Eigenschaften, sind die so genannten Funktionskeramiken für viele Anwendungen bereits unverzichtbar geworden. Darüber hinaus scheinen Keramiken durch die in der Regel günstige Kombination von guten mechanischen, thermischen oder chemischen Eigenschaften auch für Strukturanwendungen gut geeignet zu sein. So verfügen sie im allgemeinen über hohe Härte und Festigkeit, hohen Verschleißwiderstand, niedriges spezifisches Gewicht und gute chemische Beständigkeit auch bei hohen Temperaturen. Allerdings steht dem weit verbreiteten Einsatz von Strukturkeramiken als wesentlicher Nachteil immer noch ihre Sprödigkeit entgegen. Unter Belastung kann es zu einem spontanen Versagen des Materials kommen, da lastabbauende interne Verformungen weitgehend ausgeschlossen sind. Hierin unterscheiden sich die Strukturkeramiken wesentlich von ihren Hauptkonkurrenten, den Metallen und deren Legierungen.

Generell wird zwischen oxidischen und nichtoxidischen Strukturkeramiken unterschieden, die sich durch verschiedene Arten der zugrundeliegenden chemischen Bindung auszeichnen. Zu den wichtigsten Oxidkeramiken zählen Aluminiumoxid und Zirkondioxid. Die wichtigsten Nichtoxidkeramiken sind die Nitride und Carbide von Silizium, Bor und Titan. Die oxidischen Keramiken sind in der Regel unproblematischer in Herstellung und Formgebung, jedoch sind ihre Hochtemperatureigenschaften meist schlechter als die von nichtoxidischen. Oft werden zu den Strukturkeramiken auch keramische Verbundwerkstoffe und so genannte Kohlenstoffkeramiken auf der Basis von reinem Graphit gezählt.

Neben der Art der chemischen Bindung ist das Gefüge eines Werkstoffs ausschlaggebend für seine mechanischen und thermischen Eigenschaften. Bei Keramiken setzt sich das Gefüge aus kristallinen Körnern und einer meist glasartigen Phase zwischen den einzelnen Körnern (Korngrenzphase) sowie ggf. Poren zusammen. Die gravierendste Schwachstelle bei niedrigen Temperaturen sind die Poren, von denen ausgehend ein Bruchversagen erfolgen kann. Bei hohen Temperaturen ist es die glasartige Korngrenzphase, die meist deutlich unterhalb der eigentlichen Versagenstemperatur der Keramik erweicht.

Es gibt heute verschiedene erfolgversprechende Strategien, die Nachteile von Keramiken gegenüber Metallen zu beseitigen. Sehr wichtige Methoden sind die so genannte Dispersionsverstärkung und die Kristallisation der Korngrenzphase. Sinn beider Maßnahmen ist die Erhöhung der Zähigkeit der Keramik bei niedrigen Temperaturen und das Verzögern des Versagens bei sehr hohen Temperaturen. Bei der Dispersionsverstärkung wird ein anderes keramisches Material feinstverteilt in den Basiswerkstoff (die Matrix) eingebracht. So können z.B. nanometerkleine Titancarbid-Partikel in einer Aluminiumoxid-

Matrix oder Siliziumcarbid-Partikel in einer Siliziumnitrid-Matrix dispergiert werden. Diese können sich an den Korngrenzen abscheiden und so bei erweichender Korngrenzphase das Abrutschen der Kristallite aneinander behindern. Den gleichen Effekt hat die Kristallisation der Korngrenzphase. Die Partikel können jedoch auch in den Kristalliten der Matrix ausgeschieden werden und dort lokale mechanische Verspannungen hervorrufen, die ein Risswachstum verzögern.

Ein weiterer wichtiger Ansatz zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften ist die gezielte Einstellung bestimmter Gefügetypen. So kann die Erzeugung einer filzartig verschränkten Struktur aus länglichen Kristalliten erfolgen. Hierfür sind vor allem Siliziumnitrid und -carbid geeignet. Für fast alle keramischen Werkstoffe anwendbar ist die Herstellung eines gleichmäßigen Gefüges aus nanometergroßen Kristalliten. In beiden Fällen erreicht man die Behinderung des Wachstums von Rissen und die Verlängerung des Weges, den diese zur Zerstörung der Keramik zurücklegen müssen.

Darüber hinaus gibt es noch völlig neue Prozesstechniken zur Herstellung von Strukturkeramiken. So stellt man bei der so genannten Polymerpyrolyse nichtoxidische Keramiken durch thermische Spaltung geeigneter Polymere in weitgehender Abwesenheit von Luft her. Hier liegt der Vorteil darin, dass keine Korngrenzphase gebildet wird. Das so genannte Sol-Gel-Verfahren ist eine nasschemische Prozesstechnik, bei der durch Kondensationsreaktionen als Zwischenstufe Gele entstehen. Es eignet sich zur Produktion höchstreiner Ausgangspulver sowie zur direkten Herstellung von Keramiken, die ebenfalls nur minimale Anteile an Korngrenzphasen haben. Ein noch sehr junges Forschungsgebiet ist die Keramisierung von Pflanzen (meist Holzstücke von Bäumen), bei dem man die natürliche Struktur des pflanzlichen Zellgewebes als Abform zur Herstellung keramischer Leichtbaustrukturen nutzt.

Generell gilt, dass Strukturkeramiken zwar in vielen Fällen ein hohes Potenzial zur Erzielung grundlegender Verbesserungen bieten, jedoch in besonderem Maße mit ebenfalls weiterentwickelten etablierten Materialien konkurrieren müssen. Trotzdem konnten sie sich bereits in einigen Anwendungsfällen durchsetzen, wie z.B. für bestimmte Turbolader oder Ventile von PKW-Motoren. In Dreh- und Fräswerkzeugen gehören sie inzwischen zum Stand der Technik. Allerdings kann ihre Neigung zum Sprödbruch zwar vermindert, aber nicht grundsätzlich beseitigt werden. Daher werden ihre Vorteile erst in keramikspezifisch konstruierten Systemen voll zur Geltung kommen, in denen sie nicht einfach vorhandene Bauteile aus anderen Werkstoffen zu ersetzen haben. Außerdem ist ein zunehmender Trend festzustellen, Strukturkeramiken in Verbindung mit Metallen einzusetzen, um so die Vorteile beider Werkstoffklassen zu kombinieren.

Mai 2003 Stefan Reschke

Holzwerkstoffe

Holz ist der älteste Konstruktionswerkstoff der Menschheit. Im Prinzip besteht dieses natürliche Verbundmaterial aus spiralförmig angeordneten Zellulosefasern, die in einer polymeren Matrix aus Lignin eingebettet sind. Aufgrund seiner außerordentlich komplexen Mikro- und Submikrostruktur verfügt Holz über sehr gute strukturelle Eigenschaften. Hervorzuheben ist z.B. seine außergewöhnliche Festigkeit sowie das günstige Verhältnis von Zugfestigkeit zu Dichte, das sogar den Wert vergüteter Stähle übersteigt.

Allerdings sind die mechanischen Eigenschaften massiver Holzbauteile durch eine starke Richtungsabhängigkeit gekennzeichnet. Auch können Unregelmäßigkeiten im Holz die Struktureigenschaften wesentlich verschlechtern. Für viele Anwendungen, die genau berechenbare Werkstoffgüten erfordern, kommt massives Holz aufgrund dieser naturbedingten Nachteile nicht in Betracht. Daher wurden seit Mitte des letzten Jahrhunderts spezielle holzbasierte Werkstoffe entwickelt, die bei Beibehaltung der positiven Eigenschaften von Naturholz den Standardisierungsanforderungen industriell eingesetzter Materialien genügen. Auch hierbei handelt sich im Prinzip um Verbundstrukturen, die jedoch wiederum aus Holzkomponenten mit bestimmten geometrischen Abmessungen bestehen. Durch Zugabe geeigneter Bindemittel wird nach Erwärmung oder Verpressung ein fester und dauerhafter Verbund erzielt. Der Holzanteil liegt typischerweise bei 90-95%.

Inzwischen gibt es ein enormes Spektrum von modernen Holzwerkstoffen, die sich hinsichtlich Festigkeit, Gewicht, Bearbeitungsmöglichkeiten und Feuchtebeständigkeit unterscheiden und die sich auf bestimmte Anwendungen hin maßschneidern lassen. Ihre gleichmäßigen, berechenbaren Eigenschaften machen sie zu unverzichtbaren Materialien im Möbelbau, im Innenausbau, in der Gebäudekonstruktion und im Verpackungsbereich. Aufgrund der industriellen Herstellungsprozesse können diese Werkstoffe in gleichbleibenden Qualitätsstandards produziert werden. Besondere Qualitätsmerkmale sind die geringe Streuung der Materialeigenschaften, die gezielte Einstellung der Materialfestigkeiten sowie die weit über die Möglichkeiten von Naturholz hinausgehende Dimensionierbarkeit.

Darüber hinaus können viele Holzwerkstoffe aus preisgünstigem Holz minderer Qualität und aus Resten der Holzverarbeitung produziert werden. Hieraus und aus der hochrationalisierten Produktion ergeben sich günstige Preis/Leistungs-Verhältnisse. Allerdings haben einige Holzwerkstoffe im Vergleich zu Naturholz durchaus auch Nachteile. Sie reagieren z.B. auf Feuchtigkeit eher noch empfindlicher oder haben gegebenenfalls auch geringere Festigkeiten. Ursache hierfür ist die Zerstörung der evolutionär optimierten Holzstruktur durch den Zerkleinerungsprozess, die durch die anschließende Verklebung und Verdichtung oft nicht vollständig kompensiert werden kann.

Die ältesten Holzwerkstoffe sind die so genannten Lagenhölzer. Ein bekannter Vertreter ist Sperrholz, bei dem dünne Holzfolien mit gekreuzter Faserrichtung zu mehrlagigen Verbunden zusammengefügt werden. Als Bindemittel dienen überwiegend Phenolharze, die unter Druck und Wärme aushärten. Auf gleiche Weise wird auch Furnierholz herge-

stellt. Die sichtbare Deckschicht dieser Verbunde besteht zumeist aus wertvollem Holz, während für die darunter befindlichen Schichten billigere Holzarten Verwendung finden.

Nach wie vor spielt unter den Holzwerkstoffen insbesondere in Deutschland die kunstharzgebundene Spanplatte eine herausragende Rolle. Die genaue Wahl des Bindemittels richtet sich nach den Anforderungen an die Feuchtebeständigkeit. Für spezielle Spanplatten kommen auch anorganische Bindemittel wie Gips und Zement in Betracht. Ein relativ neues Produkt in diesem Bereich ist die OSB-Spanplatte (OSB = Oriented Structural Board). Sie wird aus flächigen, langen Spänen (Strands) hergestellt, die gerichtet in Lagen geordnet sind. Dadurch ist die Platte bei geringem Gewicht besonders biegefest, etwa vergleichbar mit Sperrholz.

Holzfaserplatten werden nach Herstellungsverfahren (nass oder trocken) oder Dichte (hart, hochdicht, mitteldicht oder weich) unterschieden. Der Anwendungsbereich der mitteldichten Faserplatten (MDF), die besonders bearbeitungsfreundlich sind, liegt vornehmlich im Möbelbau. Große Wachstumsraten gibt es derzeit bei den dünnen mitteldichten und hochdichten Faserplatten als Trägermaterial für Laminat-Fußbodenbeläge. Poröse Faserplatten werden auf Grund ihrer guten Dämmeigenschaften insbesondere zur Luft- und Trittschalldämmung im Baubereich eingesetzt.

Eine gewisse Verwandtschaft zu den Lagenhölzer hat eine neuartige Gruppe von Holzwerkstoffen, die als „Engineered Wood“ bezeichnet wird. Ihr herausragendes Merkmal ist die gezielte Herstellung einer auf bestimmte Anwendungen zugeschnittenen Struktur. So verfügt das Furnierschichtholz (LVL = Laminated Veneer Lumber) ebenso wie das Furnierstreifenholz (PSL = Parallel Strand Lumber) über Festigkeitseigenschaften, die deutlich höher sind als bei Massivholz. Das so genannte Spanstreifenholz (LSL = Laminated Strand Lumber) weist eine mit der OSB vergleichbare Struktur auf. Generell gilt, dass diese Werkstoffe dem Basismaterial Holz neue Anwendungen erschließen. So können sie Metall- und Stahlbetonkonstruktionen zweckmäßig ergänzen bzw. sogar substituieren. Neben dem Einsatz als Stützen oder Ständern lassen sich mit Trägern aus diesen Werkstoffen auch große Spannweiten überbrücken.

Im Bereich der Holzwerkstoffe spielen die Bindemittel sowohl im Herstellungsprozess als auch bezüglich der Eigenschaften eine wichtige Rolle. Inzwischen gibt es ein großes Spektrum an Klebstoffen, die praktisch allen Anforderungen an Feuchtebeständigkeit gerecht werden. Am häufigsten eingesetzt werden Bindemittel auf Harnstoff-, Phenol- oder Melaminbasis. Aus ökologischer Sicht ist es gelungen, die anfänglichen Probleme hinsichtlich der nachträglichen Abgabe des eingebundenen Formaldehyds zu lösen. Auch die stoffliche Verwertung der Abfälle bei der Produktion sowie die Rezyklierung gebrauchter Span- und Faserplatten bzw. damit hergestellter Möbel und Bauteile ist inzwischen Stand der Technik.

August 2002 Thomas Kretschmer

Faserverstärkte Kunststoffe

Bei den Faserverstärkten Kunststoffen handelt es sich um die mit Abstand am weitesten verbreitete Materialgruppe aus dem Bereich der Verbundwerkstoffe. Besonderes Interesse finden sie für Strukturanwendungen im Leichtbau, da sie hohe Festigkeiten mit niedrigen spezifischen Gewichten verbinden. Weitere Vorteile sind je nach Typ hervorragende Steifigkeiten, gute Dämpfungswerte, relativ hohe chemische Resistenzen, geringe Wärmedehnungen sowie hohe Ermüdungsfestigkeiten. Durch Kombination verschiedener Matrix- und Fasermaterialien sowie unterschiedlicher Volumenanteile, Längen und Anordnungen der Fasern sind dabei die verschiedensten Eigenschaftskombinationen gezielt einstellbar.

Zur Verstärkung werden hauptsächlich Glas- und Kohlenstofffasern eingesetzt. Die ebenfalls verwendeten Aramidfasern eignen sich dagegen weniger für reine Strukturanwendungen, da sie nur begrenzt temperaturbeständig sind, hygroskopisches Verhalten zeigen und unter UV-Strahlung altern. Ihr Einsatz beschränkt sich daher im wesentlichen auf Sonderbereiche, z.B. beim ballistischen Körperschutz.

Die weiteste Verbreitung finden heute die mit Glasfasern verstärkten Kunststoffe. Glasfasern sind relativ preiswert und können darüber hinaus durch spezielle Zuschlagstoffe in der Herstellung an bestimmte Anwendungsprofile angepaßt werden. Je nach Aufwand kann sich ihr Preisvorteil dabei aber auch wieder relativieren.

Kohlenstofffasern bieten die von den mechanischen Eigenschaften her besten Voraussetzungen für den Leichtbau, da sie bei relativ niedrigem spezifischen Gewicht besonders hohe Zugfestigkeiten aufweisen. Aufgrund der im Vergleich zu einfachen Glasfasern um einen Faktor 10 höheren Kosten werden sie allerdings hauptsächlich in Hochpreis-Bereichen eingesetzt, also insbesondere in der Luft- und Raumfahrt. So bilden Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) etwa 40% der Strukturmasse und 70% der Oberfläche des „Eurofighter". Die Verwendung von C-Fasern für den Luftfahrtbereich wird dominiert durch Faserbündel aus bis zu 12.000 Einzelfasern (Filamenten), die sich z.B. für die Gewebeherstellung besonders eignen.

Besondere Anstrengungen gelten der Entwicklung kostengünstigerer Kohlenstofffasern für die Bereiche Automobil und Sport, wo für die nächsten Jahre eine deutliche Steigerung des CFK-Anteils vorausgesagt wird. Dabei spielen vor allem so genannte Faser-Tows eine Rolle, die bereits heute aus bis zu 320.000 Einzelfilamenten bestehen können und unter Inkaufnahme etwas schlechterer Eigenschaften zu deutlichen Reduzierungen des Herstellungspreises beitragen. Neben der Verringerung der Kosten ist auch die Lösung der bisher bestehenden Probleme hinsichtlich der Feuchtigkeitsaufnahme sowie der unzureichenden Schlag- und Risszähigkeit eine Voraussetzung für die weitere Verbreitung von CFK. Wesentliche Fortschritte erwartet man dabei z.B. von der Optimierung der Eigenschaften der Grenzflächen zwischen Faser und Matrix.

Als Matrixmaterialien in Faserverstärkten Kunststoffen werden sowohl Duroplaste als auch Thermoplaste eingesetzt. Je nach System beeinflussen diese charakteristisch die Eigenschaften des Werkstoffes und bedingen vor allem die nutzbare Verarbeitungstech-

nik. Eine wesentliche Entwicklung bei der Herstellung faserverstärkter Duroplaste ist die zunehmende Nutzung so genannter Nasstechnologien, bei denen textile Faserhalbzeuge mit dem Matrixmaterial getränkt werden (Harzinfusionstechniken). Derzeitiger Anwendungsschwerpunkt dieses Verfahrens ist die Fertigung hochbelasteter Bauteile für den Luftfahrtbereich. Es ist jedoch auch für die Fertigung komplexer Strukturbauteile für Landfahrzeuge geeignet. Besondere Vorteile sind die relative Wirtschaftlichkeit sowie die Möglichkeit zur gezielten Anordnung der Fasern auch in der dritten Dimension durch Nutzung konventioneller Textiltechniken. Forschungsanstrengungen zielen insbesondere auf die Entwicklung von weiter optimierten duroplastisch aushärtenden Infusionsharzen und von Hybridharzen mit thermoplastischen Anteilen. In der Entwicklung befinden sich darüber hinaus Matrixsysteme aus Flüssigkristallpolymeren mit selbstverstärkenden Eigenschaften.

Faserverstärkte Kunststoffe auf Thermoplastbasis sind bei Erwärmung über die Schmelztemperatur hinaus auch mehrmalig umformbar und können verschweißt werden. Nachteilig für ihre Verarbeitung ist allerdings die hohe Viskosität thermoplastischer Systeme, die eine homogene Imprägnierung der Fasern erschwert. Daher wird bei konventionellen Thermoplasten die Imprägnierung des Verstärkungsmaterials von der eigentlichen Formgebung getrennt. Dies geschieht durch die Verwendung vorimprägnierter Halbzeuge (Prepregtechnologie). Nicht zuletzt wegen der daraus resultierenden hohen Kosten konnten sich faserverstärkte Thermoplaste trotz ihrer im Vergleich zu Duroplasten vorteilhaften Eigenschaften z.B. bei der Zähigkeit bisher nicht im ursprünglich erwarteten Maße durchsetzen. Eine Ausnahme sind die glasmattenverstärkten Thermoplaste, die im Automobilbereich eine breite Anwendung gefunden haben. Die Bemühungen richten sich daher insbesondere auf die Entwicklung neuer Thermoplaste, die sich für die Verarbeitung und Anwendung noch gezielter maßschneidern lassen. Dabei spielt z.B. die Nutzung so genannter Metallocenkatalysatoren eine Rolle. Trotz der hier zu erwartenden Erfolge wird der Markt für faserverstärkte Polymere jedoch auch in Zukunft zu 80 - 90% durch Duroplaste bestimmt sein.

Die wichtigsten übergeordneten Entwicklungsbemühungen bei den Faserverstärkten Kunststoffen gelten sowohl der Senkung der Herstellungskosten als auch geeigneten Recyclingverfahren. Die Kostensenkung wird durch eine zunehmende Automatisierung der bisher immer noch stark von manuellen Abläufen geprägten Verfahren und durch eine Verringerung der bei der Herstellung nötigen Prozessschritte angestrebt. Bei den Recyclingverfahren steht man, abgesehen von den im Automobilbau bereits eingeführten Systemen, noch am Anfang. Trotz aller Anstrengungen wird es hier jedoch auch in Zukunft Nachteile gegenüber den in vielen Anwendungsbereichen konkurrierenden Metallen geben, da das Recycling von Faserverbundkunststoffen in der Regel sortenreine Fraktionen voraussetzt, die vielfach nur durch eine manuelle Zerlegung zu erreichen sind.

Juni 2002 Jürgen Kohlhoff

Flüssigkristalline Werkstoffe

Flüssigkristalline Stoffe sind organische Verbindungen, die keinen direkten Phasenübergang zwischen kristallinem und flüssigem Aggregatzustand aufweisen. In einem spezifischen Temperaturintervall verhalten sie sich einerseits wie gewöhnliche Flüssigkeiten, indem sie in jede beliebige Form fließen. Andererseits zeigen sie richtungsabhängige Eigenschaften wie bestimmte Festkörper. Dieser bereits vor über 100 Jahren entdeckte Zwischenzustand von Materie wird als Mesophase bezeichnet. Seine Untersuchung war lange Zeit ausschließlich von akademischem Interesse. Erst seit ungefähr 30 Jahren gibt es erfolgreiche Bemühungen, seine außergewöhnlichen optischen, elektrischen oder mechanischen Eigenschaften in technischen Systemen gezielt zu nutzen.

Je nach Anordnung der Moleküle werden verschiedene Arten von Mesophasen unterschieden. Die größte Ähnlichkeit mit gewöhnlichen Flüssigkeiten haben die so genannten nematischen Flüssigkristalle, die über eine niedrige Viskosität und sehr gute Fließeigenschaften verfügen. Die Anordnung der Moleküle ist eindimensional mit weitgehend parallel orientierten Längsachsen. Bei den so genannten smektischen Flüssigkristallen sind die Moleküle ebenfalls parallel zueinander geordnet. Sie fügen sich jedoch zusätzlich zu Schichten zusammen und haben damit einen noch höheren Ordnungsgrad. Im Gegensatz zu isotropen Flüssigkeiten tritt hier kein Fließen im eigentlichen Sinne auf, sondern eine Molekülebene gleitet über die andere hinweg.

Die komplizierteste Struktur haben die so genannten cholesterischen Flüssigkristalle, deren Name sich vom Cholesterin ableitet. Auch hier sind die Moleküle in Schichten angeordnet. Allerdings liegen ihre Längsachsen in der Schichtebene, und ihre Vorzugsrichtung verschiebt sich von Schicht zu Schicht um einen bestimmten Betrag. Diese Spiralstruktur führt zu speziellen optischen Eigenschaften. Cholesterische Phasen lagen einer der ersten kommerziellen Anwendungen von Flüssigkristallen in Thermometern zugrunde. Eine Erhöhung der Außentemperatur führt hier zu einer Verringerung des Ordnungsgrades und damit zu einer Änderung der reflektierten Farben (thermochromer Effekt).

Zu den bekanntesten Anwendungen flüssigkristalliner Werkstoffe gehört heute der Bereich der so genannten selbstverstärkenden Strukturpolymere. Diese bewahren im geschmolzenen Zustand zunächst eine kristalline Ordnung in Form von Bereichen mit parallel liegenden Molekülketten bei. Wird eine solche Schmelze zum Fließen angeregt, so orientieren sich die Ketten in Fließrichtung. Nach dem Abkühlen bleibt eine eine sehr ausgeprägte Orientierung der Moleküle zurück und führt zu einer hohen Festigkeit in dieser Richtung. Die wichtigsten Vertreter dieser Stoffklasse sind aromatische Polyester und aromatische Polyamide (Aramide, z.B. Kevlar der Fa. DuPont). Diese Hochleistungskunststoffe werden, in vielen Fällen zusätzlich glas- oder kohlenstofffaserverstärkt, vor allem in der Luft- und Raumfahrt sowie im Kraftfahrzeug- und Apparatebau für thermisch oder chemisch hochbeanspruchte Teile verwendet. Dazu kommt der Einsatz für Bauteile in der Mikro- und Optoelektronik.

Von besonderer Bedeutung für die direkte technische Verwertung des flüssigkristallinen Zustandes selbst sind die Anisotropien im optischen und elektrischen Verhalten. Diese ermöglichen die Anwendung in Flüssigkristallanzeigen bzw. Liquid-Crystal-Displays (LCDs), wo sie sowohl in den konventionellen alphanumerischen als auch zunehmend in großflächigen Matrixanordnungen eingesetzt werden. Ihre wichtigsten Vorteile gegenüber herkömmlichen Kathodenstrahlröhren liegen in der platzsparenden, flachen Form und in ihrem besonders niedrigen Stromverbrauch. Ihr wesentlicher Nachteil sind die immer noch deutlich höheren Kosten, wobei der zunehmende Masseneinsatz hier allerdings bereits zu spürbaren Verbesserungen führt.

Die gebräuchlichen LCDs basieren auf Materialien mit einem breiten nematischen Phasenbereich. Ihre Funktion beruht im wesentlichen auf der Fähigkeit des Flüssigkristalls zur Doppelbrechung bzw. zur Beeinflussung der Polarisationsebene elektromagnetischer Strahlung. Diese kann durch das Anlegen äußerer Felder gesteuert werden und führt im Zusammenwirken mit geeigneten Polarisatoren schließlich zur selektiven Manipulierbarkeit des einfallenden Lichtes. Vielfältige Weiterentwicklungen, z.B. bezüglich vergrößerter Ablesewinkel, haben dazu geführt, daß sich LCDs für die Wiedergabe von Daten und unbewegten Bildern in letzter Zeit immer mehr durchsetzen konnten.

Außerdem gibt es vielfältige Neuentwicklungen bei den flüssigkristallinen Werkstoffen selbst. Insgesamt sind heute schon einige zehntausend verschiedene Varianten bekannt. In der Zukunft wird diese Zahl weiter wachsen. Neben langgestreckten, stäbchenartigen Moleküle werden zunehmend auch andere Konturen, z.B. in T- oder U-Form, einer technischen Anwendung zugeführt. Von besonderer Bedeutung für die Verbreitung der im Labor hergestellten Typen ist die Entwicklung neuer Methoden zur großtechnischen Produktion.

Gerade im Hinblick auf ihre Anwendung in LCDs müssen flüssigkristalline Stoffe nicht nur geeignete Arbeitstemperaturen sowie optische, elektrische und magnetische Anisotropien aufweisen, sondern auch über günstige elastische Konstanten und Rotationsviskositäten verfügen. Letztere haben eine wesentliche Bedeutung für Schaltgeschwindigkeit und Kontrast der Anzeige. In herkömmlichen LCDs beruht der elektrooptische Effekt auf der Umorientierung der Moleküle durch ein induziertes Dipolmoment, das die elastischen (Rückstell-) Kräfte im Flüssigkristall überwinden muß. Bestimmte smektische Mesophasen besitzen nun ein ausgeprägtes permanentes makroskopisches Dipolmoment. Diese so genannten ferroelektrischen Flüssigkristalle haben besonders hohe Schaltgeschwindigkeiten. Außerdem bleiben die mit einem kurzen Spannungsstoß eingestellten Zustände auch ohne weitere Aufrechterhaltung der Spannung für längere Zeit stabil. Über die Displaytechnik hinaus bieten sich derartige ferroelektrische Systeme für Speicher in optischen Computern und als optoelektronische Modulatoren in der Lasertechnik sowie der optischen Informationsverarbeitung an.

Januar 2002 Jürgen Kohlhoff

Stähle

Metallische Legierungen werden als Stähle bezeichnet, wenn sie als Hauptbestandteil Eisen und gleichzeitig weniger als ca. 2% Kohlenstoff enthalten. Ihre Gefüge und damit ihre Eigenschaften hängen sowohl von der stofflichen Zusammensetzung als auch von bestimmten physikalischen Nachbehandlungsverfahren ab, hier insbesondere von Wärmebehandlungen oder Umformungen. So kann die Zulegierung von Chrom und Nickel zu einer ausgeprägten Oxidationsbeständigkeit führen, während eine geeignete Wärmezufuhr die Festigkeit erhöht. Insgesamt gibt es rund 2000 verschiedene genormte Stahlsorten, von denen die meisten erst wenige Jahre alt sind. Mengenmäßig liegt die Erzeugung von Stählen etwa zwanzig mal so hoch wie die Produktion aller Nichteisenmetalle zusammen. Ihre wichtigsten Anwendungen finden sich im Maschinenbau, in der Bauwirtschaft sowie im Fahrzeugbau. Hier werden sie auch in Zukunft trotz teilweise spektakulärer Konkurrenz eine herausgehobene Rolle spielen.

Die wesentlichen Ursachen dafür sind die Beherrschung großtechnischer Fertigungsverfahren in gleichbleibender und prüfbarer Qualität, die hohe Verfügbarkeit der Rohstoffe sowie die gute Rückführbarkeit gebrauchter Produkte in den Herstellungsprozess. Ein weiterer wichtiger Grund ist das weite Spektrum einstellbarer Eigenschaften von Stählen. So können sie bei herausragenden Festigkeitswerten gleichzeitig warm- oder kaltumformbar, schweißgeeignet, spanabhebend bearbeitbar, verschleißfest sowie korrosions- und/oder hitzebeständig sein.

Alle Bemühungen zur Weiterentwicklung im Stahlbereich basieren auf dem immer genauer werdenden Wissen um die Zusammenhänge zwischen messbaren Eigenschaften und der inneren Zusammensetzung bzw. dem Gefüge, welches sich darüber hinaus mit immer ausgeklügelteren Fertigungsverfahren immer gezielter einstellen lässt. Fortschritte sind sowohl durch neue bzw. modifizierte Herstellungsverfahren als auch durch Einführung neuer stofflicher Zusammensetzungen, verbesserter Halbzeuge und Vormaterialien sowie innovativer Füge- und Umformtechnologien zu erwarten.

Als wichtige Innovation im Bereich der Herstellungsverfahren von Stählen gibt es als Weiterentwicklung des Stranggießens einen Trend zum kontinuierlichen Gießen endabmessungsnaher Formate, wie von dünnen Bändern und Profilen. Heute können bereits vieleckige Querschnitte gegossen werden. Im Forschungsstadium befindet sich das Drahtgießen. Darüber hinaus ist bei der Stahlproduktion eine generelle Entwicklung zur weitergehenden Automatisierung und zu einer immer ausgeklügelteren Prozesssteuerung festzustellen. Dies geschieht im Hinblick auf Rationalisierung und damit Wirtschaftlichkeit, aber auch auf eine verbesserte Reproduzierbarkeit der hergestellten Werkstoffe.

Eine interessante Entwicklung im Bereich der Zusammensetzung von Stahl ist der gezielte Einsatz von Phosphor zur Festigkeitssteigerung. Dies wäre noch vor einiger Zeit aufgrund der normalerweise versprödenden Wirkung des Phosphors undenkbar gewesen. Stand der Technik ist außerdem die Fertigung so genannter mikrolegierter Stähle mit hoher Festigkeit bei gleichzeitig optimaler Duktilität. Hierbei werden dem Werkstoff Elemente bis hin zu kleinsten Gehalten von unter 0,4 Massenprozent gezielt zugesetzt. Eine große

Zukunft wird auch den Mehrphasenstählen eingeräumt. Bei diesen werden durch die geschickte Mischung von unterschiedlich harten Phasen hohe Festigkeiten in Verbindung mit guter Umformbarkeit erreicht, also auf den jeweiligen Anwendungsfall hin maßgeschneiderte Festigkeits/Duktilitäts-Kombinationen. Derzeit eingeführte, so genannte Dual-Phase-Stähle haben eine Kombination von zwei Phasen. Neue Konzepte sehen die gezielte Verteilung von drei und mehr Phasen vor.

Als wesentliche Entwicklung im Bereich der Halbzeuge ist die zunehmende Nutzung hybrider Werkstoffe zu nennen, die aus verschiedenen Stählen oder aus Stählen mit anderen Werkstoffarten zusammengesetzt sind. Dazu gehören die so genannten Tailored blanks, eine aus dem Fahrzeugbau nicht mehr wegzudenkenden Klasse von Blechen mit auf den Einsatzzweck hin maßgeschneiderten Eigenschaften. Darüber hinaus gibt es eine Reihe von Stählen, bei denen sich bestimmte Nutzeigenschaften erst bei der ohnehin notwendigen Weiterverarbeitung, z.B. durch Wärmeeinwirkung, einstellen. Herausragendes Beispiel sind hier die Bake-hardening-Stähle, bei denen die notwendige Härtung und damit die Verbesserung bestimmter Eigenschaften erst während des Einbrennens z.B. von Autolacken erfolgt.

Von besonderer Bedeutung im Stahlbereich ist die Weiterentwicklung der Umform- und Fügeprozesse. Ein hier relativ neues Verfahren ist das superplastische Formen, das z.B. für die Bearbeitung einer neuen Klasse von hoch aluminiumhaltigen Leichtbaustählen geeignet scheint. Vielversprechend ist auch das so genannte Innen-Hochdruck-Formen, eine noch junge Technologie zur Herstellung komplexer Bauteile mit großem Potential speziell für den Automobil-Leichtbau. Im Bereich der Fügeverfahren ist ein zunehmender Einsatz lasergestützter Prozesstechniken festzustellen, z.B. im Bereich des Fügens von Tailored Blanks. Daneben gewinnt das Kleben weiter an Bedeutung, insbesondere zur Verarbeitung oberflächenveredelter Halbzeuge und im Bereich der Hybridwerkstoffe für den Fahrzeugbau. Aber auch mechanische Fügeverfahren haben ein hohes Innovationspotential im Bereich der Stahlblechverarbeitung.

Insgesamt kann man sagen, dass Stähle sich auch weiterhin durch ein im Vergleich zu konkurrierenden Werkstoffen besonders günstiges Preis/Leistungs-Verhältnis und eine hohe Umweltfreundlichkeit auszeichnen werden. Daher hat auch die seit einigen Jahren verstärkt aufgetretene Konkurrenz z.B. durch Aluminium, Magnesium oder faserverstärkte Kunststoffe im Leichtbau die Weiterentwicklung im Stahlbereich nicht behindert, sondern im Gegenteil zu neuen Impulsen geführt.

November 2001 Jürgen Kohlhoff

Diamanttechnologie

Aufgrund einer Vielzahl herausragender Eigenschaften zählen die als Diamant bezeichneten Modifikationen des Kohlenstoffs schon seit langem zu den technologisch interessantesten Werkstoffgruppen. Hierbei handelt es sich um Kristallgitter, bei dem jedes Atom tetraedrisch von vier Nachbaratomen umgeben ist. Auf diesen Idealtyp einer kovalenten chemischen Bindung sind u.a. die extreme Härte und die hohe chemische Beständigkeit des Materials zurückzuführen. Gleichzeitig ist es optisch transparent, hat hervorragende Halbleitereigenschaften sowie verfügt über eine geringe Kompressibiliät und eine hohe Wärmeleitfähigkeit.

Insbesondere auf Grund seiner einzigartigen mechanischen und thermischen Vorzüge hat sich Diamant seit vielen Jahren als hochwertiger Industriewerkstoff fest etabliert. Hauptanwendungsgebiet ist bis heute die Werkzeugtechnik. Hier wird Diamant als in Bindungsmaterial gebundene Körnung zum Schleifen und Sägen ebenso verwendet wie als Schneideinsatz zum Drehen, Fräsen und Bohren oder in Pulverform für Lösungen und Emulsionen zum Läppen und Polieren. Auch in der Chipherstellung sind Diamanttrennscheiben zum Schneiden und Zerteilen der Waferplatten unverzichtbar.

Auf natürlichem Wege werden Diamanten bei sehr hohen Temperaturen und Drücken, wie sie im Inneren von Vulkanschloten herrschen, gebildet. Vor ca. fünfzig Jahren gelang es erstmals, synthetische Diamantstrukturen unter ähnlichen Umgebungsbedingungen im Labor zu erzeugen. Inzwischen wird das klassische Herstellungsverfahren von Industriediamanten, das auf der Umwandlung von Graphit bei hohen Temperaturen und Drücken (typischerweise über 1500° C und 60 000 bar) beruht, gut beherrscht und verstanden.

Immer größere Bedeutung gewinnt die direkte Beschichtung von Oberflächen mit Diamantfilmen. Während durch die klassischen Hochdruckverfahren die Herstellung von Diamanten nur in Form von feinem bis grobkörnigem Pulver möglich ist, können durch chemische Abscheidung aus der Gasphase bei niedrigen Drücken mehr als 1 mm dicke Diamantschichten in bisher unzugänglichen Formen verschiedenster Geometrien oder sogar als freitragende Struktur hergestellt werden. Bei dieser so genannten CVD (Chemical Vapour Deposition)-Technologie wird Kohlenstoff aus kohlenstoffhaltigen gasförmigen Verbindungen wie Methan oder Acetylen unter Mitwirkung von atomarem Wasserstoff abgeschieden und wächst bei Temperaturen von > 700° C auf geeigneten Unterlagen zu polykristallinen Diamantschichten auf.

Eine Reihe von CVD-diamantbeschichteten Produkten ist bereits auf dem Markt. Hierzu zählen z.B. Lautsprechermembranen, Fräs- und Schneidwerkzeuge sowie Kugellager. Für optische Anwendungen bietet sich Diamant wegen seiner hohen Transparenz über einen sehr weiten Wellenlängenbereich an. Auch für Infrarot- und Röntgendetektoren kommt der Werkstoff als Fenstermaterial in Betracht.

Die derzeitigen Bemühungen um die Weiterentwicklung der CVD-Diamanttechnologie konzentrieren sich insbesondere auf eine weitere Verbesserung des theoretischen Verständnisses sowie auf die Erhöhung der Abscheideraten und die Senkung der Prozess-

temperaturen. Dazu wird weltweit mit verschiedenen Ausgangsmaterialien und Aufdampfverfahren experimentiert. Eine weitere vielversprechende Variante ist die so genannte DLC (Diamond-like Carbon)-Technologie, mit der es möglich wird, relativ kostengünstig sehr dünne amorphe, diamantähnliche Kohlenstoffschichten auf unterschiedlichsten Substratmaterialien zu produzieren. Sie bietet vielversprechende Optionen insbesondere für tribologische und elektronische Anwendungen.

Langfristig werden vor allem die elektronischen Eigenschaften von Diamanten bestimmend für ihren Einsatz in neuen und besonders anspruchsvollen technischen Anwendungsgebieten sein. Aufgrund ihrer gleichzeitig vorhandenen chemischen Resistenz in Kombination mit der hohen Wärmeleitfähigkeit sind sie ein interessantes Basismaterial für elektronische, sensorische und mikrosystemtechnische Komponenten, die auch in agressiven Medien bei weit höheren Betriebstemperaturen eingesetzt werden können als Bauelemente in Siliziumtechnologie.

So hat Diamant im Vergleich zu anderen Halbleitermaterialien wie Silizium, Galliumarsenid oder Indiumphosphid den weitaus größten Bandabstand, also die größte Energielücke zwischen dem Valenz- und Leitungsband. Diese Eigenschaft lässt langfristig integrierte Schaltkreise auf der Basis monokristalliner Diamantschichten mit einer Temperaturresistenz bis über 700° C (Silizium bis ca. 200° C) bei höchster Strahlungsfestigkeit und Durchbruchspannung als möglich erscheinen. Daneben besitzt dotiertes Diamantmaterial eine sehr gute Elektronen- und (im Gegensatz zum Galliumarsenid) auch eine sehr gute Löcherbeweglichkeit, während reiner Diamant eine sehr gute Isolationsfestigkeit hat. Zusammen mit der herausragenden Wärmeleitfähigkeit werden damit schnelle, hochintegrierte Schaltungen bis zu höchsten Frequenzen möglich.

Obwohl die prinzipielle Realisierbarkeit einer Vielzahl passiver und aktiver elektronischer Bauelemente in Diamanttechnologie zumindestens im Labor bereits demonstriert werden konnte, gibt es im Hinblick auf eine breite Nutzung dieser Technologie derzeit noch viele ungelöste Probleme. Hierzu gehört z.B. die Produktion monokristalliner CVD-Diamantfilme in für mikroelektronische Anwendungen ausreichender Größe und Reinheit auf einfach herstellbaren Substratmaterialien. Auch das zukünftige mikroelektronische Potential der noch im Forschungsstadium befindlichen amorphen DLC-Technologie als einer möglichen Alternative zu monolithischen Diamantstrukturen ist derzeit nur schwer einzuschätzen.

September 2001 Thomas Kretschmer

Metallische Gläser

Zu den wesentlichen Merkmalen metallischer Werkstoffe gehört normalerweise ihre kristalline Struktur. Allerdings lässt sich durch die Anwendung bestimmter Verfahren die Kristallisation bei der Herstellung verhindern bzw. die Kristallstruktur nachträglich so verändern, dass auch reine Metalle oder metallische Legierungen in nichtkristalliner, d.h. amorpher Form vorliegen können. Diese vor fast fünfzig Jahren entdeckte neue Werkstoffklasse wird als Metallische Gläser oder Amorphe Metalle bezeichnet. Ihre weitgehend ungeordnete Struktur führt zu interessanten neuen oder veränderten mechanischen, magnetischen, elektrischen und anderen Eigenschaften, die in den entsprechenden kristallinen Werkstoffmodifikationen nicht zu beobachten sind.

Die technisch am häufigsten angewandten Verfahren zur Herstellung Metallischer Gläser basieren auf der schnellen Abkühlung von Schmelzen, d.h. der amorphe Zustand der Flüssigkeit wird praktisch eingefroren. Hierfür eignet sich insbesondere eine Vielzahl zwei- und mehrkomponentiger Stoffsysteme. In Betracht kommen u.a. Metall-Halbleiter-Legierungen (z.B. Fe-P-C), Übergangsmetall-Legierungen (z.B. Ni-Nb) oder Legierungen zwischen Hauptgruppenmetallen (z.B. Ca-Al). Generell gelten zwei Faustregeln. Je schneller der Abschreckvorgang ist, um so breiter wird der Mischbereich bei gegebener Komponentenzahl, und je mehr unterschiedliche Komponenten die Schmelze enthält, um so unkomplizierter läßt sie sich in einen nichtkristallinen Festkörper unterkühlen. So wird beispielsweise beim etablierten Schmelzspinnverfahren die metallische Schmelze auf ein schnell rotierendes gekühltes Rad gegossen und so mit einer Kühlgeschwindigkeit von einigen Millionen Grad pro Sekunde als dünnes Endlosband in den festen Zustand abgeschreckt. Mit diesem Verfahren werden weltweit derzeit über 30.000 t pro Jahr produziert. Das Unterkühlen von Metallschmelzen kann auch durch Einspritzen in einen Wasserstrahl zur Herstellung von Drähten oder über konventionelle Gießverfahren in Volumenformen erfolgen. Letzteres wurde erst vor ca. fünf Jahren durch die Entdeckung von Legierungen möglich, die aus vier oder mehr Komponenten mit stark unterschiedlichen Ionenradien bestehen.

Neben der Schnellabkühlung von Schmelzen gibt es noch eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten zur Herstellung Metallischer Gläser. Etablierte physikalische Verfahren sind das Verdampfen (Vapor Deposition) oder das Zerstäuben (Sputtering) im Vakuum und die anschließende Kondensation auf gekühlten Substrat. Auch die strukturzerstörende Bestrahlung mit Ionen oder Elektronen sowie das mechanische Legieren wird genutzt. Zu den chemischen Methoden zählen die Ausfällung aus Lösung sowie die elektrolytische bzw. elektrochemische Abscheidung. Auch die direkte Ausbildung des amorphen Zustandes im Festkörper durch geeignete Reaktionen ist möglich.

Aus kommerzieller Sicht hat die Nutzung der magnetischen Eigenschaften der Amorphen Metalle bisher die größte Bedeutung erlangt. Am weitesten verbreitet sind hier die weichmagnetischen Metallischen Gläser, die sich durch hohe Permeabilität und Koerzitivität auszeichnen. Sie sind als sehr verlustarme Transformatorkerne in der Energietechnik genauso etabliert wie in der Kommunikations- und Sensortechnik, wo sie z.B. in der ISDN-Technik derzeit unersetzlich sind. Eine weitere Anwendung sind Sicherungsetiket-

ten, wie man sie auf einer Vielzahl von Artikeln und Produkten im Handel findet. In der Entwicklung befinden sich Sensoren und Aktoren, die auf bestimmten magnetoelektronischen Effekten basieren. In Kombination mit ihrer hohen Flexibilität werden weichmagnetische Metallische Gläser zunehmend auch zur Abschirmung elektrischer Geräte eingesetzt. In der einzigen Nutzung hartmagnetischer Eigenschaften werden aus einer Eisen-Neodym-Bor-Legierung Permanentmagnete hergestellt.

Derzeit noch relativ wenige marktfähige Produkte basieren auf der Nutzung der hervorragenden elastomechanischen Eigenschaften der Metallischen Gläser. Ein Beispiel sind Golfschläger, deren Inlays aus vielkomponentigen amorphen Legierungen bestehen. Ausschlaggebend für diese Anwendung sind die hohe spezifische Festigkeit sowie das vergleichsweise hohe Verhältnis von Versagensspannung zu elastischem Modul. Ebenfalls auf dem Markt befinden sich Kurzfasern aus metallischen Gläsern, die als Verstärkung und zur Verbesserung von deren Biegeduktilität in Schwerbetone eingebracht werden.

Bereits etabliert ist die Anwendung von Metallischen Gläsern als Hartlöt-Folien, deren großer Vorteil die Duktilität und Anpassbarkeit an die zu verbindenden Werkstücke ist. Sie bieten erhebliche Handhabungsvorteile gegenüber herkömmlichen Lötpasten. Über das Einlegieren von Nitrid-, Carbid- oder Silicidbildnern in diese Gläser lassen sich über das Hartlöten zugleich eine oder mehrere neue eigenschaftsverbessernde Phasen in der empfindlichen Nahtstelle herstellen.

Ein interessantes Nutzungspotential Metallischer Gläser bietet die hohe Korrosionsfestigkeit einiger Legierungen mit hohem Chrom- oder Phosphoranteil. Im Gegensatz hierzu scheint die technische Umsetzung der prinzipiell nachgewiesen Eignung bestimmter amorpher metallischer Legierungen für Katalyseprozesse fraglich zu sein. Hier liegt das Hauptproblem bei der nicht zu verhindernden Kristallisation der amorphen Oberflächen während des Betriebes. Das Kristallisationsverhalten der Metallischen Gläser macht diese jedoch als Vorstufe zur Herstellung nanokristalliner Gefügestrukturen mit verbesserten thermischen und mechanischen Eigenschaften interessant. In diesem Bereich gibt es derzeit große Forschungsanstrengungen.

September 2001 Stefan Reschke

Keramik-Matrix-Verbundwerkstoffe

Die wesentlichen Schwächen unverstärkter Strukturkeramiken liegen in ihrer mangelhaften Zuverlässigkeit unter mechanischer Beanspruchung. Dazu kommt die im Herstellungsprozeß nur schwer erreichbare Reproduzierbarkeit ihrer technischen Eigenschaften. Ein sinnvoller Weg zur Überwindung dieser Probleme ist das Einbringen von geeigneten Partikeln, Whiskern (Einkristallen) oder Fasern in eine keramische Grundmasse, die sog. Matrix. Auf diesem Weg sollen die vielversprechenden thermischen und mechanischen Eigenschaften von Keramiken mit einer ausreichenden Rißzähigkeit kombiniert und damit auch in der technischen Praxis nutzbar gemacht werden. Der besondere Vorteil von Keramik-Matrix-Verbundwerkstoffen im Vergleich zu den bei noch höheren Temperaturen einsetzbaren Systemen aus kohlenstoffaserverstärktem Kohlenstoff (CFC) liegt dabei darin, daß sie keines aufwendigen Oxidationsschutzes bedürfen.

Keramik-Matrix-Verbundwerkstoffe wurden ursprünglich für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt entwickelt, z.B. für hochtemperaturbelastete Komponenten künftiger Hyperschallflugzeuge oder als Hitzeschilde von mehrfach verwendbaren Raumkapseln. Auf dem industriellen Sektor erwartet man durch ihre Nutzbarmachung Lösungen für Hochtemperatur-Wärmetauscher, Brandschutzpaneele, Brennerdüsen, Struktur- und Haltevorrichtungen in Brennöfen sowie für hitzebeständige Komponenten in Strahltriebwerken und Gasturbinen. Darüber hinaus eignet sich das Material auch als verschleißarmer Reibbelag für Hochleistungsbremsen. Allerdings gibt es bisher trotz aller diesbezüglichen Bemühungen noch keinen großtechnisch realisierten Einsatz insbesondere von mit langen Fasern kontinuierlich verstärkten Keramiken.

Zur Herstellung von Verbunden mit Kurzfasern, Whiskern oder Plättchen können klassische Technologien genutzt werden, die auf dem Mischen der Komponenten und anschließendem Pressen und Sintern oder Heißpressen beruhen. Besondere Probleme stellt bei dieser Fabrikationsroute die mögliche mechanische Beschädigung der Fasern oder Whisker dar, ganz abgesehen von Gesundheitsgefährdungen für das verarbeitende Personal. Dennoch werden mit derartigen Technologien bereits gute Ergebnisse erzielt, z.B. sind whiskerverstärkte Keramiken für Schneidwerkzeuge bereits Stand der Technik.

Die mit der Whisker- oder Kurzfaserverstärkung erreichbaren Verbesserungen des Sprödbruchverhaltens sind allerdings für viele technische Anwendungen nach wie vor nicht ausreichend und bleiben außerdem zum Teil auf niedere Temperaturbereiche beschränkt. Wesentlich bessere Eigenschaften sind erst mit einer kontinuierlichen Faserverstärkung möglich. Solche Keramiken kommen aufgrund ihres relativ gutmütigen Bruchverhaltens bevorzugt für großformatige Bauteile in Betracht. Ihre Herstellung kann durch Einbringen der keramischen Matrix in vorgeformte Fasergerüste bzw. -strukturen erfolgen. In Frage kommen insbesondere auf einer Imprägnierung basierende Verfahren, wobei grundsätzlich zwischen einer Gasphasen-Infiltration und einer Flüssigphasen- bzw. Schmelzphasen-Infiltration zu unterscheiden ist. Mit Ausnahme der chemischen Gasphasen-Infiltration (CVI) umfassen alle Imprägnierverfahren mehrere Prozeßschritte. In jedem Fall ist die Herstellung sehr aufwendig, die Prozeßzeiten können im Bereich von Monaten liegen.

Relativ weit fortgeschritten in ihrer Entwicklung sind langfaserverstärkte Keramik-Matrix-Verbundwerkstoffe auf SiC-Basis. Hier wiederum richten sich die Hauptaktivitäten auf die Verstärkung mit Fasern, die ebenfalls aus SiC bestehen. Dabei werden besondere Anstrengungen auf die Verbesserung der thermischen Beständigkeit der Fasern verwendet. Aber auch die Entwicklung weiterer Fasern auf nitridischer oder oxidischer Basis, die hohe Einsatztemperaturen und (im Gegensatz zu C-Fasern) gleichzeitig geringe Oxidationsanfälligkeiten bieten sollen, wird betrieben. Einsatztemperaturen von etwa 1800°C werden für erreichbar gehalten. Ein besonderes Einsatzpotential könnten SiC/SiC-Systeme beim Bau zukünftiger Kernfusionsreaktoren erhalten, da sie über die Temperaturfestigkeit hinaus eine geringe Aktivierung unter Bestrahlung mit Neutronen zeigen.

Bei noch höheren Temperaturen sollten Bauteile aus Kohlenstoffaserverstärkten Keramiken (z.B. C/SiC) einsetzbar sein, für deren Herstellung sich ebenfalls CVI-Verfahren eignen. Hier werden v.a. Verfahrensverbesserungen bei der Composite-Herstellung angestrebt, was z.B. das Interface Faser/Matrix und die Beschichtung des fertigen Bauteils mit einer zusätzlichen Schutzschicht betrifft (Oxidationsneigung der Fasern).

Insgesamt befinden sich Keramik-Matrix-Verbundwerkstoffe immer noch weitgehend im Entwicklungsstadium. So verfügt man für den konstruktiven Einsatz langfaserverstärkter Keramiken bisher nur über einen relativ geringen Kenntnisstand, insbesondere was die Ermittlung von Werkstoffkenndaten, Aussagen über das Langzeitverhalten, den Nachweis der fehlerfreien Herstellung der Bauteile sowie die Verbindung mit anderen Werkstoffen angeht. Wesentliche Entwicklungsbemühungen zielen auch auf eine Verringerung der Kosten sowohl der Fasern als auch der Herstellungsverfahren ab.

Besondere technische Probleme gibt es bei der Herstellung von Keramik-Matrix-Verbundwerkstoffen, da die eingebrachten Verstärkungsphasen den schwierigen Bedingungen bei der Keramikfertigung standhalten müssen. Eine Schlüsselstellung kommt auch der definierten Einstellung der Faser-Matrix-Haftung zu, die nicht zu stark sein darf, damit die gewünschten Energieabsorptionsprozesse bei Belastung wirksam werden können. In beiden Problembereichen zeichnen sich inzwischen vielversprechende Lösungen ab. Ein Weg zur Lösung der Fertigungsprobleme besteht in der Auswahl eines Matrixmaterials, das mit ausreichend geringen Sintertemperaturen auskommt. In diesem Zusammenhang hat die Nutzung nanostrukturierter keramischer Pulver als Ausgangsmaterial ein großes Potential. Verbesserungen der Faser/Matrix-Grenzfläche sind durch geeignete Beschichtungen der Fasern erreichbar. Dadurch soll ein quasi duktiles Bruchverhalten erzielt werden.

August 2000 Jürgen Kohlhoff

Dreidimensionale Faserverbundwerkstoffe

Verbundwerkstoffe setzen sich aus verschiedenen Materialien oder Stoffgruppen zusammen, deren gezielte Kombination zu Eigenschaften führt, die mit keiner der Komponenten allein erreichbar wären. Mit Ausnahme der Schichtverbunde, die aus homogenen Schichten aufgebaut werden, läßt sich die Verstärkung durch das Einbringen von Teilchen oder Fasern in ein Grundmaterial, die sog. Matrix (z.B. aus Kunststoff, Metall oder Keramik), erreichen. Die Art der Verstärkung ist für eine Reihe mechanischer Eigenschaften des Werkstoffes, wie Steifigkeit, Festigkeit und Elastitität wesentlich. Hier spielt bei den faserverstärkten Verbunden neben dem Fasermaterial (z.B. Glas, Kohlenstoff oder Metall) die Verstärkungsgeometrie, d.h. Länge und Orientierung der Faser, eine entscheidende Rolle.

Bis heute ist die gebräuchlichste Art der Verstärkung der Laminataufbau aus Gelegen, bestehend aus unidirektionalen Faserstrukturen oder flächigen Geweben. Derartig hergestellte Faserverbundwerkstoffe werden in Massenprodukten seit langem mit Erfolg im Behälter- und Maschinenbau sowie im Bereich der Sport- und Freizeitindustrie eingesetzt. Ebenso haben sie sich für Einzelanwendungen in der Luft- und Raumfahrt, insbesondere wegen ihrer günstigen gewichtsbezogenen mechanischen Eigenschaften, bewährt. Typische Beispiele hierfür sind das Airbus-Seitenleitwerk oder Zellenstrukturteile und Rotorblätter bei Hubschraubern.

Die Herstellung hochwertiger volumiger Bauteile, wie z.B. große Strukturen in zylindrischer oder konischer Form mit beanspruchungsgerechter Faserorientierung, erfordert bis heute eine sehr aufwendige und teure Kombination von Ablege- und Wickelverfahren. So müssen mehrere der extrem dünnen, aus Verstärkungsfasern gewebten Lagen aufeinandergelegt und miteinander verbunden werden. Auch der Einsatz von rechnergesteuerten Legemaschinen führt nur dort zu nennenswerten Kosteneinsparungen, wo geometrisch einfache Strukturen herzustellen sind.

Hierin liegt ein wesentlicher Grund, weshalb sich Faserverbundwerkstoffe für komplexe tragende Strukturen in anspruchsvollen Massenprodukten, wie z.B. im Automobilbau, bisher nur in sehr begrenztem Umfang durchsetzen konnten. Eine erhebliche Vereinfachung der Fertigungstechnik, und damit eine deutliche Kostenreduzierung, kann erst durch die automatische Herstellung dreidimensionaler Faserstrukturen erreicht werden, die schon während des Textilprozesses vorkonfektioniert werden. Auf diesem Gebiet sind seit einigen Jahren national und international vielfältige Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten festzustellen. Ausgangspunkt sind traditionelle Textiltechniken wie Weben, Stricken, Flechten und Nähen.

So geht die sog. räumliche Webtechnik von zweidimensionalen Gewebelagen aus, die in Dickenrichtung durch ein vertikales Fadensystem verbunden werden. Im Unterschied zu herkömmlichen gelegten Gewebelaminaten verhindern die vertikalen Fasern das Weiterwachsen von Rissen in der Struktur. Eine vielversprechende Weiterentwicklung der Webtechnik ist das sog. Formweben, das vor allem zur Herstellung stark gekrümmter Strukturen interessant ist. Auch mit Hilfe der Strick- und Wirktechnik, d.h. dem Ver-

schlingen der Fasern zu miteinander verbundenen Maschen, lassen sich räumlich gestaltete textile Strukturen herstellen. Sie eignet sich besonders gut zur Verarbeitung spröder Verstärkungsfasern z.B. aus Glas oder Kohlenstoff. Die Flechttechnik wiederum ermöglicht bei individueller Klöppelführung ein praktisch beliebiges räumliches Verkreuzen und Verschlingen verschiedener Fasern. Damit wird es möglich, die Faserlagen in jedem Bereich eines Bauteils entsprechend der später zu erwartenden Belastung zu optimieren. Die dreidimensionale Flechttechnik bietet sich insbesondere zur Herstellung komplexer Profilstrukturen (z.B. von T- oder U-Profilen) an.

Eine wesentliche Voraussetzung für den kostengünstigen Einsatz dieser Textiltechniken zur Produktion von Faservorformlingen ist die Entwicklung der geeigneten computergesteuerten vollautomatischen Web-, Wirk- und Flechtmaschinen. Weiterhin müssen hinreichend gute theoretische Modelle zur Verfügung stehen, um in Abhängigkeit von Faser- und Matrixmaterial sowie Fasergeometrie die Verbundeigenschaften der Bauteile berechnen zu können. Hier besteht noch ein erheblicher Forschungsbedarf.

Selbst nach Lösung solcher Fragestellungen dürfte es auch langfristig nicht sinnvoll sein, für größere Strukturteile (z.B. Flugzeugzellen, Autokarosserien) komplett dreidimensional vorgeformte textile Strukturen herzustellen. Wahrscheinlicher ist die Fertigung der Vorformlinge für einzelne Komponenten unter Einsatz der jeweils mechanisch und wirtschaftlich günstigsten Textiltechnik und ihre anschließende Verbindung, z.B. durch Vernähen. Dieser Fertigungsschritt kann ebenfalls durch Robotereinsatz automatisiert werden.

Neben der Herstellung der dreidimensionalen Faserstrukturen ist ihre Weiterverarbeitung, d.h. die Imprägnierung mit dem geeigneten Matrixmaterial, derzeit Gegenstand umfangreicher Untersuchungen. Besonders wirtschaftlich ist z.B. das sog. RTM-(Resin Transfer Moulding)-Verfahren, bei dem man die textile Struktur zunächst in eine Form einlegt, in die nach Evakuierung das Harz eingespritzt wird. Ein interessanter Ansatz zur Herstellung von Faserverbundbauteilen mit thermoplastischer Matrix ist das Einbringen des Matrixmaterials (z.B. in Faserform) schon während der textilen Phase und das anschließende Heißpressen der Hybridstruktur in einer Form. Weitere Möglichkeiten zur Imprägnierung sind die Beschichtung des Gewebes durch Teilchenbeschuß, die chemische Abscheidung aus der Gasphase (Vakuum-Infiltration) oder die Infiltration aus der Schmelzphase.

April 2000 Thomas Kretschmer

Magnetwerkstoffe

Magnetische Werkstoffe nehmen heute in vielen technischen Anwendungen eine Schlüsselstellung ein. Das gilt vor allem für die Elektrotechnik, die Elektronik und den Gerätebau. Hier gibt es eine große Bandbreite an verschiedenen und teilweise sogar gegenläufigen Anforderungen an ihre Eigenschaften, was zur Entwicklung einer großen Vielfalt von Spezialmaterialien geführt hat. Dieser Trend wird sich auch in Zukunft fortsetzen.

Die Magnetisierung eines Materials folgt einem von außen einwirkenden magnetischen Feld nichtlinear in Form einer sog. Hysteresekurve. Die Form dieser Kurve ist charakteristisch für jeden Magnetwerkstoff. Entscheidende Kenngrößen sind dabei die sog. Remanenz, ein Maß für die nach Abschalten des äußeren Magnetfeldes verbleibende Restmagnetisierung, und die sog. Koerzitivfeldstärke, die von außen aufgebracht werden muß, um die Magnetisierung des Werkstoffes wieder rückgängig zu machen.

Die beiden Hauptgruppen unter den Magnetwerkstoffen werden von den Permanentmagneten und den sog. weichmagnetischen Materialien gebildet. Permanentmagnete sollen ihre Magnetisierung möglichst unabhängig von äußeren Feldern beibehalten und große Remanenzen und Koerzitivfeldstärken haben. Dagegen muß die Magnetisierung weichmagnetischer Materialien einem äußeren Feld möglichst ohne Verluste folgen, was geringe Koerzitivfeldstärken erfordert.

Je nach Herstellungsverfahren können die Eigenschaften von Magnetwerkstoffen hochspezifisch auf die jeweilige Anwendung abgestimmt werden. Die heute gebräuchlichsten Magnete sind aus Metallen bzw. Metallegierungen oder elektrisch nichtleitenden Oxiden aufgebaut. Dabei enthalten die Legierungen vorwiegend Eisen, Kobalt oder Nickel. Die Oxide sind in der Regel Ferrite und bestehen aus Eisenoxid in Kombination mit anderen Übergangsmetalloxiden. Interessante Weiterentwicklungen gibt es insbesondere auf dem Gebiet der metallischen Magnetwerkstoffe, nicht zuletzt aufgrund des zunehmenden Verständnisses ihrer magnetischen Grundlagen und der heute zur Verfügung stehenden Berechnungsmöglichkeiten für einen optimierten Einsatz.

Bei der Weiterentwicklung der Permanentmagnetwerkstoffe hat es in den letzten 50 Jahren mit einer Verzehnfachung der maximalen magnetischen Energiedichten sehr große Erfolge gegeben. Viele der in diesem Zusammenhang erzielten Fortschritte basieren auf der Nutzung von Eisen, Nickel und Kobalt in Legierungen miteinander oder mit anderen Elementen wie Aluminium, Bor oder verschiedenen Seltenen Erden.

Anfang der 70-er Jahre wurden Permanentmagnete auf Samarium-Kobalt-Basis entwickelt. Sie übertreffen in ihren magnetischen Eigenschaften die konventionellen Ferrit- und Aluminium-Nickel-Kobalt-Werkstoffe um ein Mehrfaches und werden auch in Zukunft vor allem dort eingesetzt, wo es auf ihre relativ hohe Temperaturbeständigkeit ankommt.

Eine weitere Steigerung gelang Anfang der 80er Jahre mit den Neodym-Eisen-Bor-Legierungen, die bei Raumtemperatur in ihrem magnetischen Niveau alle anderen Perma-

nentmagnetsorten übertreffen. Zudem kommen sie ohne das strategische Metall Kobalt aus und sind preiswerter als die Samarium-Kobalt-Typen. Einsatz finden sie z.B. in Kraftfahrzeug-Anlassermotoren und bürstenfreien Gleichstrommotoren. Für die Zukunft zeichnet sich ein verbreiteter Einsatz im Bereich der elektrisch angetriebenen Kraftfahrzeuge ab. Allerdings haben konventionelle Neodym-Eisen-Bor-Magnete zwei bedeutsame Nachteile. Ihre relativ niedrige Curie-Temperatur, oberhalb derer ferromagnetische Materialien ihre charakteristischen Eigenschaften einbüßen, führt zu einer geringen Leistungsfähigkeit bei Temperaturen über 120°C. Außerdem neigen sie zu Korrosion und Oxidation. In beiden Bereichen gibt es inzwischen allerdings erhebliche Verbesserungen, insbesondere durch Beimischung bestimmter Legierungselemente (z.B. Dysprosium).

Neben den Samarium-Kobalt- und Neodym-Eisen-Bor-Magneten werden aber auch die konventionellen Permanentmagnetwerkstoffe weiter eingesetzt. Sie behalten ihre Vorteile insbesondere dort, wo es auf Preisgünstigkeit (Ferrite) oder hohe Einsatztemperaturen über 300°C (Aluminium-Nickel-Kobalt) ankommt.

Auch bei den Weichmagnetischen Werkstoffen gehören Nickel-Eisen- und Kobalt-Eisen-Legierungen in spezifischen Modifikationen zu den klassischen Vertretern. Sie werden nicht zuletzt aufgrund der inzwischen erreichten Vielfalt und Vielseitigkeit auch weiterhin eine große Bedeutung haben. Verbesserungsfähig sind sie z.B. in Bezug auf ihre Korrosionseigenschaften, ihre Verschleißfestigkeit sowie ihr Temperaturverhalten.

In einer relativ frühen Entwicklungsphase befinden sich heute nanostrukturierte weichmagnetische Werkstoffe, bei denen die extrem geringen Korndurchmesser zu sehr kleinen Koerzitivfeldstärken führen. Bereits weiter fortgeschritten sind weichmagnetische amorphe Metalle, welche z.B. durch rasche Erstarrung in Bandform hergestellt werden. Sie sind beispielsweise für den Einsatz in Transformatoren, Magnetköpfen und (flexiblen) magnetischen Abschirmungen sowie als magnetoelastische Sensoren geeignet. Ihre Eigenschaften hängen primär von der Legierungszusammensetzung ab, lassen sich aber auch durch gezielte Wärmebehandlungen beeinflussen. So sind z.B. verschiedene Hystereseschleifen einstellbar. Weitere Entwicklungsanstrengungen zielen insbesondere auf die Verbesserung bestimmter mechanischer Eigenschaften und der Handhabung sowie auf die Verbilligung und Erweiterung der Herstellungsverfahren.

Februar 2000 Jürgen Kohlhoff

Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe

Verbundwerkstoffe mit metallischer Matrix (Metal Matrix Composites, MMCs) befinden sich noch weitgehend im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Sie weisen im Vergleich zu unverstärkten Metallen verbesserte mechanische Eigenschaften auf (insbesondere Festigkeit und Steifigkeit) und sind in ihrer thermischen Leistung den bereits etablierten Verbundwerkstoffen mit Polymermatrix weit überlegen. Aufgrund ihrer guten Wärmeleitfähigkeit bei kontrollierbarer Wärmeausdehnung bieten sie sich z.B. auch für die Nutzung in hochminiaturisierten elektronischen Schaltungen an.

Die Entwicklungen bei den Matrixmaterialien konzentrieren sich im wesentlichen auf die Leichtmetalle Titan und Magnesium sowie das bisher am weitesten verbreitete Aluminium. Diese können z.B. wegen zu geringer Warmfestigkeiten bei höheren Temperaturen nicht ohne Verstärkung eingesetzt werden. So sinkt die Zugfestigkeit von unverstärkten Aluminiumlegierungen bei 200°C auf etwa 50% des Wertes bei Raumtemperatur. Aber auch die Verbesserung der Warmfestigkeit und Verschleißbeständigkeit von Funktionswerkstoffen auf Bunt- oder Edelmetallbasis findet zunehmendes Interesse.

Bei den Verstärkungskomponenten in MMCs handelt es sich meist um keramische Werkstoffe, es werden aber z.B. auch Kohlenstoffasern eingesetzt. Durch das Einbringen von Endlosfasern erreicht man eine kontinuierliche Verstärkung und damit in Faserrichtung eine wesentliche Verbesserung der Eigenschaften, allerdings bei heute noch sehr hohen Herstellungskosten. Preiswerter ist die diskontinuierliche und dabei isotrope Verbesserung der Eigenschaften durch das Einbringen von Partikeln oder Kurzfasern. Allerdings ist damit nur eine relativ geringe Qualitätssteigerung möglich.

Insbesondere zur Verbesserung der Eigenschaften hochtemperaturfester Legierungen ist die Partikelverstärkung z.B. auf der Basis der Oxid-Dispersionshärtung bereits Stand der Technik. Die gleichmäßige Verteilung der möglichst feinen Partikel gelingt mit einer Reihe unterschiedlicher Verfahren, sowohl auf schmelz- als auch auf pulvermetallurgischer Basis.

Werkstoffe für optimalen Verschleißschutz sind die sog. CERMETs, bei denen Keramikpartikel homogen in eine Metall-Matrix eingebettet sind. Die Partikel können durch Flammspritzen auf eine Oberfläche aufgebracht werden, die anschließend poliert wird. Dabei wird vorzugsweise das weichere Metall abgetragen, so daß die Eigenschaften der Lauffläche ausschließlich von der überstehenden Keramik (z.B. Titankarbid) bestimmt sind.

Im Gegensatz zu Partikeln können in Fasern mit einer bestimmten Mindestlänge Spannungen aus der Matrix eingeleitet und damit in Orientierungsrichtung weitere Eigenschaftsverbesserungen erreicht werden. Die Problematik kurzfaserverstärkter Metalle liegt weitgehend bei den Fertigungsverfahren, welche die vorwiegend in Frage kommenden keramischen Fasern perfekt orientieren sollen, ohne sie zu beschädigen. Die dafür zumindest im Prinzip zur Verfügung stehenden Prozesse beruhen z.B. auf der Infiltrierung einer ausgerichteten Faser-Vorform oder auf dem ungleichmäßigen Einmischen

der Fasern in eine Schmelze und dem anschließenden Ausrichten durch gerichtete Gußverfahren.

Weitere Eigenschaftsverbesserungen ergeben sich durch eine kontinuierliche Verstärkung mit langen Fasern. Allerdings sind die vorhandenen Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse vor allem für langfaserverstärkte MMCs arbeitskraft- und kostenintensiv. Die reinen Materialkosten machen hier nur ungefähr ein Viertel der Gesamtherstellungskosten aus. Die bei der Herstellung in besonderem Maße auftretenden Probleme betreffen u.a. Eigenschaftseinbußen bei den Fasern aufgrund thermischer oder mechanischer Einflüsse, die Benetzbarkeit und das Reaktionsvermögen des Fasermaterials mit der Metallmatrix sowie die Vermeidung von Defekten und Leerräumen im MMC.

Die weitere Verbreitung langfaserverstärkter Metalle wird davon abhängen, welcher Aufwand zur Lösung derartiger Probleme getrieben werden muß. Großtechnische Anwendungen sind darüber hinaus erst dann denkbar, wenn die bisher extrem hohen Preise der Fasern gesenkt werden können. Ein Großteil der Entwicklungen im Bereich der langfaserverstärkten Metalle konzentriert sich daher auf die Nutzbarmachung von Siliziumkarbid-Fasern, die jetzt schon preiswerter sind als die bisher z.B. im amerikanischen Space-Shuttle eingesetzten Borfasern. Von Interesse sind außerdem Fasern aus Aluminiumoxid. Zur Lösung des Problems der Grenzflächenreaktionen bietet sich die Verstärkung mit ähnlich gearteten Materialien an, bei langfaserverstärktem Aluminium z.B. mit Fasern aus SiC und Titan.

Insgesamt wird der Markterfolg von MMCs in Zukunft wesentlich von der Entwicklung flexibler und kostengünstiger Fertigungstechniken abhängen. Auch die Realisierung einer ausreichenden Recyclingfähigkeit spielt eine zunehmende Rolle. Derzeit werden MMCs bereits vereinzelt in der Verkehrstechnik oder auch im Freizeitbereich eingesetzt. So verfügen Motorkolben aus einer mit Aluminiumoxid-Fasern verstärkten Al-Si-Legierung über große Schwingfestigkeiten und hohe Verschleißwiderstände bei gleichzeitig geringer Wärmeausdehnung. Weitere bereits verwirklichte Anwendungen finden sich in Bremsscheiben oder in den Rahmen von Mountain Bikes. Dispersionsverstärkte Kupferlegierungen sind beispielsweise für Schweißelektroden oder Hochleistungsschalter nutzbar. Langfaserverstärkte MMCs auf Aluminiumbasis oder, für höhere Einsatztemperaturen, mit Titanmatrix werden aus Kostengründen jedoch auch weiterhin hauptsächlich in der Luft- und Raumfahrt verwendet werden.

August 1999 Jürgen Kohlhoff

Funktionspolymere

Polymere sind Makromoleküle, die durch fortgesetzte Aneinanderreihung niedermolekularer Ausgangsstoffe (Monomere) entstehen. Im deutschen Sprachraum werden sie auch als Kunststoffe bezeichnet. Ihre klassischen Aufgaben liegen im Bereich der Strukturanwendungen, bei denen es in erster Linie auf mechanische Eigenschaften ankommt. Darüber hinaus wird bisher hauptsächlich ihre elektrische Isolationsfähigkeit genutzt. Seit einigen Jahren ist jedoch eine wachsende Bedeutung der sog. Funktionspolymere festzustellen, deren Anwendungen im nichtstrukturellen Bereich zu finden sind und deren Eigenschaften für diese Werkstoffklasse zunächst ungewöhnlich oder gar unbekannt waren.

Ermöglicht werden die Fortschritte in diesem Bereich vor allem durch computergestützte Verfahren zum gezielten, für einen geplanten Einsatz maßgeschneiderten Aufbau neuer Makromoleküle (molecular engineering). Interesse finden insbesondere Polymere mit spezifischen Durchlaßfähigkeiten (z.B. Membranwerkstoffe) oder mit besonderen biologischen, optischen sowie elektrischen Eigenschaften. Die bei weitem größte Bedeutung haben die beiden letztgenannten Gruppen, die zum Teil auch auf den gleichen Stoffen basieren.

Besonders spektakulär ist die Entwicklung von Polymeren, die über eine eigene (intrinsische) elektrische Leitfähigkeit verfügen. Typisch für diese Werkstoffe ist die Wechselfolge aus Einfach- und Doppelbindungen zwischen den die Hauptkette der Makromoleküle bildenden Kohlenstoffatomen. Daraus resultiert eine elektronische Struktur, die bei Hinzufügen von geeigneten Fremdmolekülen zu einer deutlichen Erhöhung der Elektronenbeweglichkeit führt.

Das erste elektrisch leitfähige Polymer wurde mit dem Polyacetylen im Jahre 1977 synthetisiert. Heute werden in diesem Zusammenhang insbesondere Stoffe mit ringförmigen monomeren Einheiten wie Polyanilin, Polythiopen oder Polypyrrol untersucht. Bereits Ende der 80er Jahre konnte im Labor die Leitfähigkeit von Kupfer erreicht werden. Trotz dieses Erfolges ist die anfängliche Euphorie zwischenzeitlich einer gewissen Ernüchterung gewichen. Die wesentlichen Ursachen dafür liegen in der mangelnden Stabilität einiger leitender Polymere unter Umweltbedingungen und vor allem in ihrer schlechten Verarbeitbarkeit. Nur nach aufwendigen Zusatzmaßnahmen verhalten sie sich unter diesen Gesichtspunkten wie konventionelle Kunststoffe.

Inzwischen ist jedoch wieder eine Intensivierung der Entwicklungsbemühungen festzustellen. In den Vordergrund des Interesses treten heute neben der elektrischen Leitfähigkeit dieser Stoffe zunehmend ihre je nach Typ bzw. Ausprägung erreichbaren Halbleitereigenschaften sowie ihre reversible Reduzier- bzw. Oxidierbarkeit durch Aufnahme bzw. Abgabe von Ladungen (Redox).

Damit ergeben sich Anwendungsmöglichkeiten, die weit über den Einsatz als „Kupfer-Ersatz" oder zur elektromagnetischen Abschirmung hinausgehen und zukünftig die eigentliche Bedeutung dieser Werkstoffgruppe ausmachen werden. So verfügen sie wie konventionelle Halbleiter über relativ nahe beieinanderliegende Valenz- und Leitungs-

bänder, woraus interessante elektrooptische Eigenschaften folgen. Prototypen von polymeren Leuchtdioden konnten bereits realisiert werden. Auf der Fähigkeit zur variablen Reduktion/Oxidation und den daraus resultierenden Veränderungen ihrer Beschaffenheit beruht unter anderem die Variierbarkeit der Farbe durch Dotieren bzw. Entdotieren auch während des Einsatzes. Diese Eigenschaft ist die Grundlage der Nutzbarkeit einiger leitender Polymere als elektrochrome Komponenten z.B. in großflächigen Anzeigetafeln. Aus wehrtechnischer Sicht könnte sich damit langfristig eine besonders interessante Anwendungsmöglichkeit in adaptiven Tarnsystemen ergeben. Redox-Eigenschaften sind auch die Basis für den bereits realisierten Einsatz leitender Polymere in Batterien oder für ihre Nutzbarkeit in Korrosionsschutzschichten. Auch hier sind interessante wehrtechnische Anwendungen möglich.

Eine weitere wichtige Klasse von Funktionswerkstoffen sind die piezoelektrischen Polymere, die auf mechanischen Druck mit der Ausbildung einer elektrischen Polarisation reagieren. Dieser Effekt ist umkehrbar. Das derzeit einzige kommerziell angebotene piezoelektrische Polymer ist das PVDF (Polyvinylidenfluorid). Folien aus diesem Material haben vielfältige Vorteile gegenüber ihren klassischen keramischen Konkurrenten und können diese schon aus Preisgründen aus dem Massenmarkt für Mikrophone, Lautsprecher oder Telefonhörkapseln verdrängen. Die Entwicklungsbemühungen konzentrieren sich insbesondere auf die Synthese von auf PVDF basierenden polymeren Strukturen, die über eine größere Elastizität und bessere chemische und thermische Eigenschaften sowie eine längere Lebensdauer verfügen sollen.

Aus dem Bereich der Polymere mit besonderen optischen Eigenschaften wird den bereits einsatzfähigen polymeren Lichtwellenleitern ein großer Markt im Bereich der Nahbereichs-Kommunikation vorausgesagt. Sie haben im Vergleich zu Glasfasern eine höhere Flexibilität auch bei größeren Faserdurchmessern, einen größeren Variationsbereich des Brechungsindexes und geringere Systemkosten aufgrund leichterer Verarbeitbarkeit und niedrigerer Herstellungskosten. Über Kommunikationsmöglichkeiten hinaus ergeben sich Anwendungen z.B. in der Sensorik. Hier können Polymere eingesetzt werden, die ihre optischen Eigenschaften beispielsweise unter Einwirkung bestimmter Gase ändern.

Im Entwicklungsstadium befinden sich die Polymere mit nichtlinearen optischen Eigenschaften. Ihre Lichtleitfähigkeit hängt von der Intensität des eingestrahlten Lichtes ab. So können sie sehr schnell ihren Brechungsindex ändern oder die Frequenz sowie die Polarisation des Lichtes modifizieren. Gegenüber ihren anorganischen Konkurrenten sind sie vergleichsweise leicht zu synthetisieren und zu formen. Ihre technische Verwendung z.B. als optische Schalter oder als Frequenzvervielfacher in optischen Schaltungen zeichnet sich ab. Fernziel ist der Einsatz in optischen Computern.

August 1998 Jürgen Kohlhoff

Hochtemperatur-Supraleiter

Unter „Supraleitung“ versteht man das physikalische Phänomen, daß bestimmte Materialien unterhalb einer für sie typischen Temperatur (Sprungtemperatur oder auch kritische Temperatur) ihren elektrischen Widerstand vollständig verlieren und ideale Leiter werden. Die bereits seit 1911 bekannten „konventionellen“ metallischen Supraleiter besitzen so niedrige Sprungtemperaturen, daß eine aufwendige Kühlung mit flüssigem Helium (Siedetemperatur: 4,2 K; 0 K = -273,15°C) erforderlich ist.

Die wichtigsten Anwendungen metallischer Supraleiter sind derzeit Magnetspulen in Kernspintomographen oder Teilchenbeschleunigern. Das am häufigsten verwendete Material ist eine Niob-Titan-Legierung, welche aufgrund ihrer ausgezeichneten Verformbarkeit die problemlose Herstellung von Drähten auch in einer für den Magnetbau erforderlichen Länge von mehreren Kilometern erlaubt. Als zweite Generation der bereits verwendeten konventionellen Supraleiter sind zweikomponentige intermetallische Verbindungen zu nennen. Diese Materialien haben eine Reihe technischer Vorteile (z.B. höhere kritische Temperaturen), sind aber hart und spröde. Es mußten aufwendige Verfahren entwickelt werden, um ihre Herstellung in Form von Drähten zu ermöglichen.

Eine revolutionäre Entwicklung begann 1986 mit der Entdeckung der keramischen Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL), deren wichtigste Vertreter bis heute auf Kupferoxiden basieren. Nachdem zunächst Sprungtemperaturen über 30 K realisiert wurden, fand man innerhalb kurzer Zeit zahlreiche Stoffe, die bereits oberhalb der Siedetemperatur des flüssigen Stickstoffs (77 K) supraleitend werden. Diese zunächst rasante Entwicklung scheint inzwischen jedoch zu stagnieren und ist einer Konsolidierungsphase gewichen. Trotzdem liegt der derzeit höchste Wert für die Sprungtemperatur schon deutlich über 130 K. Man kommt hier also langsam in Temperaturbereiche, die sogar mit einfacher Klimatechnik erreichbar wären.

Ein wesentliches Problem für die Anwendung der HTSL ist jedoch die Tatsache, daß beim Supraleitungseffekt das äußere Magnetfeld und die zu tragende Stromdichte eine ebenso wichtige Rolle spielen wie die Temperatur und ebenfalls einen kritischen Wert nicht überschreiten dürfen. Kommt eine der drei Größen in die Nähe des für sie maximalen Wertes, müssen die beiden anderen gegen Null gehen. Die Erhöhung von kritischem Magnetfeld und kritischer Stromdichte von HTSL ist daher Gegenstand intensiver Forschungsanstrengungen. Dabei konzentriert man sich insbesondere auf die präzise Ausrichtung der für die Supraleitung eigentlich verantwortlichen Molekülebenen. Das gelingt am ehesten, wenn das Material in dünnen Schichten vorliegt bzw. genutzt werden kann.

Wie alle keramischen Werkstoffe sind HTSL außerdem ausgesprochen spröde und nur sehr schwierig in gesicherter Qualität herstellbar. Auch diese Schwierigkeiten sind noch am geringsten bei der Nutzung dünner Schichten, auf denen daher die ersten realisierbaren Anwendungen der HTSL in Elektronik, Sensorik und Kommunikationstechnik basieren. Hier gibt es bereits eine ganze Reihe von Prototypen oder sogar schon marktfähigen Komponenten. Besonders erwähnenswert sind Filter oder Antennen in Mikrowellen-

Kommunikationssystemen oder Radargeräten. Auch bei den sog. SQUIDs (Superconductive Quantum Interference Devices) zur Messung kleinster Magnetfelder (z.B. für die U-Boot-Ortung), welche die Magnetfeldabhängigkeit des bei Supraleitern auftretenden quantenmechanischen Josephsoneffektes nutzen, haben HTSL Vorteile gegenüber den Versionen mit konventionellen Supraleitern. In der Mikroelektronik können zukünftig v.a. hybride Supraleiter-Halbleiter-Systeme bei der Temperatur des flüssigen Stickstoffs zu deutlichen Leistungssteigerungen führen.

Mittelfristig dürften HTSL auch in medizintechnischen und industriellen Anwendungen (z.B. Magnetscheideverfahren) eingesetzt werden. Am längsten wird sicher ihre verbreitete Einführung in der Energie- oder der Verkehrstechnik auf sich warten lassen. Hier denkt man an besonders spektakuläre Optionen wie den verlustfreien Stromtransport über weite Strecken oder an Magnetschwebebahnen. Viele dieser Anwendungen benötigen allerdings starke Elektromagnete, deren Werkstoffe über eine hohe Stromtragfähigkeit auch in großen Magnetfeldern verfügen müssen. Voraussetzung ist außerdem, daß man zuverlässige und wirtschaftliche Verfahren zur Herstellung geeigneter Massivteile, Drähte, Bänder und Spulen findet. Hier gibt es zwar inzwischen beachtliche Fortschritte, von einer großtechnischen Realisierbarkeit ist man aber noch ein gutes Stück entfernt.

Falls es jedoch gelingt, HTSL-Drähte und -Spulen im Bereich der Leistungselektrik, also der Energieübertragung und -umwandlung einzusetzen, gibt es eine ganze Reihe wehrtechnisch besonders interessanter Anwendungsmöglichkeiten. Hier sind insbesondere spezielle Komponenten in der Energieversorgung für elektrische Waffen oder der Einsatz entsprechender Generatoren und Elektromotoren für neuartige elektrische Antriebe z.B. von Schiffen zu nennen.

Für viele Anwendungen bleiben konventionelle metallische Supraleiter aber auf absehbare Zeit die einzig realistische Option, zumal der durch die einfachere Kühlung zu erzielende Einsparungseffekt der HTSL oft einen überraschend geringen Anteil an den Gesamtkosten einer Anlage ausmacht. Trotzdem kann man davon ausgehen, daß die weltweiten Forschungsanstrengungen schließlich zur Lösung derzeit noch bestehender Probleme und zu einem zunehmenden Einsatz von HTSL gerade auch in militärischen Anwendungen führen werden. Dazu könnten auch ganz neue, nicht auf Kupferoxiden basierende Materialien beitragen. So sind u.a. auch HTSL-Varianten der sog. Fullerene, einer neuen Modifikation des Kohlenstoffs, gefunden worden. Besonders weitreichende Konsequenzen hätte natürlich die Entwicklung von Raumtemperatur-Supraleitern. Deren Realisierbarkeit kann z.Zt. weder bejaht noch verneint werden, da eine geschlossene Theorie für die zugrundeliegenden Phänomene bis heute fehlt.

April 1997 Jürgen Kohlhoff

Hochleistungspolymere

Polymere sind Makromoleküle, die in speziellen Synthesen durch fortgesetzte Aneinanderreihung niedermolekularer Ausgangsstoffe (Monomere) entstehen. Die Natur der Monomere und die Art ihrer Verkettung entscheiden wesentlich über die Eigenschaften der resultierenden Polymere. Weitere Möglichkeiten zur Beeinflussung ihrer Qualität gibt es durch Wahl geeigneter Aufbereitungs-, Formgebungs- und Veredelungserfahren, z.B. durch Zusatz bestimmter Additive oder durch Ausrichtung der Molekülketten. Vor allem auf dieser großen gestalterischen Freiheit bei der Entwicklung maßgeschneiderter Werkstoffe beruht der große wirtschaftliche Erfolg der Polymere in den letzten Jahrzehnten.

Je nach Grad ihrer Verbreitung und ihrem Leistungsniveau unterscheidet man zwischen Standardpolymeren, Technischen Polymeren und Hochleistungspolymeren. Die Standardpolymere sind Massenprodukte und werden in sehr großen Tonnagen produziert. Die wichtigsten Vertreter dieser Klasse sind Polyvinylchlorid (PVC), Polystyrol (PS), Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP). Als Technische Polymere bezeichnet man solche Kunststoffe, die als ausgesprochene Konstruktions- oder Funktionswerkstoffe zur Anwendung kommen. Dazu gehören z.B. Polyamide (PA) und Polycarbonate (PC). Sie verfügen im allgemeinen über eine gute Wärmebeständigkeit, (Stand-)Festigkeit, Korrosions- und Chemikalienbeständigkeit oder über spezifische elektrische Eigenschaften. In erster Linie werden sie heute in der Automobil- und Flugzeugindustrie sowie in der Elektro- und Elektronikindustrie, zunehmend aber auch im Maschinen- und Apparatebau eingesetzt.

Die sog. Hochleistungspolymere zeichnen sich je nach ihrer Art durch Eigenschaften aus, die noch einmal weit über die der klassischen Technischen Polymere hinausreichen, wie z.B. extreme Temperatur-, Chemikalien- und Formbeständigkeit sowie mechanische Festigkeit. Auch Polymere mit herausragenden elektrischen, optischen oder biologischen Eigenschaften werden hierzu gezählt. Hochleistungspolymere stehen oft nicht in Konkurrenz zu anderen Werkstoffen, sondern tragen erst zu technischen Problemlösungen bei, die mit bisherigen Mitteln nicht möglich waren.

Besondere Anstrengungen gelten der Entwicklung sog. Hochtemperaturfester Polymere, die auch oberhalb von 150°C noch auf Dauer einsetzbar sind. Ihre Bedeutung nimmt ständig zu, zumal der Trend zur Miniaturisierung insbesondere in der Elektrotechnik immer höhere Ansprüche an Wärmeform- und Wärmealterungsbeständigkeit mit sich bringt. Zunehmendes Interesse finden sie auch im Fahrzeugbau, wo der Bedarf an Werkstoffen mit gleichzeitig geringem Gewicht und ausgezeichneten mechanischen sowie thermischen Eigenschaften wächst. Für Langzeitbelastungen gibt es allerdings eine prinzipielle physikalische Obergrenze bei ungefähr 500°C. Stand der Technik mit Dauereinsatztemperaturen von durchweg deutlich über 200°C sind z.B. Polyimide, Polyetherketone (PEK, PEEK, PAEK, ...), Polyphenylensulfid (PPS) und die sog. Fluorpolymere. Je nach Typ zeichnen sie sich darüber hinaus durch eine Reihe weiterer hervorragender Eigenschaften aus, z.B. durch hohe Verschleißfestigkeit, Beständigkeit gegen Chemikalien oder energiereiche Strahlung, hohe Flammwidrigkeit oder durch besondere elektri-

sche bzw. dielektrische Eigenschaften. Mit steigendem Einsatzvolumen dürften auch ihre bisher hohen Preise deutlich sinken.

Ein weiteres wichtiges Entwicklungsziel für Polymere ist die Steigerung ihrer Festigkeit und Steifigkeit, vor allem im Hinblick auf die Konkurrenzfähigkeit zu Metallen. Neben den vielfältigen Bemühungen auf dem Gebiet der faserverstärkten Polymere sind hier v.a. die Flüssigkristallpolymere (Liquid Crystal Polymers, LCP) zu nennen, deren anisotroper molekularer Aufbau sog. selbstverstärkende Eigenschaften zur Folge hat. Im Prinzip sind sie Verbundwerkstoffe mit einer organischen Matrix, in welche Fasern aus dem gleichen Polymer eingelagert sind. Ihr größtes Anwendungspotential ist zunächst in der Elektrotechnik gegeben, sie sind aber auch für tragende Teile im Automobil- und Flugzeugbau einsetzbar. In einer speziellen Modifikation sind sie auch für optische Anwendungen interessant.

Wesentliche Voraussetzung für weitere Fortschritte auf dem Gebiet der Polymere sind neue Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung. Hierzu zählt insbesondere das tiefergehende Verständnis des Aufbaus, der Wechselwirkungen sowie der Architektur der Moleküle, das teilweise nur in Verbindung mit fortgeschrittenen Methoden der Computersimulation und der Datenverarbeitung erarbeitet und genutzt werden kann ("molecular engineering").

Dabei gelten die Entwicklungsbemühungen heute weniger der Synthese chemisch neuer Monomere, sondern eher der geeigneten Kombination bereits bekannter Verbindungen und der Beeinflussung der Mikrostrukturen. So können die Zusammensetzung und die Struktur eines Polymers durch Einfügen zusätzlicher Grundbausteine abgewandelt werden. Ein Ergebnis dieser Vorgehensweise sind die sog. Copolymere oder Blockcopolymere, deren Eigenschaften vom Basiskunststoff zum Teil deutlich abweichen können. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Herstellung von sog. Blends oder Polymerlegierungen, eine im Prinzip von den Metallen her bekannte Technologie zur Synthese neuer Werkstoffe mit ganz neuen Eigenschaftsbildern. Auch die Kombination der beiden Linien, Copolymerisation und Blending, ist möglich.

Wesentlichen Einfluß auf die weitere Entwicklung maßgeschneiderter Polymere hat eine neue Klasse von Katalysatoren für die Fertigung, die auf sog. Metallocenen basieren. Durch die gezielte Variation spezifischer Eigenschaften soll damit auch die Weiterentwicklung klassischer Kunststoffe zu Hochleistungspolymeren ermöglicht werden. Auch eine ganz neue Familie von Kunststoffen, die Cycloolefin-Copolymere (COC), ist damit herstellbar. Dabei handelt es sich um transparente Kunststoffe mit hoher Beständigkeit gegen Chemikalien und UV-Strahlen, die auch in der Optoelektronik z.B. zur Datenspeicherung eingesetzt werden könnten.

März 1997 Jürgen Kohlhoff

Multifunktionale Werkstoffe

Als „multifunktional“ bezeichnet man solche Werkstoffe, die aufgrund ihrer Eigenschaften mehrere (z.B. strukturelle und sensorische) Funktionen übernehmen können. Häufig werden solche Materialien heute bereits mit den Attributen „intelligent“ oder „smart“ charakterisiert, obwohl das eigentliche Konzept der sog. Intelligenten Werkstoffe (Smart Materials) von der Integration sowohl struktureller als auch sensorischer, aktorischer und informationsverarbeitender Funktionen in einem einzigen Stoffsystem ausgeht. Ziel dieses Konzeptes sind Werkstoffe, die ihre Eigenschaften während des Einsatzes an wechselnde Umgebungsbedingungen angepassen können. Bis jetzt gibt es jedoch noch keinen Werkstoff, der in diesem umfassenden Sinne als intelligent bezeichnet werden kann. Einfache Multifunktionale Werkstoffe sind dagegen bereits realisiert. Sie bilden die wesentlichen Elemente für das neu entstehende Technologiegebiet der Adaptronik, das sich mit adaptiven Strukturen befaßt.

Schon seit langem bekannt sind die Formgedächtnislegierungen, bei denen es in Abhängigkeit von der Temperatur zu einer Umwandlung der inneren Struktur kommt. Die damit verbundene Volumenänderung ist mit einer beträchtlichen Stellkraft verknüpft, was ihren Einsatz als Aktoren ermöglicht. Die ebenfalls seit langem bekannten Piezoaktiven Materialien nutzen den bei einer Reihe von Kristallen, Keramiken und Polymeren auftretenden Piezoeffekt. Bei mechanischer Verformung tritt hier eine elektrische Polarisierung auf; der Effekt ist umkehrbar. Ebenfalls einen Verformungseffekt zeigen bestimmte ferromagnetische Werkstoffe unter Einwirkung eines Magnetfeldes.

Bei den in jüngster Zeit zunehmend diskutierten Elektrorheologischen oder Elektroviskosen Flüssigkeiten handelt es sich um Suspensionen aus Mikropartikeln (z.B. Polymere, Silikate) in einer Trägerflüssigkeit (z.B. Öl, Paraffin). Ihre Fließgeschwindigkeit (Viskosität) läßt sich in Abhängigkeit eines von außen angelegten elektrischen Feldes steuern.

Einige Fasermaterialien (Kohlenstoff, Glas) werden ebenfalls zu den Multifunktionalen Werkstoffen gezählt. So lassen sich z.B. aus der Veränderung des elektrischen Widerstandes von Kohlenstoffaser-Strängen in einem Verbundwerkstoff Rückschlüsse auf die aktuelle Belastung der Struktur gewinnen. Glasfasern werden aufgrund ihrer guten Sensoreigenschaften häufig zusätzlich in Verbundstrukturen eingebracht, allerdings ohne strukturelle Aufgaben zu übernehmen. Multifunktionale Eigenschaften haben auch die sog. Photo-, Thermo- und Elektrochromen Substanzen. Sie ermöglichen es, durch Einwirkung von Licht, Wärme bzw. elektrischem Feld die Farbgebung bzw. Lichtdurchlässigkeit zu steuern. Anwendungsbeispiele sind die Photochromen Gläser, die vor allem für Brillen und Fenster verwendet werden.

Generell dürften Multifunktionale Werkstoffe zukünftig überall dort Anwendung finden, wo konventionelle Materialien angesichts zunehmend komplexer werdender Aufgabenstellungen an ihre Grenzen stoßen. Darüber hinaus eröffnen sie ganz neue Nutzungsoptionen, die mit den bisher verwendeten Werkstoffen nicht möglich waren. Hier gibt es sowohl im zivilen als auch im militärischen Bereich eine Vielzahl von innovativen Problemlösungen und Ideen, mit deren Realisierung langfristig zu rechnen ist.

Ein interessantes Einsatzgebiet ist z.B. die Zustandsüberwachung (Health Monitoring) von Bauteilen in Fertigung und Betrieb. Die Integration von Sensorfunktionen durch den Einbau von Kohlenstoff- oder Glasfasern in eine Struktur gewährleistet eine permanente Kontrolle besonders kritischer Komponenten z.B. in Flugzeugen oder Brücken. Prinzipiell können durch solche Konzepte, die eine gewisse Analogie zu Nervensystemen in Lebewesen haben, bevorstehende Ermüdungs- oder Brucherscheinungen rechtzeitig erkannt und die betroffenen Teile ersetzt werden, bevor es zum Versagen kommt. In Analogie zu biologischen Vorbildern wird sogar an eingebaute Fähigkeiten zur Selbstreparatur gedacht, z.B. durch die gezielte Freisetzung von geeigneten chemischen Substanzen.

Kosteneinsparungen durch geringeren Material- und Energiebedarf können sich ggf. durch die variable Anpassung der Festigkeit tragender Strukturen an die jeweilige Belastung erreichen lassen. Während herkömmliche Konstruktionen in der Regel für den Normalbetrieb überdimensioniert sind, werden hier an den kritischen Stellen zusätzliche Verstärkungsglieder z.B. aus Formgedächtnislegierungen eingebaut, die bei extremer Belastung durch Erwärmung in die frühere Form zurückgebracht werden. Auf diese Weise wird das Bauteil entgegengesetzt zur Beanspruchungsrichtung gespannt.

Insbesondere im Bereich der Luftfahrt, aber auch im Schiffbau, dürften zukünftig Konzepte der aktiven Formsteuerung Anwendung finden. Durch den Einbau geeigneter Aktoren (z.B. aus piezoaktiven Materialien) werden Verbiegungen bzw. Oberflächendeformationen der Strukturen erreicht. Diese lassen sich optimal an die Luft- bzw. Wasserströmungsverhältnisse anpassen und ermöglichen so höhere Geschwindigkeiten bei geringerem Energieverbrauch. Im Versuchsstadium befindet sich die gezielte Veränderung der aerodynamischen Profile von Flugzeugflügeln bzw. von Hubschrauber-Rotorblättern. Ebenfalls noch weit von der Realisierung entfernt sind variable Außenhüllen von Über- und Unterwasserschiffen.

Februar 1997 Thomas Kretschmer

Aerogele

Aerogele sind hochporöse Werkstoffe mit extrem kleinen Dichten, die üblicherweise im Bereich zwischen 30 und 300 kg/m^3 liegen. Im Labor konnten sogar schon Werte von bis zu einigen kg/m^3 erreicht werden (zum Vergleich: Luft liegt bei 1,2 kg/m^3). Während die Porengrößen von herkömmlichen porösen Materialien wie Schwämmen oder Isolierschäumen im Mikro- bis Millimeterbereich liegen, bestehen Aerogele aus Hohlräumen in der Größenordnung von Nanometern. Im Prinzip handelt es sich hier also um nanostrukturierte Materialien. Diese können zu 99% aus Luftkanälen bestehen, woraus eine extrem große innere Oberfläche resultiert, die bei einem Quader von einem Gramm Gewicht mehr als 1000 m^2 umfassen kann.

Das klassische Herstellungsverfahren für Aerogele, wie es bereits seit ihrer Entdeckung vor über 60 Jahren eingesetzt wird, geht von einem sog. Sol-Gel-Prozeß aus, bei dem aus einer flüssigen Stoffmischung (Sol) ein amorphes Festkörper-Netzwerk (Gel) wächst. In das so entstandene Gel-Gerüst ist noch Flüssigkeit eingelagert, die anschließend im sog. überkritischen Zustand, also unter hohem Druck und bei hoher Temperatur, extrahiert wird. Dabei bleibt die Struktur des Gels erhalten.

Allerdings war die labortechnische Beherrschung des langwierigen Herstellungsprozesses für lange Zeit zu komplex, um größere Mengen von Aerogelen zu produzieren. Schwierigkeiten bereitete insbesondere der Umgang mit den verwendeten Flüssigkeiten, die (wie z.B. Methanol) explosive Eigenschaften zeigen. Inzwischen wurden sehr sichere Verfahrensvarianten entwickelt, die auch eine großtechnische Produktion dieses Materials ermöglichen. Neben den am weitesten verbreiteten Kieselglas-Aerogelen, die auf Siliziumdioxid basieren, werden heute auch andere Basismaterialien wie Aluminiumoxid, Titanoxid oder Mischoxide verwendet. Vor einigen Jahren ist sogar die Herstellung organischer Aerogele gelungen, die im Vergleich zu den keramischen weniger spröde sind und weiter verbesserte Wärmedämmungseigenschaften besitzen. Außerdem können sie durch Erhitzung unter Luftabschluß (Pyrolyse) in reine Kohlenstoff-Aerogele überführt werden, die elektrisch leitfähig sind. Ihre Entwicklung befindet sich allerdings noch in einer relativ frühen Phase.

Praktisch alle Anwendungsmöglichkeiten für Aerogele beruhen auf ihrer hochporösen Nanostruktur. Diese ist verantwortlich für Eigenschaften wie den niedrigen Brechungsindex, den kleinen Elastizitätsmodul, die geringe akustische Impedanz und die kleine Wärmeleitfähigkeit. In einigen Einsatzfällen ist auch die hohe optische Transparenz von Nutzen. Bereits seit geraumer Zeit werden Siliziumdioxid-Aerogelplatten aufgrund ihrer spezifischen optischen Eigenschaften in der Hochenergiephysik als Teilchendetektoren eingesetzt. Heute richten sich die Forschungs- und Entwicklungsbemühungen vor allem auf Anwendungen, für die größere Materialmengen benötigt werden.

Besondere Zukunftsaussichten haben Aerogele als wärmeisolierendes Material. Ihre Wärmedämmfähigkeit ist deutlich besser als diejenige von Styropor und läßt sich durch Evakuierung sogar noch weiter erhöhen. Da beispielsweise Siliziumdioxid-Aerogele sowohl unbrennbar als auch leicht zu entsorgen sind, eignen sie sich besonders gut als

Ersatz für FCKW-haltige Isolationsschäume, z.B. für Kühlschränke. Aufgrund ihrer Lichtdurchlässigkeit sind sie aber auch zur passiven Nutzung der Sonnenenergie an Hauswänden oder als Oberlichter in Gebäuden geeignet. Für transparente Fenstersysteme taugen sie wegen ihres milchig-trüben Aussehens, das durch Streuung des Lichtes an den luftgefüllten Poren entsteht, bisher noch nicht.

Zunehmendes Interesse findet auch die Nutzung der mechanischen und akustischen Eigenschaften dieser Werkstoffgruppe. So ist die Schallgeschwindigkeit in Aerogelen deutlich niedriger als in Luft und außerdem durch Einstellung bestimmer Herstellungsparameter variierbar. Dieser Effekt läßt sich zur Anpassung der akustischen Impedanzen an Grenzflächen (akustische Antireflex-Schichten) ausnutzen.

Aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche und der leichten Möglichkeit zum Einbau von katalytisch aktiven Substanzen haben die Aerogele als Katalysatorträger insbesondere für chemische Prozesse ein enormes Anwendungspotential. Für Raumfahrtanwendungen bietet sich ihre Nutzung als leichtes Speichermedium für Treibstoff an. Besonders attraktiv erscheint auch der Einsatz von Kohlenstoff-Aerogelen für den Bau von Superkondensatoren mit extremer Leistungsdichte.

Eine Schwachstelle von Aerogelen bildet ihre relativ hohe Empfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen. So sind Siliziumdioxid-Aerogele insbesondere vor Feuchtigkeit zu schützen, da ihr Gerüst aufgrund ihrer chemischen Struktur wasseraufnehmend ist. Wesentliche Verbesserungen sind hier durch Austausch geeigneter molekularer Bestandteile möglich. Grundlegende Fortschritte im Bereich der Prozeßtechnologien sind in Zukunft vermutlich durch die Nutzbarmachung unterkritischer Trocknungsverfahren zu erwarten, für die keine hohen Drücke und Temperaturen benötigt werden.

Insgesamt läßt sich feststellen, daß die teilweise bereits erfolgreichen Bemühungen um ein tiefergehendes Verständnis ihrer Struktur, um die Verbesserung ihrer Eigenschaften sowie nicht zuletzt um wirtschaftliche und sichere Fertigungsverfahren in Zukunft zu einer stärkeren Verbreitung der bisher noch relativ unbekannten Werkstoffgruppe der Aerogele führen dürften.

Oktober 1996 Thomas Kretschmer

Textile Werkstoffe

Üblicherweise verwendet man die Bezeichnung „textil“ für solche Produkte, deren Gefüge aus faserartigen Ausgangsstoffen wie Garnen, Zwirnen oder Filzen gewebt, gewirkt oder gestrickt werden. Sie sind in der Regel flächenhaft und aufgrund ihrer Struktur flexibel. Die textilen Roh- und Werkstoffe sind in Form von Vor-, Zwischen- oder Endprodukten seit Jahrhunderten eng mit dem Textilgewerbe verknüpft, einem der ältesten Fertigungszweige der Handwerks- und Industriegeschichte. Ungeachtet dieser langen Tradition gibt es gerade in jüngster Zeit eine Vielzahl von innovativen „High-Tex“-Entwicklungen, die für diesen Bereich auch in Zukunft ein enormes Potential erwarten lassen.

Den weitaus größten Anteil am Textilmarkt haben nach wie vor die Bekleidungs- und Heimtextilien, obwohl ihre wirtschaftliche Bedeutung in den hochindustrialisierten Staaten durch Billiganbieter insbesondere aus Asien ständig zurückgeht. Hier spielen die leicht zu verarbeitenden Materialien Baumwolle oder Synthesefasern seit langem eine dominierende Rolle. Allerdings zeigt sich in letzter Zeit aufgrund der spezifischen Trage- und Qualitätseigenschaften ein Trend zur Verwendung der altbekannten Naturfaser Flachs. Darüber hinaus werden (vor allem in Japan) vielfältige Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen unternommen, um aus synthetischen Ausgangsmaterialien Stoffe herzustellen, die den Textilien aus Naturfasern in jeder Hinsicht (Atmungsaktivität, Gewicht, Geschmeidigkeit) überlegen sind. So gibt es z.B. schon Fasern, die ihre Farbe und Wärmetransmission verändern können. Zunehmend wird aber auch an der Modifikation von Naturfasern gearbeitet. Ein Beispiel ist die Einlagerung von keramischen Mikropartikeln in Wolle, um die Feuchtigkeits- und Wärmeableitung zu erhöhen. Auch an der gentechnischen Herstellung von Spinnenfäden, den feinsten und widerstandsfähigsten Naturfasern, wird geforscht.

Im Vergleich zum Massenmarkt der Bekleidungs- und Heimtextilien haben die sog. technischen Textilien, d.h. Textilien für technische oder techniknahe Systeme, über lange Zeit ein Nischendasein geführt. Durch die relativ großen Wachstumsraten in den letzten Jahren hat sich dieser Bereich jedoch einen Marktanteil erobert, der in Deutschland inzwischen bei ca. 25% des gesamten Textilmarktes liegt. Da viele der Entwicklungen auf die speziellen Anforderungen der Anwender maßgeschneidert werden müssen, eignet sich seine Produkt- und Absatzstruktur besonders gut für Klein- und Mittelbetriebe.

Der Hauptbedarf an technischen Textilien besteht naturgemäß in der Industrie. Neben herkömmlichen Anwendungen wie Keilriemen, Filter und Siebe gibt es in letzter Zeit eine zunehmende Nachfrage im Fahrzeug- und Flugzeugbau, z.B. für textilarmierte Innenraumverkleidungen oder Sicherheitsgurte. Starke Impulse werden von den Entwicklungen bei passiven Rückhaltesystemen erwartet, vor allem dem Airbag. Auch in der Bautechnik findet man eine Vielzahl von Anwendungen für textile Werkstoffe, z.B. als Planen und Dachbahnen zur Verstärkung herkömmlicher Baustoffe oder als Dämm-Material. Ähnliche Produkte werden in der Landwirtschaft und der Umwelttechnik (z.B. für Deponien) benötigt.

Zunehmenden Bedarf gibt es für hochwertige Schutzkleidung gegen extreme Temperaturen sowie gegen Gefahrstoffe und mechanische Einwirkungen. Hier bieten insbesondere Gewebe aus kunststoffummantelten Garnen, die nachträglich mit speziellen Additiven beschichtet werden, viele interessante Optionen. Beispiele sind atmungsaktive Gewebe für Nässesperrsysteme oder beheizbare Fasersysteme für Kälteschutzkleidung.

Zu den interessantesten Anwendungen für den medizinischen Bereich gehören die bioaktiven Fasern. So gibt es antimikrobielle Gewebe, bei denen die antimikrobiellen Substanzen direkt in die Faser eingebaut werden. Dadurch bleiben die keimtötenden Eigenschaften auch nach der Wäsche oder chemischen Reinigung erhalten. Neben Spezialfasern, denen chemische Wirkstoffe aufgepfropft werden, sind auch neue selbstauflösende Textilien für chirurgische Zwecke zu erwarten.

Unabhängig von der konkreten Anwendung gilt, daß die wesentlichen Fortschritte bei den technischen Textilien im Bereich der Fasern, der Art ihrer Vernetzung und auf dem Gebiet der nachträglichen Oberflächenbehandlung der Produkte stattfinden. Bei den Fasern dominieren in erster Linie maßgeschneiderte synthetische Ausführungen. Dabei gerät die Aramidfaser als bisheriger Marktführer zunehmend unter Substitutionsdruck durch eine Vielzahl neuartiger Entwicklungen, wie z.B. Polyethylen oder Polyphenylensulfid.

Ein besonders auffällig wachsender "High-Tex"-Markt sind die sog. Vliesstoffe, für die eine wirre, gekräuselte Anordnung der Fasern charakteristisch ist. Vliese können filtern, saugen, dränen und schützen. Beispielhafte Anwendungen sind die Heißgasfiltration bei Kraftwerken, die Festigung von Böschungen oder die brandfeste Ausstattung von Flugzeugkissen. Die Fasern (je nach Anwendung z.B. Polyester, Polypropylen oder Polyamid) können durch Klebstoffe oder durch thermisches Punktschweißen verfestigt werden.

Eine zunehmend wichtige Rolle spielen textile Strukturen als Vorprodukte für Verbundsysteme. Während flächenhafte Textilgewebe bereits heute für die Armierung von Kunststoffen und Metallen verwendet werden, dürfte die Textilarmierung zur Realisierung von dreidimensional verstärkten Verbundsystemen zukünftig besonders interessant werden.

August 1996 Thomas Kretschmer

Hochleistungsmetalle

Charakteristisches Merkmal von Metallen ist ihre gute elektrische und thermische Leitfähigkeit, die auf der großen Zahl frei beweglicher Elektronen beruht. Darüber hinaus verfügen sie über eine Gitterstruktur hoher Symmetrie und Packungsdichte, die v.a. ihre mechanischen Eigenschaften bestimmen.

Unter allen technischen Werkstoffen werden Metalle auch weiterhin eine herausragende Rolle spielen. Zu ihren wichtigsten Vorteilen zählen die extrem langjährige Erfahrung, die man mit ihnen gemacht hat, ihre relativ geringen Gestehungskosten, die etablierten Fertigungs-, Verarbeitungs- und Reparaturverfahren sowie ihre außerordentlich hohe Recyclingfähigkeit.

Ihre große technische Bedeutung beruht vor allem auf der guten Formbarkeit, der charakteristischen Leitfähigkeit und ihrer Eignung zur gezielten Einstellung von Eigenschaftskombinationen durch Legierung. Darüber hinaus läßt sich ihre Qualität häufig noch dadurch verbessern, daß man sie starken thermischen oder mechanischen Belastungen aussetzt. So kann z.B. durch Verformung die Festigkeit erhöht oder durch gezielte Wärmebehandlung die Wahrscheinlichkeit eines Festigkeitsabfalls bei hohen Temperaturen herabgesetzt werden.

Vor allem durch gezielte Beeinflussung des Mikrogefüges ist es heute möglich geworden, neue hochwertige metallische Werkstoffe zu entwickeln, für die je nach Anforderung ein ganzes Spektrum potentieller Eigenschaften eingestellt werden kann. So können Metalle z.B. spröde oder geschmeidig verformbar, hart oder weich, leicht schmelzbar oder extrem hitzebeständig sein.

Dominierender metallischer Werkstoff ist Stahl, der sowohl nach Produktionsmenge als auch nach Umsatz weltweit an der Spitze aller Werkstoffe steht. Hieran dürft sich auch in absehbarer Zukunft nichts ändern, zumal es eine Vielzahl von technologischen Weiterentwicklungen im Stahlbereich gibt, die eine Anpassung der Eigenschaften an den jeweiligen Einsatzbereich ermöglichen. Beispiele für solche Hochleistungsstähle sind die Superplastischen Stähle sowie die sog. Dual-Phasen-Stähle.

Der Schwerpunkt bei den neuen Hochleistungsmetallen und -legierungen liegt jedoch im Bereich der Nicht-Eisenmetalle, wo es eine Vielzahl von Entwicklungslinien gibt, die aufgrund ihrer Eigenschaften neue, anspruchsvolle Anwendungsmöglichkeiten eröffnen.

Von besonderem Interesse sind hier die sog. Leichtbauwerkstoffe, die v.a. zur Reduzierung von Strukturgewichten z.B. im Flugzeug- und Automobilbau ein großes Potential haben. Die Legierungen der Leichtmetalle Aluminium und Magnesium mit Lithium haben ein großes Potential. Auch das bisher weitgehend in der Luft- und Raumfahrt genutzte Leichtmetall Titan gewinnt immer mehr an Bedeutung. Eine neue Klasse von Leichtbauwerkstoffen sind die sog. Schaummetalle, die eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten für konstruktive Zwecke oder als Dämmaterial aber auch in der Verfahrenstechnik (Katalysatorträger, Filter) bieten.

Eine besondere Herausforderung bei der Werkstoffentwicklung stellen die Hochtemperaturlegierungen dar. Die Hauptimpulse kommen hier aus der Energie- und Antriebstechnik, wo die Forderung nach Erhöhung der Wirkungsgrade unmittelbar mit der Erhöhung der Betriebstemperaturen verknüpft ist. Bereits seit langem eingeführt sind die speziell für den Hochtemperaturteil von Turbinen entwickelten sog. Superlegierungen auf Nickelbasis (bis ca. 1000°C). Trotz einiger Weiterentwicklungen bei ihrer Herstellung dürften sie mittelfristig durch die Werkstoffklasse der sog. Intermetallischen Phasen abgelöst werden, die eine noch höhere Temperaturfestigkeit versprechen. Weitere Leistungssteigerungen erwartet man durch das gezielte Einbringen von thermisch stabilen keramischen Teilchen in sog. Oxiddispersiongehärteten Legierungen.

Neben den beiden herausragenden Aspekten des Leichtbaus und des Hochtemperatureinsatzes gibt es weitere interessante Entwicklungen auf dem Gebiet der Strukturmetalle. Besonders erwähnenswert sind die sog. Formgedächtnislegierungen. Für diese multifunktionalen Werkstoffe gibt es eine Vielzahl von potentiellen Anwendungen sowohl im Konsumartikelbereich als auch für anspruchsvolle technische Aufgaben. Auch die sog. amorphen Metalle, auch als metallische Gläser bezeichnet, sind hier zu nennen.

Die klassischen metallischen Funktionswerkstoffe haben aufgrund ihrer charakteristischen elektrischen und magnetischen Eigenschaften schon relativ früh in Massenanwendungen Eingang gefunden, z.B. zur Stromübertragung oder zur Datenspeicherung in der Elektronik. Allerdings sind die Funktionsmetalle in vielen Anwendungen in besonderem Maße von der Substitution durch andere Werkstoffklassen bedroht. Dennoch gibt es hier eine Reihe vielversprechender neuer Entwicklungen. An erster Stelle sind die metallischen Magnetwerkstoffe zu nennen, wo in jüngerer Zeit Entdeckungen wie die hartmagnetischen Neodym-Eisen-Bor-Verbindungen oder die weichmagnetischen amorphen Metalle z.B. im Bereich der Elektromotoren genutzt werden. Auch die metallischen Supraleiter dürften trotz der inzwischen aufscheinenden Konkurrenz durch keramische Hochtemperatursupraleiter auf absehbare Zeit ihre Bedeutung behalten.

August 1996 Jürgen Kohlhoff

Kohlenstofffaserverstärkte Kohlenstoffe

Kohlenstofffaserverstärkte Kohlenstoffe (CFC), im englischen Sprachraum C/C genannt, sind Verbundwerkstoffe, bei denen Kohlenstofffasern in eine ebenfalls aus Kohlenstoff bestehende Matrix eingebettet sind. Der Typ der Fasern, ihre Orientierung und ihr Volumenanteil sowie das zur Fertigung des Verbundes verwendete Verfahren sind variierbar. Dadurch wird die Einstellung eines breiten Eigenschaftsspektrums und das Maßschneidern des Werkstoffs für bestimmte Anwendungen ermöglicht.

CFC zeigen bei Raumtemperatur kein Sprödbruchverhalten, so daß selbst geschädigte Bauteile unter Umständen mehrfach wiederbelastet werden können. Diese sog. Pseudoplastizität hat ihre Ursache in der relativ schwachen Faser-Matrix-Bindung, die eine gewisse Beweglichkeit der Faser in der Matrix und damit energieverzehrende Ableitungen an der Faser-Matrix-Grenzfläche ermöglicht. Aus dem gleichen Grund ist allerdings in zweidimensional verstärktem CFC die Querfestigkeit, also die Festigkeit senkrecht zur Faserebene, relativ gering.

Von allen technisch verfügbaren Strukturwerkstoffen haben CFC die mit Abstand beste Temperaturbeständigkeit. Ihre mechanische Festigkeit ist in Faserrichtung besonders hoch und fällt in nichtoxidierender Umgebung auch bei Einsatztemperaturen von über 2000°C nicht ab. CFC dringen damit in Temperaturbereiche vor, in denen andere langfaserverstärkte Keramiken aufgrund von Rekristallisationsprozessen auf Dauer nicht mehr einsetzbar sein werden, selbst wenn alle anderen Probleme bzgl. Herstellung und Anwendbarkeit gelöst sind. Im Gegensatz zu fast allen übrigen Materialien nimmt die Festigkeit von CFC mit steigender Temperatur sogar zu. Das liegt daran, daß bei höheren Temperaturen durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten eine festere Einbindung der Fasern in die Matrix erfolgt. Dadurch steigt allerdings gleichzeitig auch die Sprödigkeit des Materials wieder an.

Ein weiterer wichtiger Vorteil von CFC ist ihr besonders geringes spezifisches Gewicht, das je nach Typ ungefähr zwischen 1,3 und 2 g/cm^3 liegt. Erwähnenswert sind außerdem ihre beträchtlichen Korrosions-, Strahlungs- und Thermoschockbeständigkeiten.

CFC sind damit prädestiniert für besonders anspruchsvolle Aufgaben im Bereich des Leichtbaus und/oder der Höchsttemperaturanwendungen. So haben sie sich in einer Reihe von Bereichen inzwischen bereits etablieren können. Dazu zählen der Formenbau (für Hochtemperatur-Umformungen), der Ofenbau, die Glasfertigung, die Reaktortechnik, der Fahrzeug- und Flugzeugbau (z.B. für Bremsbeläge und -scheiben) sowie die Raketentechnik. Auch das Hitzeschild des amerikanischen Space-Shuttle besteht aus CFC.

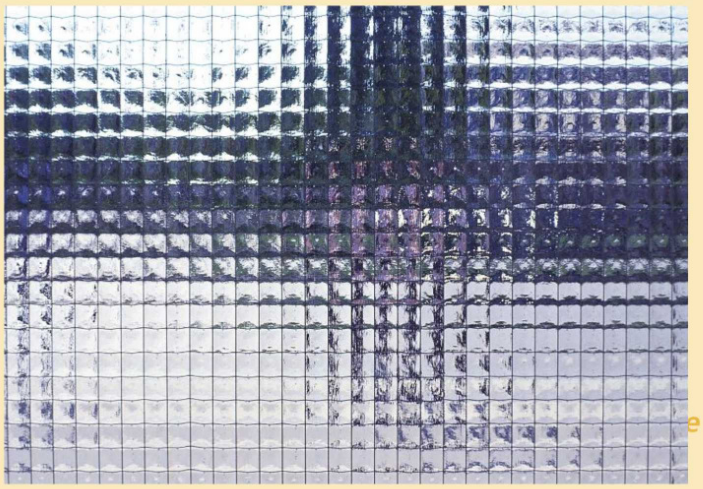
Trotz ihrer überragenden Eigenschaften werden Kohlenstofffaserverstärkte Kohlenstoffe bisher allerdings ausschließlich für Spezialanwendungen eingesetzt. Das liegt zum einen an dem heute noch sehr hohen und mit beträchtlichen Kosten verbundenen Fertigungsaufwand und zum anderen an einer Reihe von bisher ungelösten technischen Problemen, zu denen v.a. die Oxidationsanfälligkeit des Materials gerade bei hohen Temperaturen zählt.

Die Fertigung von CFC basiert auf der Herstellung von Faservorformlingen, wie man sie auch von den Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) kennt. Zur Imprägnierung gibt es heute im wesentlichen zwei Basisvarianten. Bei der einen wird Kohlenstoff aus der Gasphase abgeschieden. Die andere basiert auf der Tränkung des Fasermaterials mit flüssigem Harz oder Pech und dessen anschließender Verkokung. Bei der Flüssigphasenimprägnierung kann die Herstellung eines Bauteils unter industriellen Bedingungen mehrere Wochen dauern. Hier sind noch viele Fortschritte in der Prozeßführung und bei der Gestaltung der Ausgangsmaterialien nötig, um zu akzeptablen Bedingungen für die Fertigung größerer Serien zu kommen. Bei der Gasphasenimprägnierung sind zwar Prozeßzeiten von einigen Stunden möglich, doch eignet sich dieses Verfahren bis heute nur für Bauteile mit dünneren Wandstärken.

Neben der Entwicklung schnellerer Prozeßvarianten konzentrieren sich die Bemühungen insbesondere auf die Optimierung der interlaminaren Eigenschaften. Hier spielt die Verbesserung der Konzepte zur dreidimensionalen Verstärkung eine besondere Rolle. Wesentlich ist außerdem ein verbessertes theoretisches Verständnis sowohl des Materialverhaltens bei hohen Temperaturen als auch des Zusammenhangs zwischen den eingestellten Fertigungsparametern und den Bauteileigenschaften. Auch die experimentellen Verfahren zur Materialprüfung bei den hier interessanten Temperaturen müssen zum großen Teil noch entwickelt werden.

Das Hauptproblem stellt jedoch die schlechte Langzeitbeständigkeit von Bauteilen aus CFC bei Temperaturen von über 450°C in oxidierender Umgebung dar. Vorhandene Oxidationsschutzschichten ermöglichen im Prinzip Langzeiteinsätze bei Temperaturen von über 1200°C. Wirkliche Fortschritte gegenüber anderen hochtemperaturfesten Materialien sind aber erst durch die Entwicklung neuer Schutzsysteme möglich. Diese müssen eine ganze Reihe von Eigenschaften in sich vereinen. Zur Verhinderung der Sauerstoffdiffusion kommen beispielsweise noch thermodynamische Stabilität und chemische Inertheit gegenüber Kohlenstoff. Außerdem müssen sie soweit wie möglich mechanisch kompatibel mit dem Verbundkörper sein, damit es bei thermischen Zyklen möglichst nicht zu Rissen kommt. Derart unterschiedlichen Anforderungen sollen sog. Multilayerschichten genügen. Für einen wirklichen Dauerschutz kann außerdem eine Beschichtung der Fasern selbst nötig sein, z.B. mit keramischem Material. Denkbar ist auch die Kombination mehrerer Maßnahmen. Erst Erfolge auf diesem Gebiet werden es den CFC ermöglichen, die ihnen zugesprochene Schlüsselrolle für viele Höchsttemperaturanwendungen (z.B. im Gasturbinenbau) auch tatsächlich einzunehmen. Damit ist aber erst langfristig zu rechnen.

Juni 1996 Jürgen Kohlhoff



Materie & Energie

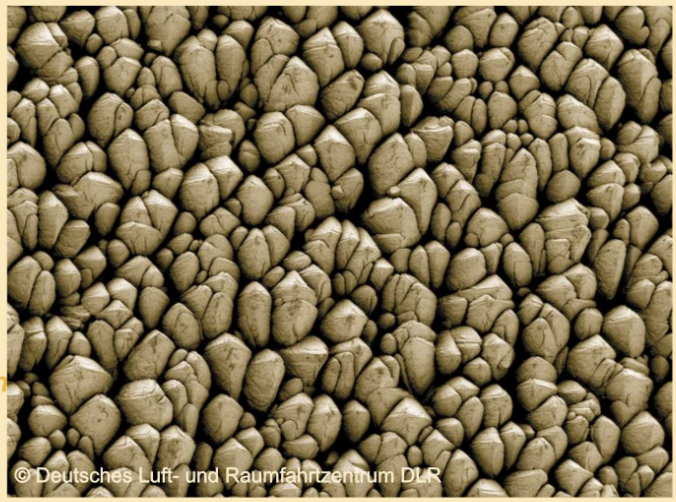
e & Energie

Materie & Energie

Materie & Energie

Materie & Energie

Materie & Energie

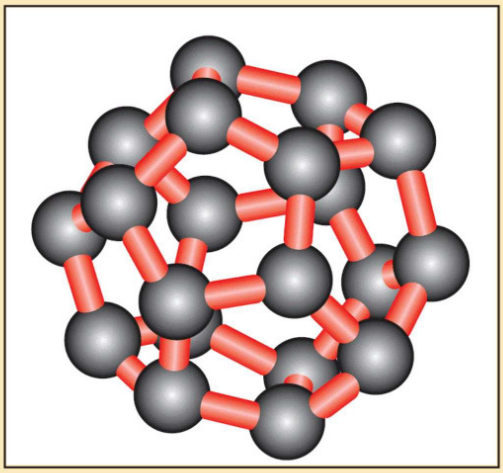


Materie & En

Materie & Energie

Materielle Strukturen

Metamaterialien	2009	
	2008	
	2007	
Smart Materials	2006	
Künstliche Muskeln	2005	
Intelligente Textilien		
Elektronisches Papier	2004	
Nanoröhren	2003	
	2002	Adaptive Fahrzeugstrukturen
	2001	
	2000	Werkstoffe im Leichtbau
Nanotechnik		Adaptronik
	1999	Mikrotechnologien
Fullerene	1998	
	1997	
	1996	



Metamaterialien

Als Metamaterialien (griech. méta = über, nach, neben) bezeichnet man bestimmte künstliche Strukturen, die aus speziell geformten technischen Bausteinen gebildet werden. Diese Grundbausteine lassen sich als „künstliche Atome" auffassen, die eine Art Kristallgitter bilden. Eine derartige Struktur erscheint gegenüber einer einfallenden (z.B. elektromagnetischen oder akustischen) Welle, deren Wellenlänge wesentlich größer ist als die Abstände der Gitterelemente, wie ein homogenes Medium. Sie kann daher als ein Werkstoff mit charakteristischen makroskopischen Eigenschaften (z.B. Permeabilität, Dielektrizitätskonstante oder Elastizitätsmodul) aufgefasst werden. Solche Materialien, die in der Natur nicht vorkommende neuartige Eigenschaften aufweisen sollten, wurden schon seit einigen Jahrzehnten theoretisch diskutiert. Seit wenigen Jahren können sie auch hergestellt werden, und es wurden erstaunliche Phänomene nachgewiesen.

Die derzeit bei weitem am häufigsten untersuchten Metamaterialien finden sich im elektromagnetischen bzw. optischen Bereich. Hier bestehen die Grundbausteine meist aus metallisch leitenden Werkstoffen, die von nicht leitendem Material umhüllt bzw. getragen sind. Die Formen reichen von Drähten über nicht geschlossene Ringe, U-Formen oder aufgerollte Mehrfachschichten bis hin zu kamm- oder fliegengitterartigen Strukturen. Auch beschichtete Kugeln oder Mehrfachschichtsysteme mit regelmäßigen Löchern sind möglich.

Grundsätzlich bestimmt die Größe der Basisstruktur den Wellenlängenbereich, in dem ein Metamaterial funktioniert. Die ersten Experimente wurden mit Mikrowellen durchgeführt, also mit elektromagnetischer Strahlung im Gigahertzbereich. Dort lassen sich Strukturgrößen im Millimeterbereich verwenden. Über den Bereich von Terahertz- und Infrarotstrahlung ist man inzwischen bis an den Rand des sichtbaren Spektralbereichs vorgedrungen. Dazu war die nanotechnologische Realisierung extrem kleiner, wohldefinierter Strukturen erforderlich.

Eine wichtige makroskopische Kenngröße eines Materials bildet der so genannte Brechungsindex. Er gibt an, wie stark ein Lichtstrahl beim Eintritt in den Werkstoff gebrochen wird. Für alle natürlichen Materialien hat der Brechungsindex einen positiven Wert. Durch geeignete Auswahl der Grundstrukturen, welche die künstlichen Atome eines Metamaterials bilden, ist es möglich, für dieses Material in einem bestimmten Wellenlängenbereich einen negativen Brechungsindex zu erreichen. Beim Eintreten in ein solches Medium wird Licht so gebrochen, dass es z.B. durch konkave Linsen gebündelt und durch konvexe Linsen gestreut wird. So erscheint z.B. ein Löffel, der in eine Tasse mit einer hypothetischen Flüssigkeit mit negativem Brechungsindex getaucht wird, als würde der untere Teil wieder aus der Flüssigkeit herausstehen.

Mithilfe von Metamaterialien mit maßgeschneidertem Brechungsindex ist eine Reihe von neuen Anwendungen denkbar. So lassen sich höchstauflösende Superlinsen konstruieren, welche die natürlichen Grenzen konventioneller Optik überwinden. Ihr prinzipielles Funktionieren konnte bereits nachgewiesen werden. Solche Superlinsen könnten die optische Mikroskopie, aber auch die optische Lithographie zur Herstellung mikroelektro-

nischer Bauteile bis in die Größenordnung von Nanometern vorantreiben. Sie könnten auch optische Speichermedien mit wesentlich erhöhter Speicherdichte ermöglichen. Ihre praktische Realisierung ist allerdings schwierig, da die benötigten elektrischen und magnetischen Eigenschaften über die ganze Größe eines Bauteils extrem präzise eingehalten werden müssen.

Mit dem gleichen Prinzip wie die perfekte Superlinse lässt sich auch eine perfekte Tarnkappe herstellen, welche die Strahlung so um ein Objekt herumleitet, dass es in einem engen Wellenlängenbereich nicht mehr „gesehen" werden kann. Das Funktionsprinzip wurde mit Mikrowellen bereits demonstriert. Für eine technische Verwendbarkeit, etwa zur Radartarnung, müsste man diesen Effekt aber gleichzeitig für einen breiten Spektralbereich und in allen Raumrichtungen realisieren.

Im Bereich der Kommunikations- und Funktechnik befinden sich Metamaterialien bereits an der Schwelle zum technischen Einsatz. Sie werden etwa zum Entkoppeln bzw. Abschirmen von Antennen und anderen Hochfrequenz-Bauelementen eingesetzt. Miniaturisierte Wellenleiter mit Abmessungen kleiner als die Wellenlänge, verschiedene weitere Wellenleiterkomponenten sowie miniaturisierte Richtantennen sind möglich.

Ein weiteres interessantes Anwendungsfeld vor allem in der Medizin ist die Magnetresonanz-Tomographie. Hier benötigt man Materialien, die das starke statische Magnetfeld nicht stören, aber das magnetische Radiofrequenz-Wechselfeld beeinflussen und fokussieren können. Dies lässt sich durch Metamaterialien verwirklichen, die aus nichtmagnetischen Werkstoffen aufgebaut sind und mit dem Wechselfeld in Resonanz treten können, also bei hohen Frequenzen magnetisch werden.

In der Zukunft könnten sich auch für optische Metamaterialien noch weitergehende Anwendungsmöglichkeiten ergeben. Erwartungen an einen praktischen Einsatz richten sich hier z.B. auf die Beschleunigung der Datenübertragung in Glasfasernetzen sowie auf die Verbesserung der Effizienz von Solarzellen. Allerdings dürfte die natürliche Grenze der Anwendbarkeit optischer Metamaterialien ungefähr im sichtbaren Wellenlängenbereich liegen, da hier in Richtung noch kleinerer Wellenlängen die Dämpfung drastisch zunimmt, so dass keine nutzbare Transmission mehr erreicht werden kann. Auch das Funktionieren akustischer Metamaterialien wurde im Prinzip bereits nachgewiesen. Sie könnten einmal für Ultraschallanwendungen in der Medizin, für die Sonartarnung, als Lärmschutz oder beim Erdbebenschutz Anwendung finden. Theoretisch berechnet wurden Metamaterialien für die Manipulation von Elektronenwellen, d.h. beispielsweise von elektrischen Strömen in Festkörpern.

November 2008 Matthias Grüne

Smart Materials

Das Konzept der Smart Materials ist über die letzten zwei Jahrzehnte als Weiterentwicklung multifunktionaler Werkstoffe entstanden. Diese zeigen neben ihrer rein mechanischen Stabilität noch mindestens eine weitere technisch nutzbare Eigenschaft, z.B. im sensorischen oder aktorischen Bereich. Bei Smart Materials kommt als neue Sichtweise hinzu, dass die entsprechenden Werkstoffe und Strukturen auf Änderungen in ihrer Umgebung selbstständig reagieren können und dadurch ihre eigene Funktionalität oder Überlebensfähigkeit deutlich verbessern.

Smart Materials können im wesentlichen vier quasi-intelligente Grundfunktionen erfüllen. Sie können fühlen bzw. wahrnehmen, agieren bzw. reagieren, Signale von einer in eine andere Form umwandeln (z.B. mechanisch in elektrisch) und mit ihrer Umgebung kommunizieren. Daraus ergibt sich neben anderen eine ganz zentrale Fähigkeit dieser Werkstoffe, das so genannte Health Monitoring - die Überwachung des Eigenzustands im Betrieb. Aus dieser dem bewussten Leben entlehnten Beschreibung von Eigenschaften leitet sich auch der im Deutschen für Smart Materials oft verwendete Begriff Intelligente Werkstoffe ab. Man findet sie bereits in vielfältigen Anwendungen, z.B. in erdbebengeschützten Hochhäusern und Brücken, in Tragflächen von Kampfflugzeugen oder in schwingungsdämpfenden Lagern von Maschinen und Antrieben.

Anhand ihrer technisch Nutzbarkeit unterscheidet man verschiedene Funktionsgruppen, in die sich die Smart Materials aufgliedern lassen. Zu den wichtigsten gehören piezoelektrische Werkstoffe, elektro- und magnetostriktive Materialien, Formgedächtnis-Werkstoffe, Faseroptische Sensoren und Funktionale Fluide.

Von großer technischer und wirtschaftlicher Bedeutung sind piezoelektrische Werkstoffe. Sie sind elektrische Isolatoren und wandeln mechanische Signale wie Druck oder Schwingungen in elektrische Signale und umgekehrt. Es handelt sich bei ihnen in der Regel um polykristalline Keramiken wie z.B. Blei-Zirkon-Titanat (PZT) mit einer typischen Auslenkung von 0,1 %. Ihre maximale Arbeitsfrequenz liegt im KHz-Bereich, die durch mechanische Einwirkung erzeugbaren Spannungen weit über 10000 Volt. Das piezoelektrische Verhalten ist linear, temperaturabhängig und verschwindet oberhalb der so genannten Curie-Temperatur, die für Keramiken zwischen ca. 150°C und 420°C liegt.

Neben polykristallinen keramischen Piezoelektrika gibt es schon lange piezoelektrische Einkristalle, wie z.B. Quarz als Frequenzgeber in Quarzuhren, und zunehmend auch polymere Piezoelektrika, die sich beispielweise gut in textilartige Flächen einarbeiten lassen. Hauptanwendungen sind Schwingungs- und Schalldämpfer, Stellglieder und Schrittmotoren mit atomar genauer Auflösung, sowie Frequenzgeber und Sensoren im hörbaren und Ultraschall-Bereich. Besonders zukunftsträchtig ist ihr Einsatz in der adaptiven Formgebung von Oberflächen. Hier wird z.B. an der gezielten Veränderbarkeit des aero- bzw. hydrodynamischen Profils von Flugzeugflügeln bzw. Schiffshüllen gearbeitet.

Elektro- und magnetostriktive Werkstoffe zeigen eine Längenänderung bei Anlegen eines elektrischen bzw. magnetischen Feldes. Da die Formänderung nicht linear mit dem angelegten Feld erfolgt, sind für technisch nutzbaren Auslenkungen bzw. Aktionskräfte

teils extrem hohe Feldstärken nötig. Allerdings bieten diese Werkstoffe bis zu 1% Auslenkung, also einen ca. 10-fach größeren Hub als Piezokeramiken. Wichtige elektrostriktive Aktorwerkstoffe sind Bleilanthanzirkonat-Titanate (PLZT) und Manganniobat-Bleititanat (PMN:PT). Das bekannteste magnetostriktive Material ist Terfenol-D, eine Legierung aus Terbium, Dysprosium und Eisen. Anwendungen finden sich in Schritt- und Stellmotoren, Schaltern sowie der Schwingungsdämpfung. Ein Einsatz als Stellmotor für Solarkollektoren von Satelliten wird aufgrund ihrer guten Tieftemperatureigenschaften erprobt.

Formgedächtnis-Werkstoffe sind Materialien, die entweder auf Einwirkung von Wärme oder eines Magnetfeldes hin ihre Geometrie erheblich und reversibel ändern können. Hierbei sind sowohl Ausgangs- wie auch Endform durch den Produkthersteller definierbar. Zu den seit längerem bekannten Formgedächtnislegierungen auf der Basis von Nickel und Titan, wie z.B. NITINOL, sind in jüngerer Zeit auch Polymerwerkstoffe hinzugekommen, die das Anwendungsspektrum dieser Smart Materials erheblich erweitern. Wichtige Anwendungen gibt es in der Aktorik, zunehmend aber auch in anderen Bereichen wie der Medizin, wo sie z.B. als Implantate Blutgefäße funktionsfähig erhalten.

Faseroptische Sensoren sind in der Regel aus Glas gefertigt. Sie reagieren auf mechanische Belastungen mit einer Änderung von Laufzeit oder Amplitude der eingespeisten Lichtimpulse. Aus der Signaländerung lässt sich der Ort einer Störung zentimetergenau lokalisieren. Glasfasern können mittels textiler Technologien wie Weben oder Stricken sehr einfach in technische Gewebe, wie z.B. Carbonfaser- oder Kevlargelege, einarbeitet werden, was sie zunehmend als Sensormaterial in Verbundwerkstoffen interessant macht. Eingesetzt werden sie derzeit z.B. als Belastungs- und Defektsensoren in weitspannenden Brücken oder anderen Bauwerken. Eine Zustandsüberwachung von Außenverkleidungsteilen von Flugzeugen und anderen Fahrzeugen wird erprobt. In vielen Anwendungen können Glasfasern also gleichzeitig tragende Funktion übernehmen und dem Health Monitoring dienen.

Funktionalen Fluide unterteilen sich in elektro- und magnetorheologische Flüssigkeiten. Bei ihnen lässt sich die Viskosität durch Anlegen eines elektrischen bzw. magnetischen Feldes innerhalb von Millisekunden reversibel variieren. Elektrorheologische Fluide benötigen hohe Spulenspannungen im Bereich von kV und eigenen sich nur zur Kompensation von Scherspannungen. Magnetorheologische Fluide benötigen Spulenspannungen im Bereich von 10 V, und ihre mechanische Belastbarkeit liegt ca. eine Größenordnung höher. Aus diesen Gründen werden bevorzugt letztere in Schwingungs- und Stoßdämpfung, z.B. in PKWs oder Hochhäusern, eingesetzt. Mobile Anwendungen, z.B. im Bereich Bremse oder Kupplung, werden untersucht.Das ideale Smart Material, welches alle vier Grundfunktionen (Wahrnehmen, Reagieren, Signalumwandlung und Kommunikation) aus sich heraus bietet, gibt es heute noch nicht. Sehr nahe kommt diesem Konzept allerdings schon der Halbleiterwerkstoff Silizium, aus dem sich hochintegrierte mikro-elektromechanische Bauteile (MEMS) herstellen lassen. Diese vereinen auf engstem Raum Sensorik, Aktorik und eine regelnde Intelligenz.

September 2005 Stefan Reschke

Künstliche Muskeln

Natürliche Muskeln von Menschen und Tieren bestehen aus Fasern, die von Bindegewebe umhüllt sind. Sie spielen eine wesentliche Rolle bei der Bewegung von Gliedmaßen und Körperteilen. Gesteuert durch Nerven sind bei natürlichen Bewegungen immer mehrere Muskeln beteiligt, die sich u.a. durch hohe Stellgeschwindigkeiten bei nichtlinearer Kraftentfaltung auszeichnen und sehr energieeffizient arbeiten. Der Versuch einer künstlichen Nachbildung dieser komplexen Abläufe bildet seit langem eine große Herausforderung für Wissenschaft und Technik. So hat sich unter dem Namen Aktuatorik (häufig auch Aktorik genannt) eine eigene Fachdisziplin entwickelt, die sich vor allem mit der Umsetzung elektrischer Steuersignale in Bewegungen technischer Systeme befasst. Aktuatoren spielen eine wichtige Rolle im Bereich der Robotik, da die Fähigkeit zur hinreichend gefühlvollen Manipulationen eine wesentliche Voraussetzung für viele zukünftige Roboternutzungen darstellt.

Einer der derzeit interessantesten Anwendungsfelder für Künstliche Muskeln bzw. Aktuatoren ist die Medizin. Neben bestimmten medizinischen Instrumenten wie Kathetern und minimal invasiven Manipulatoren ist hier vor allem die Prothetik zu nennen. Beim Einsatz von Prothesen kommt es insbesondere darauf an, diese autonom, d.h. ohne störende Zuleitungen implantieren zu können. Daher sind die herkömmlichen Lösungen auf der Basis rein mechanischer Manipulatoren wegen der erforderlichen umfangreichen Energiezuleitung wenig geeignet. Allerdings erfordern auch neuere Lösungen, die derzeit angebotenen werden, störende Zuleitungen. Beispiele sind pneumatische Formbalge oder sich verformende Schläuche oder Gele, in denen Magnetpartikel suspendiert sind, die durch Elektromagnete verformt werden. Einen entscheidenden Durchbruch im Bereich der Künstlichen Muskeln versprechen neuerdings eine Reihe von Entwicklungen, die sich im Wesentlichen auf den Einsatz so genannter Multifunktionaler Materialien abstützen.

Seit längerem bekannt ist die Gruppe der Elektrostriktiven Materialien, die beim Anlegen einer elektrischen Spannung eine Längenänderung erfahren. Bereits vielfach verwendet werden hier die piezoelektrischen Kristalle. Mit diesen sind allerdings in der Regel nur Längenänderungen in Bruchteilen eines Prozents erzielbar. Darüber hinaus benötigen sie hohe Spannungen bis in den Bereich von Kilovolt, was z.B. bei Körperimplantaten problematisch ist. Größere Längenänderungen erwartet man von ausspinnbaren, piezoelektrischen Polymerfäden.

Mit thermischer Steuerung arbeiten die so genannten metallischen Formgedächtnislegierungen (z.B. Nickel-Titan). Diese verändern sprunghaft ihre Gitterstruktur und damit auch ihre mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur. Daher lassen sie sich durch Veränderung der Temperatur zwischen zwei mechanischen Formen hin- und herschalten. Die erforderlichen Temperaturänderungen betragen je nach Werkstoff teilweise nur ca. zehn Grad. Im medizinischen Bereich untersucht man ihre Eignung für künstliche Herzklappen. Eine technische Anwendung in der Luftfahrttechnik ist die Verformung von Flügelprofilen, um Vorflügel oder Landeklappen zu vermeiden. Im U-Boot-Bau werden verformbare Propeller-Dukte untersucht, um die Steuerung über Strahlrich-

tungsänderungen vorzunehmen. Noch weiter gehen hier Versuche, den Heckbereich flexibel zu gestalten, um Schwimmbewegungen wie die eines Fisches zu erzeugen.

Ebenfalls für Künstliche Muskeln in Frage kommen die so genannten Nanoröhren. Dabei handelt es sich um zylindrische Strukturen mit Durchmessern im Nanometerbereich und Längen von bis zu einigen Millimetern. Um makroskopische Längenänderungen zu erreichen, werden die Röhren zu größeren fadenförmigen Einheiten zusammengefügt und diese wiederum zu Faser-Bündeln oder Faser-Papieren verarbeitet. Solche Aktuatoren bestehen daher aus Milliarden von einzelnen Röhren. Um diese elektrisch anregen zu können, muss sich das Bauteil in einem Elektrolyten befinden, z.B. einer Kochsalzlösung. Bei einer Spannung von nur wenigen Volt lässt sich so eine relative Längenänderung von bis zu 1% erreichen. Da ein solcher Kohlenstofffaser-Aktuator um ein Vielfaches zäher ist als das natürliche Vorbild, können damit auch wesentlich höhere mechanische Spannungen erzeugt werden.

Im medizinischen Bereich werden Anwendungen für Nanoröhren-Aktuatoren sowohl in der minimalinvasiven Chirurgie als auch ggf. in der Prothetik erwartet. Allgemein technische Anwendungen sieht man in Greifer-, Schließ- und Klappensystemen sowie Mikroventilen. Ein ähnliches Wirkungsprinzip wie Nanoröhren haben bestimmte nanoporöse Metallstrukturen (z.B. aus Platin). Auch hier werden die Poren zunächst mit einem Elektrolyten aufgefüllt, um anschließend durch Anlegen einer Spannung eine makroskopische Längenänderung des Bauteils zu erreichen.

Eine weitere aussichtsreiche Gruppe von Materialien für Künstliche Muskeln sind die so genannten Elektroaktiven Polymere (EAP). Ihr großer Vorteil ist, dass sie zur Verformung nur geringe Spannungen im Bereich weniger Volt und Energien im Milliwattbereich benötigen. Darüber hinaus erlauben sie im Gegensatz zu den metallischen Formgedächtnislegierungen eine kontinuierliche Verformung. Daher sind mit ihnen gefühlvolle und fließende Bewegungen erzielbar. Neben Anwendungen in der Prothetik erwartet man z.B. eine Medikamentenversorgung durch Implantate, bei denen EAPs die künstlichen Schließmuskeln darstellen, die auf Sensoransteuerung die momentan benötigte Dosis freigeben. Untersucht wird ihr Einsatz als Implantat in der Lederhaut des Auges, um die Entfernungsadaption bei Fehlsichtigkeit zu erreichen. Mögliche militärische Anwendungen sind der bereits o.g. fischartige U-Boot-Antrieb oder Exo-Skelett-Konzepte für Infanteristen.

Noch in den frühen Anfängen einer möglichen Nutzung als Künstliche Muskeln befinden sich Flüssigkristall-Elastomere, in die bestimmte Azo-Farbstoffe eingelagert sind. Sie bestehen aus ausgerichteten Molekülen und haben gummiartige Konsistenz. Eine makroskopische Verformung der Struktur ergibt sich hier unter Einwirkung von Licht, das zur Erwärmung und damit schließlich zu einer Längenänderung führt.

Februar 2005 Wolfgang Nätzker

Intelligente Textilien

Nach der über viele Jahrhunderte eher evolutionär verlaufenen Weiterentwicklung von Textilien gibt es gerade in jüngster Zeit eine Vielzahl von technischen Innovationen, die hier für die Zukunft zum Teil revolutionäre Fortschritte erwarten lassen. Die herausragende Rolle dabei spielen die so genannten Intelligenten Textilien. Diese weisen über die klassische Grundaufgabe (z.B. Wärmeisolierung) hinaus weitere Funktionalitäten auf, die bestimmte chemische, biologische oder physikalische Effekte nutzen. Hier ist etwa an die bekannten Klima-Membranen sowie an schmutzabweisende oder dermatologisch wirksame Ausrüstungen zu denken. Von zunehmender Bedeutung in diesem Bereich sind Textilien mit integrierten elektronischen bzw. informationstechnischen Funktionen, die als Smart Textiles oder Wearable Electronics bezeichnet werden.

Viele innovative Produktvorschläge sind noch relativ nahe am ursprünglichen Nutzwert von Textilien orientiert. Bei diesen gibt es eine Reihe von interessanten Einzelentwicklungen mit zum Teil bereits realisierter Marktfähigkeit. Dazu gehören temperaturregulierende Systeme auf der Basis von im Gewebe eingebetteten Mikrokapseln mit so genannten Phase Change Materials (z.B. Paraffin), die überschüssige Körperwärme aufnehmen und bei Bedarf wieder abgeben.

Die stärksten übergeordneten Impulse in diesem Bereich gehen von nanotechnologiebasierten Entwicklungen aus. So könnten in Zukunft Fasern aus Kohlenstoff-Nanoröhren (Nanotubes) eine wichtige Rolle spielen, z.B. auf Grund ihrer mechanischen Eigenschaften in Schutzwesten. Näherliegende Realisierungschancen haben Verbesserungen bei Knitterfreiheit, Abstoßung von Flecken bzw. Wasser, antistatischen Eigenschaften, Atmungsaktivität oder Verschleißfestigkeit von Textilien. Auch die Ausrüstung mit Depot-Materialien z.B. für pharmazeutische Wirksubstanzen ist hier zu nennen. Bei derartigen Anwendungen spielen oft Beschichtungen oder die Nutzung von an der Oberfläche modifizierten Fasern eine entscheidende Rolle. Teilweise sind die eingesetzten Methoden oder Werkstoffe umweltfreundlicher und gesundheitlich unbedenklicher als bisher genutzte Verfahren oder Materialien mit ähnlicher Wirkung. Hier gibt es bereits erste kommerzielle Produkte. Allerdings steht die endgültige Klärung eventueller gesundheitlicher Risiken von nanoskaligen Partikeln noch aus.

Am weitesten von der klassischen Nutzung entfernt ist die Ausrüstung von Textilien mit elektronischen bzw. mikrosystemtechnischen Komponenten im Bereich der Wearable Electronics. Auch hier gibt es eine Vielzahl von Konzeptvorschlägen bis hin zu ersten Realisierungen. Dazu gehört die zunehmende Integration von Informationsverarbeitungs- und Kommunikationsmodulen. Gearbeitet wird auch an der Implementierung einer umfangreichen Sensorik. Anwendungsmöglichkeiten sind z.B. die Ausrüstung mit Bürofunktionalitäten oder mit Unterhaltungselektronik. Ein interessantes Einzelprodukt ist die Kinderkleidung mit GPS-gestützter Fernortbarkeit. Besondere Bemühungen gibt es im medizinischen Sektor. Hier könnte in die Patientenkleidung eingebettete Technik die externe Verkabelung von Kranken auf der Intensivstation überflüssig machen. Auch der Gesundheitszustand zu Hause lebender älterer Menschen oder Pflegebedürftiger ließe

sich so aus der Ferne z.B. über die Messung der Herzfrequenz oder anderer Kreislaufwerte überwachen.

Neben der Lösung vieler technischer Einzelprobleme ist die Alltagstauglichkeit, wie z.B. die Eignung zum Waschen oder Bügeln, ein wesentliches Kriterium bei der großtechnischen Durchsetzung von Smart Textiles, aber auch von Intelligenten Textilien insgesamt. Daneben spielen die Kosten gerade im Bekleidungsbereich eine große Rolle, von speziellen professionellen Anwendungen z.B. im oben genannten medizinischen Bereich einmal abgesehen. Ein übergeordnetes Problem ist auch die Energieversorgung. Hier denkt man neben Hochleistungsakkumulatoren oder miniaturisierten Brennstoffzellen an Solarzellen oder an Thermogeneratoren, die Körperwärme nutzen. Sogar in die Schuhsohlen integrierte Umwandler von kinetischer in elektrische Energie werden diskutiert.

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal und außerdem ein Kriterium für die zeitliche Abfolge der zu erwartenden Entwicklungen im Bereich der Smart Textiles ist die Art und Weise, wie die Elektronik in die Kleidung integriert wird. In der ersten Stufe wird von „textiler Adaption" gesprochen. Dahinter verbirgt sich die Einbeziehung existierender Geräte wie Handy oder Walkman durch spezielle Taschen und die gesonderte Verkabelung der Komponenten in einem Kleidungsstück. Die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle ist dabei bedarfsgerecht ausgeführt, z.B. in Form von integrierten Displays oder Lautsprechern bzw. Mikrofonen. Die technische Realisierbarkeit dieses Ansatzes ist gegeben, zumal die zunehmende Miniaturisierung vieler Komponenten zu immer praxisgerechteren Lösungen beiträgt. Auch die im Beschaffungsgang befindliche Ausrüstung des Infanteristen der Zukunft mit adaptiertem Funkgerät und GPS, Personal Digital Assistant (PDA) mit digitaler Karte sowie digitaler Kamera gehört in diesen Bereich.

In der nächsten Stufe, der „textilen Integration", werden zwar weiterhin eigenständige elektronische Geräte in die Bekleidung eingebracht, Verbindungselemente wie Signalleitungen aber bereits in das Gewebe verwoben. In einem weiteren Schritt werden auch die Geräte selbst eingenäht und zusammen mit den Leitungen so gekapselt, dass sie mitgewaschen und -gebügelt werden können. Auch hier gibt es bereits prototypische Realisierungen.

In der letzten Stufe geht es dann um ausschließlich textilbasierte Systeme. Das bedeutet, es werden direkt elektronische oder sensorische Funktionen auf der Oberfläche oder innerhalb von Textilien realisiert. Eine Schlüsselrolle in diesem Szenario könnten elektrisch leitende oder halbleitende Polymere spielen. Dazu kommt die allgemein zunehmende Miniaturisierung digitaler Komponenten bis hin zur vorhergesagten Schrumpfung von Computern auf Staubkorngröße (Smart Dust). Diese wären natürlich leicht in Fasermaterialien zu integrieren. Smart Textiles würden damit gleichzeitig zum Ausfluss und zu einer der wichtigsten Voraussetzungen für die umfassende Realisierung des Konzeptes des allgegenwärtigen Computing (Ubiquitous Computing), das die elektronische Unterstützung des Menschen in allen Lebensbereichen beschreibt, unabhängig von Ort und Zeit. Damit ist aber frühestens in einigen Jahren zu rechnen.

August 2004 Jürgen Kohlhoff

Elektronisches Papier

Der gesamte Bereich der Displaytechnik war über viele Jahrzehnte wesentlich durch die Kathodenstrahlröhre geprägt. Insbesondere im Bereich der Computer- und TV-Monitore zeichnet sich in jüngster Zeit ab, dass diese Technik zunehmend durch eine Reihe vielversprechender Entwicklungslinien wie Flüssigkristall-, Plasma- und Dünnfilm-Transistor-Technologie verdrängt wird. Parallel hierzu gibt es schon seit langem beträchtliche Forschungsanstrengungen, die Möglichkeiten der elektronischen Informationsverarbeitung mit den Vorteilen des „klassischen" Informationsträgers Papier zu verbinden. Unter diesem als Elektronisches Papier bezeichneten Konzept versteht man ein papierähnliches, portables und wiederverwendbares Speicher- und Displaymedium, das wiederholt mit elektronischen Mitteln beschrieben werden kann. Im Prinzip handelt es sich um dünne flexible Folien, in denen farbige Pigmente mittels elektrischer Felder ausgerichtet werden. Elektronisches Papier soll z.B. für elektronische Bücher, Zeitungen, Zeitschriften und Schilder, aber auch für Computerdisplays einsetzbar sein.

Nach den ersten Ansätzen vor ca. 30 Jahren gibt es seit ca. 1990 ernsthafte Entwicklungsbemühungen verschiedener konkurrierender Firmen, die in absehbarer Zeit zu ersten marktgängigen Produkten führen dürften. Dabei scheinen derzeit zwei relativ ähnliche Technologielinien am vielversprechendsten zu sein. Zum einen gibt es die so genannte Gyricon-Technologie (Kunstwort aus Gyros = Drehen, Icon = Bild). Sie basiert auf einer dünnen, transparenten Trägerfolie, in die in einer Flüssigkeit schwimmende etwa 50 Mikrometer große Kugeln eingelassen sind. Die Kugeln sind jeweils halbseitig verschiedenfarbig (z.B. weiß/schwarz) und sind gleichzeitig als elektrische Dipole ausgelegt. Beim Anlegen eines elektrischen Feldes richten sich die Kugeln so aus, dass eine der beiden Seiten nach oben zeigt. Durch die entsprechende Strukturierung des Feldes lassen sich so verschiedene Muster (z.B. Buchstaben) erzeugen, die auch nach Abschaltung des Feldes erhalten bleiben. Gyricon bleibt daher ohne Stromaufnahme lesbar, kann aber jederzeit neu beschrieben werden. Damit vereint es die Vorteile von Papier mit denen eines Computerdisplays. Es ist dünn, flexibel, kann unabhängig vom Blickwinkel gut abgelesen werden, benötigt keine Hintergrundbeleuchtung und ist wiederbeschreibbar. Die gegenwärtig realisierte Auflösung beträgt etwa 100 dpi. Das zum Beschreiben erforderliche externe elektrische Feld kann durch einen elektrisch geladenen Stift oder durch ein druckerähnliches Gerät erzeugt werden. Eine mögliche Weiterentwicklung besteht in pixelweise ansteuerbaren aktiven Displays, die mit (flexiblen) organischen Transistoren funktionieren.

Das konkurriende, als E-Ink bezeichnete Konzept basiert auf einer Folie, die durchsichtige Kapseln von 50-100 Mikrometern Durchmesser enthält. Die Kapseln sind mit einer schwarzen Flüssigkeit gefüllt, die weiße geladene Titandioxid-Teilchen enthält. Mit Hilfe eines angelegten elektrischen Feldes werden die Teilchen an die Oberfläche gebracht, wo sie ein der Feldstruktur entsprechendes Muster bilden, das bei Abschalten des Feldes erhalten bleibt. In einer weiteren Version sind schwarze und weiße, unterschiedlich geladene Teilchen in einer transparenten Flüssigkeit enthalten. Je nach Feldrichtung ordnen sich dann weiße oder schwarze Teilchen an der Oberfläche an. Erreicht wird damit eine

Auflösung von etwa 150 dpi. Die Reflexionsrate und der Blickwinkel sind mit denen von Gyricon vergleichbar und entsprechen fast denen einer Tageszeitung. Bei E-Ink ist darüber hinaus eine gegenwärtig noch unflexible Transistorstruktur mit aufgebracht, so dass die Inhalte aktiv gewechselt werden können. Diese Dünnfilm-Transistoren können auf ihrer Oberfläche positive oder negative Ladungszustände darstellen, so dass sich damit die gewünschten Feldstrukturen realisieren lassen.

Gyricon soll zunächst vor allem im Handel zum Einsatz kommen. Preis- und Werbeschilder sind für erste Anwendungen gut geeignet, weil die Anforderungen an die Auflösung nicht besonders hoch sind und andererseits der häufig erforderliche Wechsel der Inhalte mit aktiven Displays einfach zentral gesteuert werden kann. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass die Preise im Kassensystem und an den Regalen übereinstimmen. E-Ink ist ebenfalls zunächst in einigen Supermärkten in Form solcher Schilder getestet worden. Künftig soll der Schwerpunkt aber stärker auf der Displaytechnik im Bereich der Handheld-Computer liegen. Im Vergleich mit LCDs liegen die Vorteile dieser Technologie neben den geringeren Herstellungskosten im deutlich reduzierten Energiebedarf und der besseren Lesbarkeit. Die Standzeit eines Bildes beträgt ohne Energiezufuhr etwa zehn Minuten. Als Lebensdauer werden zehntausend Stunden angegeben.

Auch an der Realisierung von farbtüchtigem elektronischem Papier wird derzeit gearbeitet. Ein erster Prototyp existiert bereits, allerdings wird mit der Marktreife erst in einigen Jahren gerechnet. Hier werden die Farben mit über dem Display liegenden Farbfiltern für die drei Grundfarben erzeugt, ähnlich wie bei Flüssigkristallanzeigen. Darüber hinaus gibt es aber auch noch andere Entwicklungen, die auf elektrochromen Molekülen basieren. Hier ist eine Markteinführung vorläufig noch nicht in Sicht.

Neben den bereits oben genannten Beispielen lassen sich mit Elektronischem Papier noch weitere Anwendungsoptionen erschließen. So könnte z.B. bei Integration entsprechender Sensoren Kleidung hergestellt werden, die sich selbsttätig in Farbe und Muster der Umgebung anpasst. Gleiches gilt für die Oberfläche von Fahrzeugen oder anderen Gegenständen. Die aussichtsreichste Anwendung für elektronisches Papier liegt aber bei Displays in mobilen Geräten, da auf diese Weise das Problem des zu großen Energiebedarfs der bisher üblichen Displays gelöst ist. Ungünstig sind gegenwärtig noch die Schaltzeiten von ca. 250 ms, mit denen sich z.B. die Vision einer Zeitung mit bewegten Bildern nicht realisieren lässt. In jüngster Zeit gibt es allerdings Erfolgsmeldungen über eine neue Technologie, deren Schaltzeiten von etwa 10 ms in der Größenordnung heutiger LCDs liegt. Dieses „Electrowetting“ genannte Konzept basiert auf der elektrischen Steuerung der optischen Transparenz von mit Wasser-Öl gefüllten kleinen Kapseln.

März 2004 Hans-Georg Zach

Nanoröhren

Als Nanoröhren werden zylindrische Strukturen mit Durchmessern zwischen weniger als einem und mehreren hundert Nanometern bezeichnet. Sie erreichen Längen von einigen zehn Nanometern bis zu einigen Millimetern. Das Interesse an solchen Strukturen wurde mit der Entdeckung von röhrenförmigen Kohlenstoffstrukturen im Nanometerbereich und der nachfolgenden Untersuchung ihrer erstaunlichen Eigenschaften geweckt. Sie bestehen aus einem Gerüst aus Kohlenstoff-Sechsecken – etwa so, als würde man eine Graphitschicht biegen und zu einem Zylinder zusammenfügen. Ihre Enden sind meist halbkugelförmig geschlossen. Möglich sind sowohl ein- als auch mehrwandige Zylinder. Alle diese Konfigurationen sind letztlich Derivate der seit über zehn Jahren bekannten Fullerene.

Inzwischen gibt es auch Nanoröhren, die aus anderen Grundbausteinen als Kohlenstoff bestehen, wie z. B. Bornitrid oder verschiedene Metall-Verbindungen. Vor kurzem wurden auch Nanoröhren aus Polymeren vorgestellt, die allerdings dickere Wände (ca. 20 Nanometer) und eine amorphe Struktur besitzen. Ihr Vorteil besteht darin, dass den Polymeren verschiedene Stoffe beigemischt werden können, um die Eigenschaften der Röhren für unterschiedliche Anwendungen zu modifizieren.

Derzeit werden die meisten Nanoröhren über eine Gasphasenabscheidung unter Beteiligung eines metallischen Katalysators hergestellt. Mit neueren solchen Verfahren lassen sich auch größere Mengen von Kohlenstoff-Nanoröhren (mehrere Kilogramm pro Tag) gewinnen. Zur Herstellung von Polymer-Nanoröhren benutzt man Schablonen aus dünnen Silizium- oder Aluminiumoxid-Plättchen, die lithographisch erzeugte Poren von etwa 100 Nanometer Durchmesser enthalten.

Bei weitem am intensivsten wurden bisher die Kohlenstoff-Nanoröhren untersucht. Sie verfügen über mechanische, elektrische und thermische Eigenschaften, die sie für verschiedene Anwendungen außerordentlich interessant machen. So sind sie sehr biege- und zugfest und dabei praktisch ermüdungsfrei, nehmen also stets ihre ursprüngliche Form wieder an, wenn keine Kraft mehr auf sie einwirkt. Sie haben hohe Temperaturresistenz, hohe Wärmeleitfähigkeit, geringen elektrischen Widerstand und können, je nach atomarer Anordnung, auch halbleitend sein.

Da sie zudem ein niedriges spezifisches Gewicht besitzen, sind Kohlenstoff-Nanoröhren für Komposite eine Alternative zu Glasfasern oder herkömmlichen Kohlefasern. Darüber hinaus lassen sich durch die Beimengung von Kohlenstoff-Nanoröhren auch die elektrischen und Wärmeleitungseigenschaften eines Werkstoffs in weiten Grenzen einstellen. Um die mechanischen Eigenschaften der Nanoröhren in einem Komposit zur Wirkung kommen zu lassen, ist allerdings eine enge Verbindung mit dem Matrixmaterial (z.B. Polymer) und eine möglichst homogene Verteilung erforderlich. Eine chemische Bindung der Röhren an das Matrixmaterial lässt sich erreichen, indem gezielt Defekte in die Röhren eingebaut werden, wodurch sich allerdings wiederum ihre Eigenschaften ändern. Die feste mechanische Bindung ist aber auch erreichbar, wenn die Matrixmoleküle die Röhren schraubenartig umschlingen.

Eine Vielzahl von Anwendungen der Kohlenstoff-Nanoröhren in der Elektronik und Elektrotechnik zeichnet sich bereits heute ab. Hierbei gilt das besondere Interesse den elektronischen Eigenschaften, da die weitere Miniaturisierung der herkömmlichen Silizium-Schaltungstechnik im Laufe des nächsten Jahrzehnts an prinzipielle Grenzen stoßen wird. So ist es vor kurzem gelungen, ein logisches Element (NOT-Gatter) mit Nanoröhren zu realisieren. Allerdings ist noch nicht absehbar, ob auf diesem Wege komplizierte elektronische Schaltungen, wie sie z.B. in Prozessoren zu finden sind, realisiert werden können, ganz zu schweigen von der Entwicklung massenproduktionstauglicher Technologien. Ihren ersten Einsatz in elektronischen Schaltkreisen werden Kohlenstoff-Nanoröhren wahrscheinlich zur elektrischen Verbindung von Bauelementen auf Chips haben. Wegen der hohen Leitfähigkeit hofft man, wesentlich höhere Taktraten und Leistungsdaten als bisher zu erreichen.

Wegen ihrer elektrischen und geometrischen Eigenschaften sind Kohlenstoff-Nanoröhren auch für Feldemissions-Anwendungen sehr geeignet. Ordnet man die Röhren senkrecht zur Oberfläche einer Kathode an, so werden bei Anlegen einer genügend hohen Spannung an den Röhrenspitzen, an denen aus geometrischen Gründen sehr hohe Feldstärken auftreten, Elektronen emittiert. Es existieren bereits erste Muster von Flachbildschirmen, die auf diesem Prinzip beruhen. Feldemissions-Kathoden für Röntgenröhren, bei denen es auf hohe Strahlströme ankommt, wurden ebenfalls schon realisiert. Bereits weit verbreitet sind Nanoröhren als Sondenspitze in Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskopen.

Bei Anlegen einer elektrischen Spannung ziehen sich Kohlenstoff-Nanoröhren zusammen, analog der Bewegung einer Muskelfaser. Einsatzgebiet solcher Nanoaktoren könnte die Nanorobotik sein. In den letzten Jahren gab es auch zahlreiche Versuche, Kohlenstoff-Nanoröhren für die Speicherung von Wasserstoff zu nutzen. Die ursprünglich utopisch hohen Erwartungen eines Speichervermögens von 75% Gewichtsanteilen Wasserstoff wurden inzwischen auf realistischere 8-10% reduziert. Erreicht worden sind bisher allerdings erst 2%.

Falls es gelingt, Nanoröhren zu längeren Fäden zu „verspinnen“, bieten sich weitere, vielversprechende Anwendungen dieser Technologie an. So könnten Bekleidungsstücke mit ausgezeichneter Abschirmwirkung gegen elektromagnetische Strahlung durch die Nutzung der elektrischen Eigenschaften bei gleichzeitigem ballistischen Schutz durch die Nutzung der mechanischen Eigenschaften hergestellt werden.

Januar 2003 Hans-Georg Zach

Adaptive Fahrzeugstrukturen

Als adaptiv bezeichnet man Fahrzeugstrukturen, die sich quasiintelligent an wechselnde Einsatzbedingungen anpassen. Diese Anpassungen erfolgen in Echtzeit oder nahezu Echtzeit über Sensoren, Aktoren (Stellelemente) und Regler, die in die Struktur des Fahrzeugs integriert sind. Konzepte zur aktiven Formsteuerung der Fahrzeugstruktur finden sich sowohl bei den Luftfahrzeugen zur Optimierung der aerodynamischen Eigenschaften als auch zur Verbesserung der Hydrodynamik bei Schiffen und Unterseebooten. Außerdem eignen sich adaptive Strukturen zur Vibrationsunterdrückung bei Land-, See-, Luft- und Raumfahrzeugen.

Bei den eingesetzten Materialien geht der Trend von Strukturwerkstoffen mit herkömmlichen Stellgliedern hin zur Verwendung multifunktionaler Werkstoffe mit integrierter Aktorfunktion. Typische Vertreter dieser heute auch als „Smart Materials" bzeichneten Werkstoffklasse sind die Formgedächtnislegierungen, bei denen es in Abhängigkeit von der Temperatur oder neuerdings auch eines äußeren Magnetfelds zu einer Umwandlung der inneren Struktur und damit der äußeren Form kommt, oder die piezoelektrische Keramiken bzw. Polymere. Weiterhin wird die Verwendung von elektro- und magnetostriktiven Materialien sowie elektro- und magnetorheologischen Flüssigkeiten und Elastomeren diskutiert. Als Sensoren verwendet man in adaptiven Strukturen im wesentlichen Faseroptiken sowie piezoelektrische Keramiken und Polymere.

Das derzeitige Hauptinteresse für den Einsatz adaptiver Strukturen gilt den Luftfahrzeugen. So läßt sich durch die aktive Beeinflussung der Umströmung eines Flugzeuges zum einen eine Anpassung an unterschiedliche Flugbedingungen erreichen, zum anderen ist das Aufrechterhalten laminarer Strömung und insbesondere die Vermeidung von Schockwellen möglich. Mit solchen Maßnahmen kann das Verhältnis von Auftrieb zu Windwiderstand verbessert, die Geräuschentwicklung verringert und die Manövrierfähigkeit erhöht werden.

Erste Umsetzungen dieses Konzeptes wird es im Passagierflugzeugbereich geben, wo eine Tragfläche entwickelt wird, die über eine elastische Hinterkante die Krümmung und damit den Auftrieb stufenlos ändern kann. Dadurch kann der Auftrieb kontinuierlich an die Anforderungen von Start, Aufstiegsphase, Reiseflug, Sinkflug, Landung und die Änderung des Flugzeuggewichts durch Verbrennung von Treibstoff angepasst werden. Im Vergleich zu einer weniger flexiblen Konfiguration mit ausfahrbaren Klappen für Start- und Landephase kann der Windwiderstand und somit der Treibstoffverbrauch merklich reduziert werden. Da moderne Verkehrsflugzeuge nahe der Schallgrenze verkehren, kann die an der Oberseite einer Tragfläche strömende Luft unter Umständen Schallgeschwindigkeit erreichen, was zu so genannten Verdichtungsstößen mit sich abrupt änderndem Auftrieb und erhöhtem Luftwiderstand führt. Durch eine adaptive örtliche Modifikation an der Flügeloberseite, eine so genannte Konturbeule, die die Luft gezielt abbremst, lässt sich dieser Effekt deutlich mindern.

Für Kampfflugzeuge wurden bereits adaptive Flügelvorderkanten und komplett verformbare Tragflächenoberseiten untersucht. Weiterhin wäre es durch eine über die Flügel-

spannweite variierbare Tragflächenkrümmung möglich, die Verteilung der Auftriebskräfte manöverabhängig so zu verschieben, dass das auf die Tragfläche wirkende Biegemoment verringert wird. Mit solchen Maßnahmen ließe sich die Manövrierfähigkeit deutlich erweitern.

Kampfflugzeuge, in deren Flugprofil Geschwindigkeiten im Unterschall- und Überschallbereich sowie stark unterschiedliche Flughöhen und Anstellwinkel vorkommen, könnten missionsabhängig die Geometrie der Lufteinlässe ihrer Strahltriebwerke ändern. Im Vergleich zu starren Systemen erwartet man bei einem typischen Missionsprofil eine um mehr als 20 % höhere Reichweite. Die adaptiven Lufteinlässe könnten bei Bedarf auch so verformt werden, dass sich der Radarquerschnitt des Flugzeuges verringert.

Derzeit wird an Hubschrauber-Rotorsystemen aus Kompositmaterialien mit piezoelektrischen Fasern gearbeitet, die durch individuelle adaptive Verwindung und Verwölbung der Rotorblätter die geschwindigkeitsabhängige aerodynamische Effizienz erhöhen. Durch Vermeidung der beim schnellen Vorwärtsflug entstehenden lokalen Überschalleffekte an den sich in Flugrichtung bewegenden Blattspitzen könnte darüber hinaus die Maximalgeschwindigkeit von Hubschraubern weiter angehoben werden.

Durch Vibrationsunterdrückung mit aktiven Strukturen lässt sich das Innen- und Außengeräusch eines Fahrzeuges vermindern. Dies geschieht bei Flugzeugen z.B. an Tragflächen und Triebwerken, bei Drehflüglern vor allem an den Rotorblättern und am Getriebe. Bei fahrzeugmontierten Rohrwaffen lässt sich die Treffgenauigkeit mit aktiven Halterungen merklich steigern. Für U-Boote und Torpedos spielt die Vibrationsunterdrückung nicht nur zur Signaturreduktion eine Rolle, sondern auch zur Verringerung von Störungen des eigenen Sonars.

Überlegungen zu variablen Außenhüllen von Über- und Unterwasserschiffen sind derzeit noch von spekulativer Natur. Gerade bei U-Booten sind jedoch im Sinne einer besseren Antriebseffizienz und zur Verringerung des Kielwassers Maßnahmen zur Strömungsoptimierung im Heck- und Antriebsbereich besonders interessant.

Generell dürfte der Einsatz adaptiver Strukturen vor allem im Flugzeug- und Hubschrauberbau zu einer Steigerung der Leistungsfähigkeit, Stabilität und Sicherheit führen. Mit einer Einführung erster adaptiver Komponenten zur Verbesserung der Aerodynamik ist, vor allem in Verbindung mit hochintegrierten Steuerungssystemen, bereits in naher Zukunft zu rechnen. Große technologische Herausforderungen liegen noch im Bereich der Herstellung leistungsfähigerer Piezoelemente und in der preisgünstigen Fertigung von belastbaren Strukturmaterialien mit integrierten Sensoren, Aktuatoren, Daten- und Stromleitungen. Daher ist bis auf weiteres nicht mit der Realisierung von visionären Systemen zu rechnen, wie es z.B. ausschließlich mit adaptiven Strukturen gesteuerte Luftfahrzeuge wären.

August 2001 Ulrik Neupert

Werkstoffe im Leichtbau

Die Bedeutung des technischen Leichtbaus hat in den letzten Jahren ständig zugenommen. Ursache ist in erster Linie der Energieverbrauch, der mit der Bewegung (genauer: der Beschleunigung) eines Systems verbunden ist. Darüber hinaus hängt auch die Fähigkeit, plötzliche Bewegungsänderungen in einer erwünschten minimalen Zeit überhaupt durchführen zu können, von der Nutzung möglichst leichter Bauteile ab. Diese Tatsache ist besonders wichtig für spezielle Anwendungen des Maschinenbaus.

Gewichtseinsparungen sind erreichbar durch konstruktive Maßnahmen, die z.B. aufgrund einer ausgeklügelten Formgebung die Einsparung von Material ermöglichen. Den gleichen Effekt hat eine Erhöhung der spezifischen Festigkeit und Steifigkeit des verwendeten Werkstoffs. Eine besondere Rolle spielt der Einsatz möglichst leichter, also ein möglichst geringes spezifisches Gewicht aufweisender neuer Werkstoffe. Von Bedeutung für die Praxis ist dabei, daß diese natürlich ebenfalls die primären Leistungsanforderungen insbesondere an die mechanischen Eigenschaften, aber auch an Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Recyclingfähigkeit erfüllen müssen. Auch die Kosten spielen eine wesentliche Rolle.

So kommt es beispielsweise, daß im Automobilbau trotz eines relativ hohen spezifischen Gewichts von knapp 8 g/cm^3 auch in Zukunft Stähle eingesetzt werden. Das gilt erst recht, als es auch im Stahlbereich eine ganze Reihe vielversprechender Innovationen gibt. Erwähnenswert ist hier die Technologie der sog. Tailored Blanks. Dabei handelt es sich um miteinander verschweißte Blechtafeln mit unterschiedlichen Dicken und Werkstoffgüten. Sie dienen zur Fertigung von Bauteilen, deren Eigenschaftsverteilung möglichst optimal an die jeweiligen Anforderungen angepaßt ist und damit unnötiges Gewicht vermeidet.

Leichtmetalle wie Aluminium oder Magnesium haben bei gleichem Volumen nur ca. ein Drittel bzw. ein Fünftel des Gewichts von Stahl. Aluminium ist inzwischen zu einer praktikablen Alternative auch im Automobilbau geworden, hat aber noch Nachteile bei den Kosten und der Recyclingfähigkeit. Vor allem für den Flugzeugbau interessant sind Aluminuim-Lithium-Legierungen. Bereits heute bestehen einige Bauteile des Airbus A340 aus diesem Werkstoff. Seine weitere Verbreitung wird wesentlich durch die Entwicklung der Fertigungsverfahren bestimmt, wobei insbesondere die Reaktivität des Lithiums Probleme bereitet.

Ein wesentliches Problem bei der Verwendung von Magnesiumlegierungen ist die Eigenkorrosion. Eine Lösung bieten hier neue hochreine Legierungen mit minimalen Eisen-, Nickel- oder Kupferanteilen. Auch die Verbreitung von Titanlegierungen dürfte in Zukunft weiter wachsen, trotz der bisher noch hohen Kosten. Titan hat im Vergleich zu anderen Leichtmetallen eine hohe Festigkeit auch bei hohen Temperaturen und eine gute Korrosionsbeständigkeit.

Ein relativ neues pulvermetallurgisches Herstellungsverfahren ermöglicht heute die praktikable Einsetzbarkeit geschäumter Metalle. Deren Dichte kann durch gezieltes Einbringen von Poren noch einmal deutlich unter dem Wert der benutzten Grundwerkstoffe

liegen und bei Verwendung von Leichtmetallen wie Aluminium weniger als 1 g/cm^3 betragen. Eine wehrtechnisch interessante Anwendungsmöglichkeit für Schaummetalle wäre z.B. ihre Nutzung als versteifende Elemente in Fahrbahnplatten von Pionierbrücken.

Die von Hause aus leichtesten Werkstoffe mit typischen spezifischen Gewichten zwischen 1 und 2 g/cm^3 sind die Polymere. Für den Bereich der Strukturwerkstoffe sind vor allem die Flüssigkristallpolymere interessant, deren anisotroper molekularer Aufbau selbstverstärkende Eigenschaften zur Folge hat. Ihr größtes Anwendungspotential ist zunächst in der Elektrotechnik gegeben, sie sind aber auch für tragende Teile im Automobil- und Flugzeugbau geeignet.

Eine wesentliche Rolle spielen Polymere als Matrixmaterial in Verbundwerkstoffen. Die wichtigsten Fasern bestehen aus Glas, Aramid oder Kohlenstoff. Damit sind extrem leistungsfähige maßgeschneiderte Bauteile herstellbar, heute bereits auch mit einer Verstärkung in allen drei Dimensionen. So bilden Kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe 40% der Strukturmasse und 70% der Oberfläche des neuen Jagdflugzeuges EF 2000. Aufgrund der teilweise äußerst hohen Kosten richten sich die Bemühungen primär auf eine Automatisierung der Fertigung. Verbundwerkstoffe auf der Basis von Keramiken, Metallen oder Kohlenstoff werden ebenfalls eingesetzt bzw. entwickelt.

Das ideale Leichtbauteil würde aus einem Grundwerkstoff mit geringem spezifischem Gewicht bestehen und an jedem Ort seines Volumens und zu jeder Zeit über die gerade benötigte Festigkeit und Steifigkeit verfügen. Damit würde die durchgängige Implementierung nicht überall und nicht immer benötigter Eigenschaften und damit jedes Übergewicht vermieden. Dies könnten Intelligente Werkstoffe leisten, die z.B. ihre Form und damit die Festigkeit in einer bestimmten Richtung in Abhängigkeit von den Einatzbedingungen ändern. Derartige Konzepte stehen aber erst am Anfang der Entwicklung. Mit ihrer umfassenden Realisierung ist allenfalls langfristig zu rechnen.

Die Wehrtechnik spielt im Bereich des Leichtbaus immer noch eine Vorreiterrolle, vor allem im Hinblick auf die extremen Leistungsanforderungen beim Bau von Kampfflugzeugen, aber auch für andere fliegende Systeme wie Flugkörper, Hubschrauber und Satelliten. Bei Wasser- und Landfahrzeugen ist ebenfalls das Bemühen vorhanden, Gewicht einzusparen. Für letztere spielt vor allem die durch die neuen Aufgaben der Streitkräfte begründete Forderung nach Luftverlastbarkeit eine Rolle.

August 1999 Jürgen Kohlhoff

Nanotechnik

Als Nanotechnik bezeichnet man die Herstellung, Untersuchung und Anwendung von Strukturen, Schichten und Oberflächen, deren kritische Abmessungen und Toleranzen von einigen zehn Nanometern bis hinab zu atomaren Größenordnungen (0,1 nm) reichen. Sie befindet sich im Gegensatz zur Mikrotechnik, d.h. der Fertigung von Strukturen im Bereich zwischen 100 und ca. 0,1 µm, noch weitgehend im Forschungsstadium. Aufgrund der zu erwartenden herausragenden Eigenschaften hinsichtlich einer Reihe von wichtigen technischen Leistungsgrößen wie Präzision, Integration, Kapazität oder Miniaturisierung eröffnet die Nanotechnik ein enormes Anwendungspotential. Daher gibt es derzeit sehr viele Überlegungen und Vorschläge für mögliche Innovationen auf der Basis dieser Technik.

Am weitesten fortgeschritten sind die Technologien zur Bearbeitung von Oberflächen mit Nanometer-Präzision (Ultrapräzisionsbearbeitung), die vor allem in der Optik von Bedeutung sind. Ein wichtiges Teilgebiet der Nanotechnik befaßt sich mit der Herstellung ultradünner Schichten. Da die Funktionen vieler Objekte wesentlich von den Eigenschaften der Oberfläche bestimmt werden, lassen sich auf diesem Wege viele Produkte an die gewünschten Anforderungen anpassen. Auch die Untersuchung und Herstellung der Eigenschaften von Partikeln mit Nanometerabmessungen sowie die damit unmittelbar verknüpften Nanopulver und Nanostrukturierten Materialien werden heute zur Nanotechnik gezählt.

Die größte Entwicklungsdynamik für die Erschließung des Nanobereiches geht derzeit von der Elektronik aus, wo man bei der aktuellen Chipproduktion bereits Strukturen im Sub-µ-Bereich erzeugt. Da das Ende der klassischen Photolithographie bei ca. 0,1 µm erreicht wird, besteht bei Beibehaltung der derzeitigen Generationenfolge bereits im nächsten Jahrzehnt der Bedarf an neuen Lithographietechniken im Bereich 1-100 nm. Allerdings zeigt sich, daß einige wesentliche physikalische Voraussetzungen makroskopischer Technologien beim Übergang zu nanoskaligen Strukturen nicht mehr gelten. So treten hier zunehmend Quanteneffekte (wie z.B. der Tunneleffekt) in den Vordergrund, während z.B. die Mikroelektronik noch weitgehend durch die „klassische" Kontinuumsphysik geprägt ist.

Eine wesentliche Grundlage für die künftige Rolle der Nanotechnik sind die sog. Rastersondenverfahren. Wichtigstes Bauteil dieser Werkzeuge ist stets eine sehr spitze Sonde, die rasterartig im Subnanometer-Abstand über ein Objekt geführt wird und dabei eine Wechselwirkung zwischen Sonde und Objekt nutzt. Hält man z.B. die Wechselwirkung über ein Regelsystem durch Rückkopplung konstant, läßt sich aus den registrierten Korrekturbewegungen ein atomgenaues Abbild der Oberfläche gewinnen.

Nachdem es mit dem sog. Rastertunnelmikroskop (RTM) Anfang der 80er Jahre erstmals gelang, eine Oberfläche in atomarer Auflösung abzubilden, gibt es inzwischen mehr als zwanzig verschiedene solcher Rastersondentechnologien. Auch eine Reihe kommerzieller Geräte ist seit Jahren auf dem Markt. Hierbei setzt sich vor allem das sog. Rasterkraftmikroskop (RKM) immer mehr durch. Im Gegensatz zum Tunnelmikroskop ist es nicht auf

elektrisch leitende Stoffe wie Metalle begrenzt, sondern eignet sich auch zur Untersuchung von nichtleitenden Materialien und sogar lebenden Zellen.

Die im Hinblick auf das technologische Potential interessanteste Perspektive der Rastersondenverfahren ist die Möglichkeit zur gezielten Manipulation einzelner Atome oder Moleküle. Da RTM und RKM auf einer stark lokalisierten Wechselwirkung basieren, kann man die Sonden als eine Art Nanopinzette verwenden. Man bringt die Sondenspitze so nahe an ein Atom/Molekül heran, daß dieses aufgrund der Wechselwirkung praktisch „festklebt" und gezielt verschoben werden kann. Inzwischen wurden so bereits atomare/molekulare Muster bzw. einfache neuartige Moleküle erzeugt. Von einer „Nanofabrik" aus Tausenden oder Millionen von parallel arbeitenden Rastersonden, die z.B. komplexe molekulare Strukturen oder elektronische Bauelemente aus einfachen Grundbausteinen zusammenbauen, ist man allerdings noch weit entfernt.

Im Prinzip bilden die Rastersondentechnologien ein natürliches Ende der Bemühungen zur Miniaturisierung von Strukturen im klassisch physikalisch/technischen Sinne. Auf dem Weg hierzu hat man sich der Nanotechnik über die Feinwerk- und die Mikrotechnik durch eine schrittweise Verfeinerung des jeweiligen Instrumentariums „Top-down" genähert. Ein zweiter, als „Bottom-up" bezeichneter Weg des Aufbaus von Nanostrukturen, der heute noch weitgehend als utopisch einzustufen ist, wird eher durch chemisch/biologische Ansätze bestimmt. Er basiert auf Prozessen der Selbstorganisation, bei denen sich Atome, Moleküle, Molekülverbände und Bauteile von selbst zu funktionsfähigen Einheiten zusammenfügen. Einmal in Gang gesetzt, schreitet er nach seinem inneren Plan fort, sei es auf eine energetisch günstige Form zu oder hin zu einem System, dessen Gestalt und Funktion in den benutzten Bausteinen selbst verschlüsselt ist.

Grundlage der Selbstorganisation sind sog. Selbstassoziationseffekte zwischen Molekülen. Dabei profitiert man von schwachen, ungerichteten Bindungskräften, welche den Aufbau und die Eigenschaften von z.B. Flüssigkristallen, Emulsionen, Kolloiden oder ultradünnen Schichten bestimmen. Bei ihrer Bildung gibt es den Anschein, als könnten sich ähnliche Struktureinheiten unterschiedlicher Moleküle gegenseitig „erkennen", so daß supramolekulare geordnete Strukturen oder Muster entstehen. Solche Prozesse können auch durch äußere Einwirkungen gezielt ausgelöst werden.

Juni 1999 Thomas Kretschmer

Adaptronik

Mit dem Begriff Adaptronik (abgeleitet aus Adaptierung und Elektronik) wird ein neues Technologiegebiet bezeichnet, das sich mit den sog. Intelligenten Strukturen und Werkstoffen (Smart Structures and Materials) befaßt. Als „intelligent" charakterisiert man wiederum deren Fähigkeit, Veränderungen bei den Umgebungs- bzw. Betriebsbedingungen zu erkennen und auf diese sinnvoll zu reagieren.

Im allgemeinsten Fall geht man davon aus, daß in solchen „intelligenten" Strukturen und Werkstoffen neben dem Trägermaterial, das die strukturellen Eigenschaften bestimmt, die drei Grundelemente eines herkömmlichen Regelkreises, d.h. Sensorik, Aktorik und Steuerung integriert sein müssen. Die Sensoren dienen zur Wahrnehmung bzw. Intensitätsmessung der Umgebungseinflüsse oder inneren Betriebszustände, wie z.B. Druck, Temperatur oder elektromagnetische Felder. Die Aktoren ermöglichen die aktive Beeinflussung von Eigenschaften, wie z.B. die Veränderungen von Geometrie, Steifigkeit oder Farbe. Eine Steuerungskomponente ist erforderlich, um die Sensorinformation in Signale zur Regelung des Aktors umzusetzen.

Derzeit gibt es keinen einsatzfähigen Werkstoff, der über alle diese Funktionen verfügt. Allerdings werden heute vielfach bereits solche Systeme als „smart" bzw. „intelligent" bezeichnet, die einen sog. Multifunktionalen Werkstoff verwenden, der mindestens zwei der o.g. Funktionen aufweist.

Deren bekannteste Vertreter sind die Formgedächtnis-Legierungen, bei denen es in Abhängigkeit von der Temperatur zu einer Umwandlung der inneren Struktur kommt. Multifunktionale Eigenschaften haben auch die Piezoaktiven Materialien, die den bei einer Reihe von Kristallen, Keramiken und Polymeren auftretenden Piezoeffekt nutzen. Bei den sog. Elektrorheologischen oder Elektroviskosen Flüssigkeiten wird die Fließgeschwindigkeit (Viskosität) durch ein von außen angelegtes elektrisches Feld gesteuert. Zu den Multifunktionalen Werkstoffen gehören auch die Photo-, Thermo- und Elektrochromen Substanzen, die unter Einwirkung von Licht, Wärme bzw. elektrischem Feld ihre Farbgebung bzw. Lichtdurchlässigkeit verändern.

Adaptronische Systeme dürften zukünftig überall dort Anwendung finden, wo konventionelle Werkstoffe angesichts zunehmend komplexer werdender Aufgabenstellungen an ihre Grenzen stoßen. Außerdem eröffnet dieses Konzept ganz neue Nutzungsoptionen, die mit konventionellen Werkstoffen bisher nicht möglich waren.

So ermöglicht die Zustandsüberwachung (Health monitoring) von Bauteilen und Strukturen in Fertigung und Betrieb die Erkennung und Analyse von Schädigungen aufgrund äußererer Einwirkung, Werkstoffermüdung, Verschleiß oder Korrosion. Die Integration von Sensoren in die Struktur gewährleistet z.B. eine permanente Kontrolle besonders kritischer Systeme, wie Flugzeuge und Brücken. Prinzipiell können durch solche Konzepte, die eine gewisse Analogie zu Nervensystemen in biologischen Systemen haben, bevorstehende Ermüdungs- oder Brucherscheinungen rechtzeitig erkannt und die betroffenen Teile ersetzt werden, bevor es zum Versagen kommt.

Ebenfalls eine gewisse Ähnlichkeit zu biologischen Vorbildern hat das Prinzip der aktiven Schadensverhütung oder sogar Selbstreparatur der Struktur, das praktisch einem Werkstoff-Immunsystem entspricht. So läßt sich z.B. die Korrosion von oberflächennahen Betonarmierungen durch den Einbau von hohlen Kunststoffasern, die mit einer korrosionhemmenden chemischen Substanz gefüllt sind, verhindern. Bei Überschreiten des zulässigen pH-Wertes wird der Kunststoff aufgelöst und die Substanz freigesetzt.

Ein großes Anwendungspotential der Adaptronik bildet die gezielte Steuerung von Materialparametern zur Veränderung der Eigenschaften von Bauteilen und Strukturen während ihres Einsatzes. Ein Beispiel ist die Vibrationsunterdrückung oder Schalldämpfung durch elektroviskose Flüssigkeiten. Entsprechend bietet die gezielte Veränderung von thermischen, elektrischen und optischen Werkstoffparametern eine Vielzahl von Optionen für adaptive Bauteile und Strukturen, wie z.B. die Optimierung der Licht- und Wärmeversorgung in Gebäuden.

Eine interessante Option ist die gezielte Anpassung der Festigkeit tragender Strukturen während der Belastung. Während herkömmliche Konstruktionen in der Regel für den Normalbetrieb überdimensioniert sind, werden hier an den kritischen Stellen zusätzliche Verstärkungsglieder z.B. aus Formgedächtnislegierungen eingebaut, die bei extremer Belastung durch Erwärmung in die frühere Form zurückgebracht werden. Auf diese Weise wird das Bauteil entgegengesetzt zur Beanspruchungsrichtung gespannt.

Insbesondere im Bereich der Luftfahrt, aber auch im Schiffbau, dürften zukünftig Konzepte der aktiven Formsteuerung Anwendung finden. Durch den Einbau geeigneter Aktoren werden Verbiegungen bzw. Oberflächendeformationen der Strukturen erreicht. Diese lassen sich optimal an die Luft- bzw. Wasserströmungsverhältnisse anpassen und ermöglichen so höhere Geschwindigkeiten bei geringerem Energieverbrauch. Im fortgeschrittenen Versuchsstadium befindet sich die gezielte Veränderung der aerodynamischen Profile von Flugzeugflügeln bzw. von Hubschrauber-Rotorblättern. Dagegen sind Überlegungungen zu variablen Außenhüllen von Über- und Unterwasserschiffen noch weit von der Realisierung entfernt.

Auch über medizinische Anwendungen der Adaptronik wird intensiv nachgedacht. Möglich sind z.B. künstliche Knochen aus implantierbarem Verbundwerkstoff, die sich dynamisch an wechselnde Belastungen anpassen, sowie flexible Schienen, die durch gezielte Veränderung ihrer Festigkeit den Heilungsprozeß bei Brüchen beschleunigen.

Februar 1999 Jürgen Kohlhoff

Mikrotechnologien

Ein herausragender Trend der modernen Technik ist die zunehmende Miniaturisierung und Integration von Funktionselementen zu immer leistungsfähigeren Bauelementen und Systemen. Die unumstrittene Vorreiterrolle nimmt hier die Mikroelektronik ein, doch auch in anderen Technologiefeldern wie z.B. Mechanik, Optik oder Sensorik wird der Trend zur Miniaturisierung und Integration immer stärker. Es entsteht eine neue Technologiebasis, die elektronische, mechanische, optische und chemische Funktionselemente umfaßt und je nach Blickwinkel und relativer Bedeutung der Bestandteile durch Begriffe wie Mikrotechnik, -mechanik, -optik, -sensorik, -verfahrenstechnik oder -systemtechnik charakterisiert wird.

In allen Fällen spielt die Verfügbarkeit und Beherrschung von Technologien zur kontrollierten Manipulation von Festkörperstrukturen bis in den Bereich von Mikrometern (1/1000 mm) und darunter eine Rolle. Aus historischer Sicht markiert diese Größenordnung einen weiteren Schritt in der Bauteilpräzision. Zur Herstellung mechanischer Elemente bis in den Submillimeter-Bereich, wie sie etwa in Uhrwerken, Relais und Magnetköpfen zu finden sind, gibt es die seit langem hochentwickelte und ausgereifte Feinwerktechnik. Diese basiert auf spanabhebenden Verfahren der klassischen Materialbearbeitung wie Drehen, Fräsen und Bohren, die bei Genauigkeiten im Bereich unter zehn Mikrometern an ihre Grenzen stoßen. Zur Herstellung von dreidimensionalen Funktionselementen, deren Präzisionsanforderungen im Bereich unter einem Mikrometer liegen, sind daher völlig neue Fertigungsverfahren erforderlich.

Ein bereits etablierter Weg ist die Nutzung und Weiterentwicklung der Fertigungsverfahren, die für die Herstellung hochintegrierter elektronischer Schaltungen verwendet werden. Kennzeichen dieser sog. Silizium-Planartechnologie ist der schichtweise Aufbau der Bauelemente, für den verschiedene Prozeßschritte wie Schichtabscheidung, Phototechnik und Ätzen durchlaufen werden. Neben seinen elektronischen Eigenschaften, die ihn zum unangefochtenen Basismaterial der Mikroelektronik gemacht haben, verfügt der Werkstoff Silizium darüber hinaus über ausgezeichnete mechanische Eigenschaften, wie z.B. größere Festigkeit und geringeres Gewicht als Stahl, die ihn als interessantes Material auch für mechanische Funktionselemente ausweisen. Auch die zur Herstellung mikromechanischer Bauelemente häufig notwendige dreidimensionale Strukturierung des Substratmaterials ist möglich. So zeigen Silizium-Einkristalle entlang verschiedener Kristallebenen unterschiedliches Ätzverhalten. Möglich ist auch die Beeinflussung der Ätzgeschwindigkeit durch eine gezielte Dotierung mit Fremdatomen. Durch die geeignete Abfolge solcher Prozesse lassen sich vielfältige Strukturen wie Gräben, Löcher, Zungen, Brücken oder Zahnräder erzeugen.

Das wesentliche Potential der auf Silizium basierenden Mikrotechnologien liegt in der Kombination von elektronischen und nichtelektronischen Komponenten auf einem Chip, der durch die gemeinsame Materialbasis ermöglicht wird. So können Mikrosensoren für Meßgrößen wie Druck oder Beschleunigung gleich auf dem Chip mit der notwendigen Auswerteelektronik und computergerechten Signalverarbeitung ausgerüstet werden. Ein weiteres Beispiel ist die Unterbringung von mikroelektronischen Bauelementen, die oft

erhebliche Wärme entwickeln, auf Siliziumträgern, in die vorher Mikro-Kühlkanäle geätzt wurden.

Für manche Anwendungen ist monokristallines Silizium ungeeignet. Trotz erheblicher Forschungsanstrengungen ist es bisher nur in geringem Maße gelungen, die für Silizium verwendeten Mikrostrukturierungsverfahren auf andere Materialien zu übertragen. Wesentlich erfolgreicher ist hier eine neue Verfahrenslinie, die unter dem Namen LIGA-Technik (Lithographie-Galvanik-Abformtechnik) seit einigen Jahren zur Anwendung kommt. Man nutzt hier in einer Reihe von Prozeßschritten ionisierende Strahlung (Röntgen-, Elektronen- oder Ionenstrahlen) sowie Galvanotechnik zur Erzeugung von Kunststoff-Negativformen der gewünschten Mikrostruktur, die anschließend mit dem gewünschten Material (Metalle, Kunststoffe oder Keramiken) aufgefüllt werden. Allerdings lassen sich in dieser Technik nur ebene Strukturen in die Tiefe übertragen. Das für die Herstellung beweglicher und schwingungsfähiger Teile erforderliche Unterätzen kann das LIGA-Verfahren daher nicht leisten.

Generell hat die außerordentlich dynamische Entwicklung der Mikrotechnologien dazu geführt, daß es inzwischen ein umfangreiches Angebot an Funktionselementen in diesem Bereich gibt. Hierzu gehören z.B. Mikromotoren, bei denen der Rotordurchmesser kleiner ist als der eines Menschenhaares, Mikrozahnräder von der Größe eines Einzellers, optische Spektralapparate mit einem Gesamtvolumen von einem Kubikzentimeter, Mikrosensoren für verschiedenste Meßaufgaben sowie Mikropumpen zur Handhabung kleinster Flüssigkeitsvolumina.

September 1998 Thomas Kretschmer

Fullerene

Als Fullerene bezeichnet man große, ausschließlich aus Kohlenstoff bestehende Moleküle mit in sich geschlossener dreidimensionaler Struktur (z.B. fußballförmig). Sie bilden neben Graphit und Diamant die dritte bekannte Modifikation des Kohlenstoffs. Entdeckt wurden sie 1985 bei Versuchen, lange Kohlenstoffketten, wie sie im Weltall oft beobachtet werden, im Labor nachzubilden und zu erforschen. Seit Anfang der 90er Jahre sind sie in hantierbaren Mengen herstellbar. Die gewählte Bezeichnung soll an den amerikanischen Architekten und Erfinder Richard Buckminster Fuller erinnern, der durch seine Kuppelkonstruktionen bekannt geworden ist.

Seit ihrer Entdeckung sind Fullerene weltweit Gegenstand intensiver Forschungsaktivitäten. Inzwischen konnte bereits eine ganze Reihe ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften aufgeklärt werden. Dazu gehören gute thermische Beständigkeit, hohe Oxidationsfestigkeit und eine hohe Stabilität unter Einstrahlung von Laserlicht. Anwendungen in den verschiedensten technischen Bereichen erscheinen möglich. Neben der Chemie an der Außenhaut der Moleküle ist die Chemie im Innenraum von besonderem Interesse. In den sog. endohedralen Fullerenen können einzelne Fremdatome schlicht eingeschlossen oder chemisch gebunden sein. Ihre Herstellung bereitet allerdings noch große technische Schwierigkeiten. Insgesamt ist eine Vielzahl neuer Verbindungen denkbar, von denen man sich auch neuartige, noch nicht vorhersagbare Eigenschaften erhofft. Ähnlich wie bei den auf flächigen Ringstrukturen basierenden Benzolverbindungen entsteht hier möglicherweise ein ganz neuer Zweig der Chemie.

Das nicht zuletzt wegen der größten Ausbeute bei der Herstellung und seiner bemerkenswerten Stabilität am besten untersuchte und bekannteste Fulleren ist das fußballförmige C_{60}-Molekül, das in Teilen des sichtbaren und infraroten Spektralbereichs transparent ist. Auch an kleineren und größeren Clustern besteht ein großes Interesse. Diese sind jedoch größtenteils noch nicht in ausreichenden Mengen verfügbar. Die Verbindung besonders vieler Atome führt zu sog. Höheren Fullerenen. Dabei handelt es sich z.B. um bis zu einige Mikrometer lange zylinderförmige Gebilde (nanotubes), deren Mantel aus einer oder mehreren Kohlenstoffstrukturen besteht, die am Ende mit Abschlußkappen verschlossen sind. Solche Gefüge sollten theoretisch ungewöhnlich hohe mechanische Festigkeiten und interessante elektrische Eigenschaften aufweisen. Auch zwiebelförmige Strukturen sind bekannt, die aus konzentrisch angeordneten, ineinander verschachtelten Kugeln bestehen. Darüber hinaus sind den Fullerenen ähnliche Clusterstrukturen auch mit anderen Elementen möglich.

So gelang inzwischen die Synthese von kugelförmigen Wolframdisulfid-Molekülclustern, die für einen Einsatz als Schmierstoff besonders geeignet scheinen. Dazu trägt neben ihrer besonderen Größe vor allem die Form bei, die ein Haften an den zu schmierenden Oberflächen verhindert. Darüber hinaus bestehen sie aus mehreren ineinander liegenden Kugeln. Wird die äußere Hülle abgerieben, bleibt die Schmierwirkung trotzdem erhalten.

Ein besonderer Schwerpunkt der Fullerenforschung ist die Entwicklung ganz neuer Halbleiter- oder Leitermaterialien für die Mikroelektronik, da sich ihre diesbezüglichen

Eigenschaften durch verschiedene Maßnahmen z.B. zur Dotierung mit Fremdatomen in weiten Grenzen variieren lassen. So wird bei modifizierten C_{60}-Fullerenen sogar bei tiefen Temperaturen (bisher unter 40 K) der Übergang in den supraleitenden Zustand beobachtet. Sie sind damit die organischen Supraleiter mit der höchsten Sprungtemperatur und haben gerade gegenüber den aus zweidimensionalen Schichten aufgebauten keramischen Hochtemperatursupraleitern einige Vorteile, zu denen nicht zuletzt die annähernde Isotropie der physikalischen Eigenschaften gehört.

Eine weitere interessante Eigenschaft des C_{60} ist seine optische Nichtlinearität. Je stärker die Intensität des eingestrahlten Lichtes ist, desto geringer wird die Transparenz. Damit wäre eine Nutzung in Laser-Schutzbrillen denkbar. Weitere Einsatzmöglichkeiten für Fullerene gibt es z.B. in der Medizin, wo man sich die Fähigkeit, bestimmte Wirkstoffe im Inneren der Moleküle einzuschließen und am richtigen Ort gezielt wieder freizugeben, zunutze machen möchte. Auch für die Fertigung von Diamanten und Diamantschichten könnte die Anordnung der Kohlenstoffatome in den Fullerenen eine interessante Ausgangsmodifikation sein.

Grundvoraussetzung für die Erforschung und schließlich auch die technische Anwendung der ganzen Materialklasse ist die weitere Entwicklung von Syntheseverfahren für größere Substanzmengen. Der am weitesten entwickelte Prozeß basiert auf der Lichtbogenverdampfung von Graphit in einer Edelgasatmosphäre. Die bisher noch sehr hohen Materialpreise sollten mit großtechnischen Anwendungen und der damit einhergehenden Steigerung der Produktion sinken. Eine prinzipielle untere Grenze ist hier allerdings mindestens durch die Energiekosten für die Aufrechterhaltung des Lichtbogens gegeben.

Daneben werden alternative Verfahren erprobt, die z.B. auf der Verdampfung von Graphit oder anderen Kohlenstoffverbindungen mit Hochleistungslasern oder im Hochfrequenzofen beruhen. Es gibt auch Bestrebungen, Fullerene auf naßchemischem Weg zu synthetisieren. Vielversprechend erscheint die Herstellung durch die unvollständige Verbrennung von Benzol. Zunehmend werden Fullerenfilme gefertigt, die anschließend dotier- und strukturierbar sind. Dazu nutzt man Dünnschichttechniken auf der Basis von Molekularstrahlepitaxie und Laserablation.

Trotz aller auf den ersten Blick vielversprechenden Eigenschaften sind die Zukunftsaussichten der Fullerene in Bezug auf eine möglicherweise großtechnische Anwendung mit Vorsicht zu beurteilen. Das Gebiet befindet sich immer noch ganz am Anfang seiner Erforschung und bedarf weiterer grundlegender Untersuchungen.

Januar 1998 Jürgen Kohlhoff



Materie & Energie

terie & Energie

Materie & Energie

Materie & Energie

Materie & Energ



Materie & Energie

Materie & Energie

Materie & Energie

Prozesse und Verfahren



Oberflächenkatalyse	2009	
	2008	
Pulvermetallurgie		
Oberflächentechnologien	2007	
	2006	
Katalyse		
	2005	
Schweißtechnologien	2004	
Sol-Gel-Verfahren	2003	
Trenntechnologien		
Supramolekulare Chemie	2002	Rastersondentechniken
	2001	
Tribologie		Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung
Rapid Prototyping	2000	Kombinatorische Chemie
Plasmatechnik	1999	Membrantechnologien
Katalysatoren		Lasergestützte Materialbearbeitung
Klebetechnologien	1998	
	1997	Fertigungs- und Bearbeitungstechnologien
	1996	

Oberflächenkatalyse

Als Katalysatoren (griech.: katálysis = Auslösung, Loslösung) bezeichnet man Stoffe, die eine chemische Reaktion beschleunigen, indem sie ihren Ablauf auf atomarer Ebene verändern und so die für einen bestimmten Reaktionsverlauf benötigte Aktivierungsenergie herabsetzen. Sie werden dabei selbst nicht verbraucht, sondern immer wieder in die Reaktion einbezogen. Durch Katalyse können Reaktionen schneller, energiesparender und mit weniger Nebenprodukten verlaufen oder auch in eine andere Richtung gelenkt werden. Die Nutzung dieses Effektes ist in der chemischen, petrochemischen und pharmazeutischen Verfahrenstechnik heute nicht mehr wegzudenken.

Je nach Vielfalt der Aggregatzustände der am Reaktionsprozess beteiligten Stoffe unterscheidet man zwei Hauptarten von Katalyse. Bei der so genannten Homogenen Katalyse liegen alle beteiligten Stoffe in der gleichen, meist flüssigen Phase vor. Einen Spezialfall bildet hier die Biokatalyse mit Enzymen als Katalysatoren.

Bei der so genannten Heterogenen Katalyse dient eine Festkörperoberfläche als Katalysator für die (flüssigen, gelösten oder gasförmigen) reagierenden Stoffe. Sie wird daher auch als Oberflächenkatalyse bezeichnet. Hier verläuft der katalytische Prozess über die Ausbildung von chemischen Bindungen zwischen Oberfläche und reagierenden Molekülen. Dies führt zu einer Spaltung, Aktivierung oder Umlagerung von Bindungen im Molekül sowie häufig zu einer Strukturveränderung der Oberfläche. Im gebundenen Zustand können die Moleküle oder Molekülbruchstücke über die Oberfläche wandern und geeignete Reaktionspartner finden. Nach entsprechender Umlagerung der Atome verlassen die Reaktionsprodukte die Oberfläche wieder. Durch Ausbildung geordneter, stabiler und immobiler Oberflächenstrukturen kann die Oberfläche vergiftet, d.h. desaktiviert werden. Eine Beherrschung dieses Phänomens ist entscheidend z.B. für die technische Nutzbarkeit einiger Arten von Brennstoffzellen.

Im Prinzip ist die Oberflächenkatalyse seit fast zweihundert Jahren bekannt und wird bereits seit Anfang des 20. Jahrhunderts in großem Maßstab technisch genutzt. Doch erst in den letzten Jahrzehnten ist es der Grundlagenforschung gelungen, durch Verwendung stark vereinfachter Modellkatalysatoren und neuer Messmethoden die zugrunde liegenden atomaren Prozesse aufzuklären. Für diese Erkenntnisse wurde dem deutschen Physikochemiker Gerhard Ertl im letzten Jahr der Nobelpreis für Chemie verliehen.

Heute nutzen etwa 70% der Prozesse in der Chemischen Industrie die Oberflächenkatalyse u.a. zur Herstellung von Grundchemikalien, Kunststoffen, Treibstoffen, Pharmaka und Lebensmitteln. Darüber hinaus gewinnt die so genannte Umweltkatalyse (z.B. Abgasreinigung, Wasseraufbereitung, Atemluftreinigung) immer mehr an Bedeutung. Ebenso steigt sowohl in der Produktionstechnik als auch in der Energietechnik (Brennstoffzellen, Batterien) die Bedeutung der Elektrokatalyse. Hierbei fungiert die Oberfläche von Elektroden als Spender oder Aufnehmer von Elektronen, so dass in der Lösung befindliche Stoffe bei Kontakt mit der Elektrode chemisch verändert werden. Die atomaren Vorgänge sind hier komplizierter und noch weniger gut verstanden.

Als heterogene Katalysatoren verwendet man meist Festkörper mit großer Oberfläche, wie Drahtnetze, poröse Körper oder feine Partikel. Moderne Katalysatoren sind häufig als Trägerkatalysatoren ausgeführt, d.h. katalytisch aktive Partikel oder Moleküle sind auf einem inaktiven Trägermaterial aufgebracht. Dadurch kann wertvolles Katalysatormaterial (z.B. Platin, Palladium, Rhodium) eingespart werden. Die Wechselwirkung mit der Trägeroberfläche stabilisiert die sehr kleinen Partikel, die sonst zum Verklumpen neigen, und modifiziert außerdem ihre Reaktivität.

Neben Metallen und Metalloxiden spielen die so genannten Zeolithe eine wichtige Rolle als Oberflächenkatalysatoren. Hierbei handelt es sich um kristalline Verbindungen, die ein dreidimensionales Netzwerk von Poren einheitlicher Größe aufweisen. Damit ist die (innere) Oberfläche extrem groß, außerdem müssen reagierende Moleküle in die Poren hineinpassen und können hier in bestimmte Formen und Anordnungen gezwungen werden. Die innere Oberfläche der Zeolithe lässt sich durch chemische Veränderung oder durch Ablagern von metallischen Nanopartikeln modifizieren. Auch spezielle Polymere können maßgeschneiderte Reaktionsräume bieten, wobei hier eine dreidimensional dynamische Reaktionsumgebung geschaffen werden kann.

Die für den Ablauf einer katalysierten Reaktion erforderliche Aktivierungsenergie kann außer als Wärme auch in Form von Licht zugeführt werden. Dieser als Photokatalyse bezeichnete Prozess spielt in der Wasseraufbereitung und der Zersetzung von Abfallstoffen und unerwünschten Mikroorganismen eine große Rolle. Die natürliche Photosynthese, d.h. die Umwandlung von Licht in chemische Energie, ist ein photokatalytischer Prozess, dessen technische Nachahmung Gegenstand der Forschung ist.

Generell sind die atomaren Details der Oberflächenkatalyse bisher erst teilweise verstanden und viele technische Reaktionen müssen noch aufgeklärt werden. Die Mischung aus Erfahrung, Experiment und wachsendem Modellverständnis führt jedoch heute schon zunehmend zu systematischen Verbesserungen, die letztlich einen im Computer maßgeschneiderten Katalysator zum Ziel haben. Dabei stehen auch immer präzisere Herstellungsmethoden für bestimmte Katalysatoroberflächen mit wohldefinierten aktiven Zentren zur Verfügung.

Aufgrund des theoretischen Verständnisses haben bereits völlig neue Katalysatormaterialien Eingang in die Praxis gefunden. So galt Gold hierfür lange als chemisch zu inaktiv. Mittlerweile wurde u.a. das Potenzial von Gold-Nanopartikeln entdeckt, die Herstellung bestimmter organischer Grundchemikalien mit erheblichen Einsparungen an Energie und toxischen Chemikalien durchzuführen. Auch das katalytische Potenzial verschiedener Formen nanoskaligen Kohlenstoffs steht erst am Beginn seiner Erschließung.

Juli 2008 Matthias Grüne

Pulvermetallurgie

Als Metallurgie bezeichnet man das Teilgebiet der Materialwissenschaften, welches sich mit der Herstellung und Verarbeitung von Metallen und ihren Legierungen befasst. Die klassischen Prozessschritte bilden hierbei das Schmelzen und das Giessen. Als ein relativ neuer Zweig der Metallurgie beschäftigt sich die Pulvermetallurgie primär mit metallischen Verbindungen, die sich nicht über eine Schmelze gewinnen lassen. Sie definiert sich ähnlich wie die Keramik über den Herstellungsprozess der Bauteile. In beiden Fällen handelt es sich um das Sintern kompaktierter Formkörper aus Pulvern.

Neben der Möglichkeit zur Herstellung neuartiger Metallverbindungen bietet die Pulvermetallurgie eine Reihe weiterer Vorteile. Die metallischen Ausgangspulver lassen sich über verschiedene Verfahren in den unterschiedlichsten Formen relativ maßgenau verdichten und ermöglichen damit eine endkonturnahe Fertigung von Werkstücken. Dadurch wird ein aufwendiges Nachbearbeiten häufig vermieden. Der Sinterprozess läuft bei Temperaturen deutlich unterhalb der Schmelz- oder Zersetzungstemperaturen der Pulvermaterialien ab und spart damit Energie. Auch ein meist sehr aufwendig kontrollierter und langwieriger Kühlprozess wie beim Metallguss entfällt. Aus diesem Grund bietet sich die Pulvermetallurgie immer häufiger als kostengünstige Alternative zur Herstellung vergossener, geschmiedeter oder maschinell bearbeiteter Bauteile an. Darüber hinaus weisen pulvermetallurgisch hergestellte Komponenten fast immer eine gewisse Restporosität auf, die inzwischen sogar gezielt für verschiedene Anwendungen genutzt wird.

Generell stellt die Pulvermetallurgie schon seit langem einen wichtigen Wirtschaftsfaktor dar. Zu herausragenden Anwendungen zählen z.B. poröse Lager, Filter sowie verschiedene Hart- und Weichmagnete. Die wirtschaftlich bedeutendste Gruppe bilden die Hartmetalle und die so genannten Cermets (mit Keramikpartikeln verstärkte Metalle). Diese zeichnen sich durch sehr große Härte, insbesondere bei hohen Temperaturen, und Verschleißfestigkeit aus. Sie werden vor allem zur Bestückung von Spezialwerkzeugen für die spanabhebende und spanlose Formgebung sowie in Anwendungen mit reibendem Verschleiß eingesetzt.

Derzeit wichtigster Abnehmer für pulvermetallurgische Produkte ist der Automobilbau mit Komponenten wie Kupplungsscheiben, Nockenwellen, Pleuelstangen oder Bauteilen von Planetengetrieben. In der Luft- und Raumfahrttechnik werden z.B. Turbinenschaufeln, Hitzeschilder oder Raketendüsen hergestellt. Auch die Uhrenindustrie nutzt Pulvermetallurgie, z.B. zur Herstellung von Gehäusen oder Rotoren für Automatikwerke. Darüber hinaus werden neue Produktoptionen entwickelt, wie z.B. Sportgeräte, Handwerkszeug oder Chirurgiebesteck. Für die medizinische Prothetik sind stabile poröse Strukturen von besonderem Interesse, da Knochen und anderes Gewebe einwachsen und so sehr haltbare Verbindungen schaffen können.

Ein wichtiger Schritt im pulvermetallurgischen Prozess ist die Herstellung geeigneter Ausgangspulver. Von deren Reinheit und Beschaffenheit, insbesondere hinsichtlich Größe, Form und Kristallisationsgrad, hängen Prozessführung, Produkteigenschaften und -quali-

tät maßgeblich ab. Die wichtigsten Pulver-Herstellungsverfahren sind Sprühpulverisierung, Elektrolyse und chemische Verfahren.

Bei der Sprühpulverisierung wird eine Metallschmelze im Vakuum oder durch einen Gasstrom bzw. Flüssigkeitsstrahl zerstäubt und in Form feinster Tröpfchen erstarrt. Dieses Verfahren wird hauptsächlich für Eisen, Stähle, Kupfer und Kupferlegierungen sowie niedrigschmelzende Metalle, wie z.B. Aluminium, verwendet. Durch Elektrolyse erhält man höchstreine und hochdichte Metallpulver. Wichtigstes Produkt ist Kupfer, aber auch Magnesium-, Chrom- oder Eisenpulver werden auf diese Weise hergestellt. Über chemische Verfahren, wie z.B. das Ausfällen aus Lösungen oder die thermische Zersetzung organometallischer Verbindungen, lassen sich Pulver des gleichen Metalls mit einer erheblichen Bandbreite an Eigenschaften gezielt erzeugen. Auch die Herstellung von Pulvern hoher Reinheit ist auf diesem Wege relativ einfach möglich.

Zur pulvermetallurgischen Produktion von Bauteilen werden im Wesentlichen vier Vorgehensweisen unterschieden. Am ältesten ist das Verpressen mit anschließendem Sintern. Beim Heißschmieden, das besonders für flächige Körper geeignet ist, wird das Pulver vor der eigentlichen Verfestigung in einer Form kalt vorgepresst und dann in einer geschlossenen Form unter Wärmeeinwirkung zum Bauteil verdichtet. Eine jüngere Alternative für kompakte dichte Volumenkörper ist das so genannte Heißisostatische Pressen (HIP). Es nutzt hohe Drücke und Temperaturen deutlich unterhalb der Schmelztemperatur des Metalls. Das aus der Kunststofftechnik übernommene Pulverspritzgießen ermöglicht es, Bauteile mit sehr komplexen Geometrien zu realisieren, die über andere Verfahren nicht hergestellt werden können.

Ein ganz neues, zum Teil noch im Forschungsstadium befindliches Verfahren ist das so genannte Spark Plasma Sintering, bei dem die Beheizung für den Sintervorgang durch elektrischen Strom erfolgt. Hiermit können Nanopulver innerhalb von wenigen Minuten (gegenüber vielen Stunden bei anderen Verfahren) zu kompakten Festkörpern gesintert werden. Es ist das einzige Sinterverfahren, bei dem die ursprüngliche Nanostruktur weitgehend erhalten bleibt.

Die Pulvermetallurgie dringt zunehmend in Bereiche vor, die heute noch von konventionell hergestellten Produkten dominiert werden. Einen wesentlichen Treiber bildet insbesondere der Leichtbau mit seinen hohen Qualitätsanforderungen. Darüber hinaus erschließt diese Technologie in vielen Branchen zunehmend hoch spezialisierte Nischenmärkte. Beispiele sind die Nutzung hochfester poröser Strukturen als Katalysatorträger in Chemie und Biotechnologie. Auch in der Wehrtechnik ist sie von herausragendem Interesse, z.B. zur Herstellung von Penetratoren hoher Masse oder von porösen Strukturen und Verbundwerkstoffen für leichte Panzerungen.

Mai 2007 Stefan Reschke

Oberflächentechnologien

Die entscheidenden Funktionen von Komponenten technischer Systeme werden heute vielfach von Oberflächenschichten wahrgenommen. Während ein ggf. preiswert herstellbarer konventioneller Grundwerkstoff die Festigkeits- und Steifigkeitsaufgabe übernimmt, verfügt eine zusätzlich aufgebrachte Schicht bzw. eine entsprechend modifizierte Oberfläche über zusätzliche Eigenschaften. So lassen sich durch geeignete Beschichtungen eines Bauteils z.B. sein Korrosionsverhalten oder seine tribologischen Eigenschaften (Härte, Abrieb- und Verschleißfestigkeit) wesentlich verbessern. Daher zählen die Oberflächentechnologien mit ihren vielfältigen Möglichkeiten zur Veredelung von Werkstücken und Bauteilen zu den zukunftsträchtigsten Prozessen im Werkstoffbereich. Je nach Stärke der aufgetragenen Schicht unterscheidet man zwischen Dickschicht- (typischerweise zwischen 10 µm und einigen Millimetern) und Dünnschichttechnologien (unter 10 µm).

Zu den seit langem etablierten Dickschichttechnologien zählen die verschiedenen Lackier- und Druckverfahren sowie die Galvanotechnik, d.h. die Abscheidung metallischer Schichten aus einer Lösung entweder durch Anlegen eines elektrischen Stroms oder durch chemische Reaktion. Ein nach wie vor wichtiges Anwendunggebiet der Galvanotechnik bilden der Fahrzeug- und Maschinenbau, z.B. zur Herstellung korrosionsgeschützter Karosserien oder verschleißfester Maschinenteile.

Eine Dickschichttechnologie, die in letzter Zeit immer größere Bedeutung erlangt, ist das so genannte Thermische Spritzen. Hier wird ein draht- oder pulverförmiges Beschichtungsmaterial aufgeschmolzen, von einem Luft- oder Gasstrahl zerstäubt und mit hoher Geschwindigkeit auf das Substrat geschleudert. Ihr Anwendungspotential reicht sogar weit über das Beschichten hinaus, denn durch das Aufspritzen auf ein entfernbares Substrat können auch selbsttragende Bauteile z.B. für Flugzeugturbinen hergestellt werden.

Die bei weitem wichtigsten Entwicklungen im Bereich der Oberflächentechnologien findet man bei den Verfahren zur Herstellung dünner Schichten unter 10 µm. Eine wichtige Klasse bilden hier die physikalischen Abscheideverfahren aus der Gasphase (PVD = Physical Vapour Deposition). Durch physikalische Einwirkung, z.B. durch Zufuhr thermischer Energie oder durch Beschuss mit hochenergetischen Teilchen, wird festes Ausgangsmaterial im Vakuum in die Gasphase überführt. Die Atome, Moleküle oder Ionen kondensieren auf einem Substrat und bilden dort einen Film. Der wesentliche Vorteil der PVD-Verfahren liegt in den relativ niedrigen Abscheidungstemperaturen, die eine besonders große Vielfalt an zu beschichtenden Stoffen, wie z.B. Gläser, Metalle, Halbleiter, Kunststoffe oder Keramiken, zulassen.

Eine weitere Klasse von Dünnschichttechnologien basiert auf dem Prinzip der chemischen Gasphasenabscheidung (CVD = Chemical Vapour Deposition). Hierbei werden gasförmige Ausgangsstoffe unverdünnt oder mittels eines inerten Trägergases (z.B. Helium, Stickstoff) in eine Reaktionskammer geleitet und durch Energiezufuhr chemisch zerlegt. Ein Teil der gebildeten Zwischenprodukte wird dabei am Substrat adsorbiert, wo eine Reaktion zur Filmbildung führt. Die flüchtigen Nebenprodukte werden mit dem Träger-

gas entfernt. Die Prozesstemperaturen sind hier in der Regel zwar deutlich höher als bei den PVD-Verfahren, ein großer Vorteil liegt jedoch darin, dass eine gleichmäßige Beschichtung auch von komplex geformten Bauteilen möglich ist.

Zunehmend finden auch Verfahren Anwendung, bei denen die chemische Reaktion durch Energiezufuhr aus einem ionisierten Gas (Plasma) aktiviert wird und bei niedrigeren Temperaturen stattfindet. Dadurch können auch temperaturempfindliche Materialien wie Kunststoffe beschichtet werden. Besonders wertvoll sind die mit dieser Technologie hergestellten diamantähnlichen Kohlenstoffschichten. Sie zeichnen sich durch sehr niedrige Reibungskoeffizienten und hohe Abriebfestigkeiten aus. Großes Anwendungspotential für die Herstellung biomedizinischer Chips oder flexibler Schaltungsträger eröffnet sich durch die Anwendung des so genannten Plasma-Printing, bei dem eine Vielzahl funktioneller Gruppen stempelartig auf ein Substrat aufgebracht wird.

Zur Erzeugung ultradünner Schichten im Nanometerbereich werden auch nasschemische Methoden eingesetzt, wie z.B. Sol-Gel-Verfahren. Ausgangspunkt ist hier ein so genanntes Sol (eine stabile Suspension feinster Partikel, Cluster oder größerer Moleküle in einer Flüssigkeit), das mittels Tauch- oder Sprühbeschichtung auf das Substrat aufgebracht wird. Die Schicht wird durch Gelier- und Trocknungsprozesse weiter verdichtet und anschließend ausgehärtet. Das Verfahren bietet z.B. die Möglichkeit, Brillen- und Fensterglas mit Antireflexionsschichten oder selbstreinigenden Oberflächen zu versehen.

Neben der Beschichtung eines Bauteils gibt es auch die Möglichkeit, seine Oberflächen gezielt zu bearbeiten. So werden z.B. mit Laser- oder Elektronenstrahlen dünne Oberflächenbereiche aufgeschmolzen, die nach der anschließenden sehr schnellen Erstarrung veränderte Eigenschaften aufweisen. Ebenso ist es möglich, durch Ionenbeschuss unebene Festkörperoberflächen nanometergenau zu glätten, um z.B. Präzisionsspiegel herzustellen, aber auch periodische Muster von Erhebungen und Vertiefungen zu erzeugen, die für Spezialanwendungen benötigt werden.

Generell wird die Palette der Beschichtungsmaterialien ständig erweitert, z.B. durch maßgeschneiderte Pulver als Ausgangssubstanzen. Weitere Fortschritte erwartet man auch durch die Entwicklung neuer sowie die Kombination verschiedener Beschichtungsverfahren. Im Forschungsstadium befinden sich Schichtbildungstechniken, die auf der Selbstorganisation von Molekülen an einer Grenzfläche beruhen. Auf diese Weise lassen sich Multischichtmaterialien mit jeweils monomolekularen Schichtdicken erzeugen. Hieraus ergeben sich prinzipiell völlig neue Möglichkeiten des kontrollierten Materialdesigns auf molekularer Ebene.

März 2007 Claudia Notthoff

Katalyse

Als Katalyse bezeichnet man die Beschleunigung einer chemischen Reaktion durch die Gegenwart eines Stoffes (Katalysator), der dabei selbst nicht verbraucht wird. Seine Wirkungsweise beruht auf der Veränderung des Reaktionsmechanismus durch Bildung energieärmerer aktivierter Zwischenstufen, ohne das thermodynamische Gleichgewicht zu beeinflussen. Oft genügt bereits eine kleine Menge des Katalysators, um große Stoffmengen umzusetzen. Katalysatoren werden heute in fast allen großtechnischen Prozessen zur Herstellung von Produkten der chemischen Industrie eingesetzt. Ebenso gewinnen katalytisch geführte Prozesse immer mehr an Bedeutung, wie z.B. die Abgasreinigung von Kraftfahrzeugen und Kraftwerken, die Wasseraufbereitung oder die Atemluftreinigung. Auch die Biotechnologie basiert zu großen Teilen auf der Nutzung von in der Natur vorkommenden (Bio-)Katalysatoren, welche Stoffwechselprozesse in lebenden Zellen steuern.

Generell unterscheidet man zwischen homogener und heterogener Katalyse. Im ersten Fall liegen Katalysator und mindestens ein Teil der umzusetzenden Stoffe in derselben, meist flüssigen, Phase vor. Diese Art der Katalyse ist seit Ende des 18. Jahrhunderts bekannt, wird aber erst in letzter Zeit zunehmend industriell angewandt, insbesondere zur Synthese von Polymeren und Wirkstoffen. Allerdings erfordert die nach Ablauf der Reaktion notwendige Abtrennung des Katalysators von den Reaktionsprodukten einen mitunter erheblichen Aufwand. Ein neuer Ansatz ist die Verwendung von überkritischem Kohlendioxid als Lösungsmittel, in dem sich die Löslichkeit von Katalysator und Produkten über die Parameter Druck und Temperatur während des Prozesses steuern lassen.

Bei der heterogenen Katalyse ist der Katalysator in der Regel ein Feststoff, und die umzusetzenden Stoffe befinden sich im flüssigen oder gasförmigen Zustand. Die Reaktion verläuft hier über Zwischenstufen, die auf der Katalysatoroberfläche chemisch gebunden (chemisorbiert) sind. Daher verwendet man meist Festkörper mit großer Oberfläche wie Drahtnetze, poröse Körper oder feine Partikel als Katalysatoren. So besteht z.B. die Oberfläche des seit 1913 eingesetzten Katalysators für die Ammoniakproduktion aus ca. 10 nm großen Eisenpartikeln. Ein großer Vorteil der heterogenen Katalyse liegt darin, dass hier Katalysator und Reaktionsprodukte chemisch nicht getrennt werden müssen.

Die wichtigsten Biokatalysatoren sind die Enzyme. Diese sind extrem spezifisch, auch bezüglich der Chiralität (Drehsinn) von Ausgangsstoffen und Produkten, was in der Pharmaka-Herstellung oft unverzichtbar ist. Sie weisen zudem um viele Größenordnungen höhere Reaktionsraten auf als technische Katalysatoren. Heute wird etwa die Hälfte aller industriell genutzten Enzyme im Lebensmittelbereich verwendet. Ein Drittel findet Anwendung in Waschmitteln, und der Rest wird in den Bereichen Textilien, Feinchemie und Diagnostika eingesetzt. Von zunehmender Bedeutung ist dabei auch die Herstellung von Enzymen mittels gentechnisch veränderter Organismen. So lassen sich verbesserte oder völlig neuartige Biokatalysatoren gewinnen.

Ein großer Innovationsschub für die Entwicklung von neuen und verbesserten Katalysatoren ergibt sich derzeit vor allem durch den Einsatz nanotechnologiebasierter Materialien

und Methoden. Zunehmend werden Nanokristalle und Cluster aus Metallen, Oxiden, Carbiden, Oxycarbiden oder Halbleitern verwendet, deren Vorteile in einer besseren Ausnutzung des Katalysatormaterials durch die erheblich größere Oberfläche sowie den höheren Anteil von reaktiven Oberflächenatomen liegen. Darüber hinaus lassen sich über die Größe eines Nanopartikels dessen elektronische Eigenschaften einstellen, wodurch eine auf die gewünschte Reaktion abstimmbare und ggf. weit höhere Reaktivität möglich wird. Außerdem erschließen die im Nanobereich grundlegend veränderten elektronischen Eigenschaften auch völlig neue Materialien als Katalysatoren, die als kompakte Festkörper nicht katalytisch aktiv sind, wie z.B. Gold-Nanopartikel. Diese könnten in vielen Anwendungen die teureren Elemente Platin und Palladium ersetzen. So wird z.B. im Bereich der Autoabgas-Katalysatoren an einem Ersatz der Platinmetalle durch Nanopartikel aus Übergangsmetallcarbiden, -oxycarbiden oder Silber gearbeitet.

Eine weitere Klasse nanotechnologischer Katalysatoren sind künstliche Zeolithe, d.h. kristalline Alumosilikate mit einem dreidimensionalen Netzwerk von Poren einheitlicher Größe. Neben ihrer Nutzung als Ionenaustauscher und Molekularsiebe werden sie in großer Menge als Katalysatoren in der Petrochemie und zunehmend bei chemischen Synthesen verwendet. Darüber hinaus eignen sie sich als nanoporöse Trägermaterialien für katalytisch aktive Metall- und Oxid-Nanopartikel sowie für immobilisierte Homogenkatalysatoren und Enzyme. Weitere nanoporöse Trägermaterialien, die auch auf ihre Eignung für Autoabgas-Katalysatoren untersucht werden, sind Aerogele, künstliche Opale aus kolloidchemisch hergestellten monodispersen Siliziumdioxidkugeln sowie nanoporöse Membranen aus gemischten Metalloxiden, Metallen oder Polymeren.

Von großem technischen Interesse ist auch die Photokatalyse, bei der die für eine chemische Reaktion erforderliche Aktivierungsenergie in Form von Licht zugeführt wird. Hier nutzt man zunehmend halbleitende Nanopartikel, z.B. aus Titandioxid, Zinksulfid oder Cadmiumsulfid. Mit diesen wird eine solare Synthese von Feinchemikalien möglich, die zudem das Kriterium der Nachhaltigkeit erfüllt, da kaum Nebenprodukte entstehen. Darüber hinaus spielt die Photokatalyse in der Wasseraufbereitung sowie bei der Zersetzung von Abfallstoffen und unerwünschten Mikroorganismen eine große Rolle. Hierzu werden bereits photokatalytisch wirkende Titandioxid- oder Silber-Nanopartikel eingesetzt.

Lange Zeit war die Verbesserung vorhandener und die Suche nach neuen heterogenen Katalysatoren stark vom Zufall bestimmt. Durch die Entwicklung spektroskopischer und mikroskopischer Methoden ist jedoch in den letzten Jahren ein zunehmendes Verständnis der mikroskopischen Mechanismen an ausgewählten Modellkatalysatoroberflächen entstanden. Unter Einbeziehung moderner Computersimulationsmethoden wird es damit in Zukunft verstärkt möglich sein, heterogene Katalysatoren für gewünschte Reaktionen maßzuschneidern. So wurde z.B. ein völlig neuartiger Katalysator für die industrielle Synthese von Styrol konstruiert, der aus mehrschichtigen kugelförmigen Fullerenen besteht und eine erheblich erhöhte Ausbeute bei viel geringerem Energieeinsatz und besserer Temperaturstabilität ermöglicht.

Mai 2005 Claudia Notthoff

Schweißtechnologien

Füge- und Verbindungstechnologien spielen im gesamten Bereich der industriellen Fertigung eine herausragende Rolle. Im Spektrum der Fertigungsverfahren haben sie sowohl hinsichtlich der Einsatzhäufigkeit als auch in ihren Auswirkungen auf Leistung, Zuverlässigkeit und Sicherheit industrieller Produkte eine enorme Bedeutung. Eine besonders wichtige Methode zum Fügen geeigneter Materialien ist das Schweißen. Darunter versteht man die unlösbare Verbindung von Grundwerkstoffen unter Anwendung von Wärme und/oder Druck, gegebenenfalls unter der Einwirkung geeigneter Zusatzstoffe.

Grundsätzlich erfordert die Herstellung einer Verbindung, die für den jeweiligen Anwendungszweck hinsichtlich verschiedenster Kriterien (z.B. Kraftschlüssigkeit, Spannungsverteilung, Festigkeit) optimiert ist, eine den verwendeten Materialien angepasste Technik. Daher gibt es inzwischen eine fast unüberschaubare Vielzahl einzelner Schweißtechnologien bzw. von Varianten bereits etablierter Verfahren. Hinzu kommt eine zunehmende Zahl von Kombinationen einzelner Schweißverfahren untereinander oder mit anderen Fügetechnologien.

Orientiert am physikalischen Ablauf unterscheidet man zwei Hauptgruppen von Schweißverfahren. Das so genannte Schmelzschweißen basiert auf der Einwirkung von Wärme. Beim so genannten Pressschweißen steht hingegen die mechanische Wirkung (Druck) im Vordergrund, gegebenenfalls ergänzt durch Wärmeeinwirkung. Zu den nennenswerten Pressschweißverfahren gehört neben den Reib-, Diffusions- und Explosivschweißtechnologien vor allem das so genannte Widerstandspressschweißen, das den in einer Fügegrenzfläche bestehenden elektrischen Widerstand zur Erwärmung der Fügezone nutzt. Auch das häufig angewendete Punktschweißen, welches die Stromzufuhr über Druckelektroden regelt und zur punktweisen Verbindung von Blechen dient, wird zu dieser Gruppe gezählt. Generell werden die Pressschweißverfahren in Zukunft ihren Platz behaupten können. Darüber hinaus gibt es in diesem Bereich auch neue Ansätze zum Verbinden von Metallen mit Keramiken oder von Polymeren untereinander.

Die größte Bedeutung unter den Schweißtechnologien hat die Gruppe der Schmelzschweißverfahren. Hier ragt insbesondere die Lichtbogen-Schweißtechnologie heraus, zu der u.a. verschiedene Schutzgasverfahren gehören. Zu diesen zählt auch das Metall-Aktivgasschweißen (MAG), das eines der am weitest verbreiteten Fügeverfahren ist. Hierbei wird die Metallelektrode als Schweißzusatzstoff eingesetzt, der im Lichtbogen aufgeschmolzen und unter Aktivgasatmosphäre dem Werkstück zugeführt wird. Das MAG-Verfahren ist durch seine verfahrenstechnische Vielseitigkeit in Verbindung mit hoher Schweißleistung gekennzeichnet. Es bietet damit wesentliche Vorteile gegenüber anderen wichtigen Lichtbogenverfahren, wie z.B. dem Wolfram-Inertgas(WIG)-Schweißen, bei dem der Lichtbogen in einer Edelgasatmosphäre brennt. Das WIG-Verfahren wird seinen Stellenwert für das Schweißen von hochlegierten Werkstoffen, Aluminium und anderen Nichteisenmetallen auch in Zukunft behalten.

Neben den konventionellen Schmelzschweißverfahren werden Strahltechnologien wie das Laser- und das Elektronenstrahlschweißen immer wichtiger, da sie neuartige kon-

struktive Lösungen erlauben. Zusammen mit dem Mikroplasmaschweißen, bei dem eine extreme Bündelung des Lichtbogens vorliegt, gehören diese zu den Prozessvarianten, welche dem zunehmenden Trend zur Miniaturisierung der Werkstücke auch in der Schweißtechnik Rechnung tragen.

Elektronenstrahl-Schweißanlagen zählen mittlerweile schon zu den gängigen Werkzeugmaschinen. Trotz aller Fortschritte in der Lasertechnik sind sie nach wie vor dominierend, wenn es um tiefe Nähte geht. Wichtige Entwicklungsanstrengungen gelten sowohl der Ausdehnung des Anwendungsbereichs auf noch dickere Werkstücke als auch dem Arbeiten mit ortsunabhängigen Anlagen, nicht zuletzt zur Bearbeitung auch relativ großer Bauteile. Großer Nachteil der Elektronenstrahlsysteme sind die immer noch besonders hohen Investitionskosten. Im Zusammenhang damit steht die Notwendigkeit zur Verwendung von Vakuumkammern, in welche die Werkstücke gebracht werden müssen. Daher gibt es zunehmende Bemühungen zur Entwicklung vakuumfreier Elektronenstrahl-Schweißanlagen, die in bestimmten Modifikationen inzwischen bereits zum Stand der Technik gehören.

Keine Notwendigkeit zur Arbeit unter Vakuum gibt es beim Laserschweißen. Neben Kohlendioxidlasern und Nd:YAG-Festkörperlasern werden hier insbesondere Halbleiterlaser immer wichtiger. Lasergestützte Verfahren lösen z.B. bei der Verarbeitung so genannter Tailored Blanks im Karosseriebau zunehmend das Quetschnahtschweißen ab. Auch für die Herstellung von längsnahtgeschweißten Rohren vom Band, die lange Zeit eine Domäne des Plasmaschweißens oder des WIG-Mehrkathodenschweißens war, wird immer häufiger der Laserstrahl eingesetzt.

Insgesamt sehen sich die Schweißverfahren heute verstärkt mit der Konkurrenz anderer Fügeverfahren konfrontiert, wie z.B. den Klebetechnologien. Das hat vor allem wirtschaftliche Gründe. Über die Erfüllung gesteigerter technischer Anforderungen z.B. hinsichtlich der Schweißbarkeit neuartiger Werkstoffe hinaus ist daher insbesondere die Senkung der Fertigungskosten ein vorrangiges Entwicklungsziel. Der wesentliche übergeordnete Trend auf dem Gebiet der Schweißtechnik ist somit die weiter zunehmende Automatisierung. So lag Ende des letzten Jahrzehnts der Automatisierungsgrad bezogen auf das abgeschmolzene Schweißgut bereits bei deutlich über 75%. Maßgeblichen Anteil daran hat vor allem die Entwicklung der Schweißroboter, zunehmend auch in Verbindung mit dem Einsatz von Laserschweißanlagen. In direktem Zusammenhang mit der Automatisierung stehen die geeignete Sensorik und die zugehörige Computertechnik. Vor allem die Weiterentwicklung von Sensoren, z.B. zur Schweißnahterkennung und –verfolgung, wird immer wichtiger, insbesondere für adaptive Systeme. Dabei konzentriert man sich neben der Untersuchung einer zunehmenden Zahl physikalisch-technischer Wirkprinzipien nicht zuletzt auf die Suche nach einfachen, robusten Lösungen mit geringem konstruktiven Aufwand.

September 2003 Jürgen Kohlhoff

Sol-Gel-Verfahren

Als Sol-Gel-Verfahren bezeichnet man einen nasschemischen Niedertemperaturprozess zur Herstellung von Pulvern, Beschichtungen, dichten und porösen Volumenkörpern, Fasern, Kompositen und organisch-anorganischen Hybridmaterialien. Die wichtigsten hiermit herstellbaren Werkstoffe sind Gläser, Keramiken und Metalle. Das Verfahren bietet gegenüber konventionellen Methoden eine Reihe von Vorteilen, wie z.B. das Erschmelzen von Gläsern und Metallen oder das Hochtemperatursintern von Keramiken. Hierzu zählen insbesondere die üblicherweise sehr niedrigen Prozesstemperaturen, welche vor allem durch die verfahrensbedingte Homogenität der Elementverteilung auf atomarer bzw. molekularer Ebene ermöglicht werden. Hinzu kommt die durch die chemische Reinheit der Ausgangssubstanzen erreichbare extreme Phasenreinheit der Produkte und die enorme Vielfalt an herstellbaren Stoffen und Strukturen. Das Sol-Gel-Verfahren gewinnt seit ca. 30 Jahren zunehmend an Bedeutung und hat sich in einigen industriellen Bereichen (z.B. der Glasindustrie) bereits etabliert.

Der Sol-Gel-Prozess beginnt mit der Herstellung eines Sols, d.h. einer stabilen Suspension feinster Partikel, Cluster oder größerer Moleküle in einer Flüssigkeit. Hierzu werden so genannte Precursoren wie Metallalkoholate (Alkoxide) oder Metallsalze in eine wässrige Lösung eingemischt, die in der Regel mit einer Säure oder Base als Katalysator sowie oft auch mit organischen Substanzen als Reaktionsmoderatoren versetzt ist. In der Lösung bilden sich aus den Precursoren durch Hydrolyse- und Kondensationsreaktionen kleine Partikel oder größere Moleküle. Diese Teilchen sind mit Abmessungen zwischen einem und wenigen hundert Nanometern so klein, dass im Vergleich zu den zwischenmolekularen Kräften die Wirkung der Schwerkraft vernachlässigbar ist. Daher werden Sole im wesentlichen durch die elektrische Wechselwirkung zwischen den Teilchen und ihren Raumbedarf stabilisiert. Aus dem Sol können z.B. Fasern gezogen oder dünne Beschichtungen hergestellt werden.

Der Übergang vom Sol zum Gel ergibt ein meist elastisches Zwei-Phasen-Material, dessen mechanische Festigkeit auf einem mit Restflüssigkeit gefüllten Feststoffgerüst beruht. Das Gelieren erfolgt entweder durch Eindicken der Lösung, so dass sich die einander annähernden Partikel zusammenlagern, oder durch weitere Hydrolyse- und Kondensationsreaktionen, wobei ein dreidimensional vernetztes raumfüllendes Makromolekül heranwächst. Wird nachfolgend die Restflüssigkeit entfernt, entsteht ein so genanntes Xerogel. Trocknet man konventionell über Wärmezufuhr, schrumpft der Gelkörper unter erheblicher Verringerung der Porosität. Die Schrumpfung ermöglicht die Ausbildung weiterer chemischer Bindungen zwischen zuvor zu weit auseinanderliegenden Reaktionspartnern. So können bereits bei niedrigen Temperaturen kompakte glasartige Volumenkörper, Schichten oder Fasern mit einstellbarer Restporosität und bereits guter thermomechanischer Stabilität hergestellt werden. Andererseits kann durch das so genannte superkritische Trocknen die vom Festphasengerüst des Gels aufgespannte Porosität erhalten bleiben. Hierzu wird das vorhandene Lösungsmittel gegen flüssiges CO_2 ausgetauscht und dieses dann bei ca. 30°C unter sehr hohem Druck wieder entfernt. Auf diese Weise werden Aerogele erzeugt, die bis zu 99 Volumenprozent Poren enthalten. Dieses

Material wird z.B. als transparente Wärmedämmung oder als Detektormaterial eingesetzt.

Durch Destabilisierung von Sol oder frischem Gel, z.B. durch schnelles Rühren, starke Veränderung des pH-Wertes oder abrupte Temperaturänderung, können jedoch auch nanoskalige Pulver direkt ausgefällt werden. Weitaus eleganter sind neuere Methoden, mit denen sich Partikel in einstellbarer Form und Größe produzieren lassen. Hierzu werden z.B. längliche Moleküle, die sowohl über ein wasseranziehendes als auch ein wasserabstoßendes Ende verfügen, bei der Herstellung des Sols in erforderlicher Menge mit in die wässrige Lösung eingebracht. Diese so genannten amphiphilen Moleküle ordnen sich selbstorganisiert so in der Lösung an, dass sich z.B. kugel- oder zylinderförmige Aggregate mit einheitlichem Volumen bilden. In den Hohlräumen im Inneren dieser Aggregate reagieren die Precursoren zum gewünschten Produkt in der angestrebten Geometrie.

Der nasschemische Ansatz erlaubt eine Reihe interessanter anwendungsrelevanter Modifizierungen sowohl an den Precursoren selbst als auch während des Sol-Gel-Prozesses. So können die Precursoren beispeilsweise mit funktionellen organischen Gruppen versehen werden, die den Werkstoff UV-härtbar machen sowie Gläsern bestimmte optische Eigenschaften oder Keramiken eine gewisse Schlagzähigkeit verleihen. Ein Beispiel für derartige Verbundwerkstoffe sind die organisch modifizierten Keramiken (ORMOCER®e). Sie werden u.a. als plastisches dentales Füllmaterial eingesetzt, das unter UV-Bestrahlung zu zahnähnlicher Festigkeit aushärtet. Zur Herstellung von relativ dichten Körpern mit definierter Porosität können dem Sol z.B. entsprechend große Moleküle beigemischt werden, die beim Gelieren als Platzhalter für die Poren dienen und später ausgebrannt werden. Darüber hinaus lassen sich über den Sol-Gel-Prozess durch die direkte chemische Reaktion der Precursoren auf molekularer Ebene auch thermodynamisch unverträgliche Verbindungen synthetisieren. Hierbei handelt es sich z.B. um Gläser oder Legierungen, die bei konventionellem Erschmelzen von Pulvern entmischen, also auf herkömmlichem Weg überhaupt nicht herstellbar sind.

Obwohl nach wie vor auch versucht wird, dichte Volumenkörper über das Sol-Gel-Verfahren herzustellen, eignet es sich in der Regel besser zur Herstellung von Produkten mit großem Oberfläche/Volumen-Verhältnis wie Nanopulver oder dünne Fasern und Schichten, da bei diesen der Trocknungsprozess unproblematisch verläuft. Die Bandbreite möglicher Anwendungen ist enorm. Hierzu zählen u.a. hochreaktive Pulver für die Herstellung von Hochleistungskeramiken, Speziallegierungen oder Sondergläser genauso wie funktionelle Oberflächenbeschichtungen (z.B. schmutzabweisend, entspiegelnd, abdunkelnd, antistatisch, antibakteriell). Biomedizinisch einsetzbar sind Fasern, Geflechte, Beschichtungen, Füllungen oder Medikamententräger. Durch Sol-Gel-Verfahren hergestellte poröse Strukturmaterialien dienen z.B. als Katalysatorträger, Filter oder zur Wärmedämmung. Weitere Produktoptionen werden kontinuierlich durch intensive Forschung erschlossen.

Januar 2003 Stefan Reschke

Trenntechnologien

Trotz der Bemühungen um endkonturnahe Fertigungsverfahren steigt die Bedeutung der Werkstoffbearbeitung. Von besonderem Interesse sind hierbei die Technologien zum Trennen. Nach einer sehr allgemein gehaltenen Definition versteht man darunter alle formändernden Prozesse, bei denen der Zusammenhalt des Werkstückmaterials gezielt gemindert wird. Sie umfasst damit sowohl konventionelle Trennverfahren wie Schneiden oder Schleifen als auch moderne lasergestützte Technologien.

Die Ansprüche an industrielle Trennprozesse sind in den letzten Jahren enorm gestiegen. Gefordert sind nicht nur höhere Produktionsraten und bessere Schnittleistungen, sondern auch die Möglichkeit, sehr komplizierte Formen mit höchster Genauigkeit und sauberen Schnittkanten bearbeiten zu können. Bei den hohen Preisen moderner Werkstoffe ist zudem ein möglichst kleiner Materialverlust ein wichtiges Kriterium. Neue Bearbeitungsverfahren müssen außerdem nicht nur umweltfreundlich sein, immer stärker wird auch ein vollautomatisierbarer Ablauf verlangt.

Mit dem allgemeinen Trend zum Maßschneidern der Werkstoffe sind natürlich auch immer speziellere Eigenschaften der Bearbeitungstechnologien gefordert. Je nach Art und Dicke des zu trennenden Materials sowie den erforderlichen Schnittqualitäten und Maßtoleranzen werden daher in der Praxis verschiedene Trennverfahren eingesetzt. Bei den eigentlichen Schneidverfahren sowie den zerspanenden Prozesstechnologien kommt es vor allem auf die Materialeigenschaften des Trennwerkzeuges an. Das klassische thermische Trennverfahren ist das autogene Brennschneiden. Dazu kommen hier das immer leistungsstärker werdende Laserschneiden sowie das Plasmaschneiden. Als relativ neue Technologie hat inzwischen auch das so genannte Wasserstrahlschneiden Einzug in die Produktionstechnik gefunden.

Bei den zerspanenden Verfahren, zu denen auch formgebende Prozesse wie das Fräsen gehören, werden Späne vom zu bearbeitenden Werkstoff mechanisch abgetrennt. Neue Anforderungen ergeben sich hier speziell aus den immer engeren Toleranzen bei Maß- und Formgenauigkeiten sowie bei den Rauhtiefen der Schnittflächen. Gefordert sind in erster Linie die verwendeten Schneidstoffe, die sowohl mechanisch, thermisch als auch chemisch beansprucht werden. Sie müssen einerseits möglichst hart und verschleißfest sein und andererseits über eine hohe Zähigkeit verfügen, um nicht zu zerbrechen. Den Idealfall eines Schneidstoffs, der gleichzeitig außergewöhnlich zäh und hart ist, gibt es allerdings nicht. Eine Lösung dieses Problems versucht man durch Trennung der Funktionen zwischen einem zähen Basiswerkstoff und einer harten Beschichtung zu erreichen. Die wichtigsten Schneidstoffe sind Cermets (keramikpartikelverstärkte Metalle), Ultrafeinkornhartmetalle, Keramiken sowie synthetische polykristalline Stoffe aus kubischem Bornitrid (cBN) und Diamant (PKD). Die zähesten Varianten finden sich in der Gruppe der so genannten Hochleistungs-Schnellarbeitsstähle. Neben der Verbesserung der Schneidstoffe selbst rücken zunehmend Gesamtsystemaspekte wie die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit z.B. durch Steigerung der Schnittgeschwindigkeiten in den Mittelpunkt des Interesses.

Die thermischen Trennverfahren nutzen hohe Temperaturen zur Abtrennung von Stoffteilchen. Hier behält das autogene Brennschneiden seine große technische Bedeutung, da es das wirtschaftlichste aller Trennverfahren ist, wenn die erzielbare Schneidkantenqualität ausreicht. Die seit einigen Jahren zunehmende Nutzung neuer Legierungen zwingt oft zur Anwendung alternativer Trenntechnologien. Hier wird z.B. das Plasmaschneiden eingesetzt, das die hohen Temperaturen eines gebündelten Plasmastrahls nutzt. In verschiedenen Varianten findet es inzwischen auch bereits seit Jahren produktionstechnische Verwendung.

Eine relativ neue Entwicklung auf dem Gebiet der thermischen Verfahren ist das Laserschneiden, obwohl auch dieses bereits seit längerem praktisch angewendet wird. Zu den besonderen Vorteilen des Lasers als Trennwerkzeug zählen seine hohe Flexibilität und die je nach Variante relativ geringe Schädigung der Schnittflanken. So erleichtert gerade der Laser die Automatisierung des Brennschneidens, die nicht zuletzt aus Gründen der Wirtschaftlichkeit zunehmend angestrebt wird. Man unterscheidet das Schmelzschneiden, bei dem der Werkstoff geschmolzen wird, das Brennschneiden, bei dem das zu schneidende Material auf Zündtemperatur erhitzt und mit zugeführtem Sauerstoff verbrannt wird, sowie das Sublimierschneiden, bei dem der Werkstoff direkt verdampft und mit einem inerten Gasstrahl ausgeblasen wird.

Überall dort, wo thermisches Schneiden nicht möglich ist bzw. zu nicht akzeptablen Veränderungen der Werkstoffeigenschaften an der Schnittfläche führt, bildet das Wasserstrahlschneiden eine technische und wirtschaftliche Alternative. Es ist außerdem dort einsetzbar, wo mechanische Verfahren mit geometrisch bestimmten Schneiden nicht praktikabel sind bzw. eine aufwändige und teure Nacharbeit erfordern. Mit geeigneten abrasiven Zusätzen zum Wasserstrahl lassen sich im Prinzip beliebige Werkstoffe schneiden. Inzwischen befinden sich weltweit bereits weit über 1000 industrielle Anlagen in Betrieb, wobei die ständig verbesserte Leistungsfähigkeit immer neue Anwendungsgebiete eröffnet.

Als wesentlicher übergeordneter Trend im Bereich der Trennverfahren gilt der zunehmende Einsatz kombinierter Prozesse zur Erzielung von Synergieeffekten bei der Schneidleistung. So kann die Bearbeitung bisher schwer zerspanbarer Materialien durch die Einbeziehung so genannter Warmzerspanungsprozesse deutlich verbessert werden, in denen externe Wärmequellen (z.B. Laser) eine lokale Erhitzung bewirken und damit die Zerspanung erleichtern. In der Anlagenkombination Laser-/Plasma-Schneiden übernimmt der Laser die hochgenauen Innenkonturen, während die Außenkonturen im Schnellschnitt vom Plasmabrenner erledigt werden. Eine besonders ausgeklügelte Prozessvariante entsteht durch Einkopplung des Laserstrahls in einen Wasserstrahl. Dadurch nutzt man die Transparenz und die Lichtleitereigenschaften des Wasserstrahls bei bestimmten Wellenlängen aus und erreicht unter anderem eine inhärente Kühlung der vom Laser geschnittenen Flächen.

September 2002 Jürgen Kohlhoff

Supramolekulare Chemie

Als Supramolekulare Chemie bezeichnet man einen vor ca. 30 Jahren entstandenen Zweig der Organischen Chemie, der in letzter Zeit zunehmend an Bedeutung gewinnt. Er behandelt die Zusammenlagerung von Molekülen zu übermolekularen Verbänden und Aggregaten. Diese Strukturen werden durch intermolekulare Wechselwirkungen zusammengehalten, die zwar wesentlich schwächer, jedoch auch langreichweitiger sind als die starken zwischenatomaren Bindungskräfte innerhalb der Moleküle selbst. Damit werden sowohl neue Konzepte für chemische Synthesen als auch eine Vielzahl neuer Produkte möglich.

Grundlage für die Bildung solcher Strukturen ist das Prinzip der so genannten Molekularen Erkennung. In der Gestalt der Moleküle, ihren inneren Bewegungsmöglichkeiten, der Ladungsverteilung und den Bindungsmöglichkeiten ist die Information verschlüsselt, mit welchen Partnern sie in welcher Anordnung durch Selbstorganisation stabile Aggregate bilden können. Man spricht auch von Molekularen Oberflächen (was intramolekulare Hohlräume mit einschließt), anhand derer geeignete Partnermoleküle sich erkennen. In der Biochemie wurde dafür der Begriff „Schlüssel-Schloss-Mechanismus" geprägt.

Solche Molekülstrukturen bilden die biochemischen Grundlagen des Lebens. Beispiele hierfür sind die Paarbildung von DNS-Strängen des Erbgutes, die Faltung und Zusammenlagerung von Proteinen zu Aggregaten, welche sehr komplexe Funktionen mit hoher Selektivität und Genauigkeit ausführen können (molekulare Motoren, Enzyme, Antikörper usw.) oder die Bildung von Zellmembranen. Damit erst werden biologische Funktionalitäten möglich, welche einzelne Moleküle nicht erfüllen könnten, wie die selektive Katalyse chemischer Umwandlungen sowie der Transport von Gastmolekülen oder -ionen durch Medien und Grenzflächen.

Diese in der Natur beobachteten Prinzipien können einem bionischen Ansatz folgend auch technisch genutzt werden. So lassen sich mit den Methoden der modernen Organischen Chemie Moleküle maßschneidern, die aufgrund ihres inneren Aufbaus supramolekulare Architekturen mit bestimmten gewünschten Funktionen bilden. Die Eigenschaften der so erzeugten Materialien werden stark von diesen Architekturen und weniger vom inneren Aufbau der einzelnen Moleküle geprägt. Daher werden die einzelnen Moleküle hier nicht mehr nach ihrer inneren Struktur sondern nach ihrer Form oder Funktion als Bausteine für molekulare Architekturen klassifiziert. Damit stößt die Chemie in den Bereich der Nanotechnologie vor, was aus chemischer Sicht die Beherrschung besonders großer Strukturen bedeutet.

Besteht eine supramolekulare Struktur aus einer großen, undefinierten Zahl regelmäßig angeordneter Einzelmoleküle, so bezeichnet man sie als Supramolekulare Anordnung. Eine seit langem bekannte Klasse solcher Anordnungen sind die Flüssigkristalle. Hier bilden langgestreckte oder scheibenförmige organische Moleküle eine kristallähnliche Ordnung mit einer Vorzugsrichtung aus, wobei jedoch Platzwechselhäufigkeit, Viskosität und Elastizität denen einer Flüssigkeit entsprechen. In der Natur wird der flüssigkristalline Zustand von Zellmembranen eingenommen. Technische Anwendung finden Flüssigkris-

talle in der Displaytechnik (LCDs), in der Optoelektronik, in Temperatur- und Drucksensoren sowie zukünftig möglicherweise in Bauteilen für optische Computer. Es können auch Polymere synthetisiert werden, bei denen sich bestimmte Abschnitte der Polymermoleküle zu flüssigkristallinen Domänen zusammenlagern, was neuartige Materialeigenschaften zur Folge hat. Andererseits ist es auch möglich, Moleküle in flüssigkristalliner Ordnung „nachträglich" zu Polymeren zu vernetzen.

Eine besondere Form flüssigkristalliner Supramolekularer Anordnungen kann aus Tensiden hergestellt werden. Tenside sind aus einem wasser- und einem fettliebenden Teil zusammengesetzte grenzflächenaktive Stoffe, wie sie z.B. in Waschmitteln eingesetzt werden. Bei geeigneter Dispersion in einem Lösungsmittel bilden sie kugel- oder röhrenförmige Molekülaggregate (Mizellen, Liposomen), die einen Hohlraum umhüllen, der andere Moleküle enthalten kann. Solche Aggregate können beispielsweise als „Molekulare Gerüste" für die Synthese von nanoporösen Keramiken oder Nanopartikeln dienen oder den Transfer chemischer Substanzen in ein Medium ermöglichen, in dem diese eigentlich nicht löslich sind. Eine weitere interessante Anwendungsoption ist die gezielte Modifizierung der Eigenschaften von Festkörperoberflächen durch Beschichtung mit Filmen aus Tensidmolekülen.

Im Gegensatz zu den größenmäßig undefinierten Supramolekularen Anordnungen werden die so genannten Supermoleküle durch die Zusammenlagerung einer festgelegten Anzahl von Molekülen zu wohldefinierten, diskreten Einheiten gebildet. Die wichtigste Form von solchen Supermolekülen wird Wirt-Gast-Verbindungen genannt. Hierbei gruppieren sich ein oder mehrere Wirtsmoleküle (auch Rezeptoren genannt) um ein Ion oder Molekül (Gast oder Substrat genannt). Durch Maßschneidern des Wirtes kann eine hohe Selektivität bei der Molekularen Erkennung erreicht werden. Die Änderung der physikalisch-chemischen Eigenschaften des Wirtes durch die Bildung des Supermoleküls kann beispielsweise durch Verwendung in Chemo- und Biosensoren sowie in Zukunft auch in chemischen Informationsspeichern und Schaltern einer molekularen Nanoelektronik genutzt werden. Weiterhin läßt sich durch die Funktionalisierung der Außenseite der Wirtsmoleküle neben den Lösungseigenschaften auch die Molekulare Erkennung einstellen, der das Supermolekül beispielsweise im Organismus unterliegt. Auf diese Weise können sehr spezifische medizinische Diagnose- und Wirkstofftransportsysteme entwickelt werden. So wird beispielsweise an der Verwirklichung einer ausschließlich die Krebszellen beeinflussenden Chemotherapie gearbeitet.

Februar 2002 Matthias Grüne

Rastersondentechniken

Bei den so genannten Rastersondentechniken handelt es sich um eine relativ junge und sich rasch weiterentwickelnde Familie hochauflösender Untersuchungs- und auch Manipulationsmethoden auf meist mechanischer Basis, die teilweise sogar eine Art direkten Blick auf die atomare Struktur von Oberflächen ermöglichen. Sie bilden gleichzeitig eine maßgebliche instrumentelle Grundlage für die Nanotechnik. Durch die geringen Belastungen, die Rastersonden auf Probenoberflächen ausüben, können mit einigen dieser Verfahren auch biologische Systeme zerstörungsfrei untersucht werden. Es gibt heute bereits weit über zwanzig verschiedene Rastersondentechniken.

Grundprinzip aller Rastersondentechniken ist das zeilenförmige Abtasten der Oberfläche mit einer soweit als möglich miniaturisierten Sonde, die entsprechend den jeweils zu untersuchenden Eigenschaften ausgewählt oder neu entwickelt wird. Von der Feinheit der Sondenspitze hängt im allgemeinen auch deren dreidimensionales Auflösungsvermögen ab: je feiner sie ist, desto mehr Details der Probe werden abbildbar. Idealerweise besteht die Sondenspitze aus einem einzelnen Atom. In diesem Fall lassen sich nicht nur die Lage der einzelnen Oberflächenatome genau kartieren, sondern seit kurzem auch die chemischen Bindungen zwischen ihnen.

Je nach apparativem Aufbau wird entweder die Sonde oder die Probe bewegt, der jeweilige Gegenpart steht fest. Für das Abrastern werden piezoelektrische Keramiken eingesetzt, die einen im Sub-Nanometerbereich hochgenauen Vorschub in allen drei Raumrichtungen und damit Nanoanalytik oder das Umgruppieren von Atomen mit Rastersonden überhaupt erst ermöglichen. Eine der wesentlichen Voraussetzungen für den erfolgreichen Einsatz der Methoden ist die vibrationsfreie Lagerung der gesamten Anordnung, da selbst leichte Erschütterungen von aussen zu erheblichen Auslenkungen des Messsystems führen können.

Alle heutigen Rastersondentechniken haben ihren Ursprung in dem 1981 vorgestellten Rastertunnelmikroskop (STM, Scanning Tunneling Microscope), für dessen Entwicklung Binnig und Rohrer 1986 einen Nobelpreis verliehen bekamen. STMs nutzen zur Abbildung den so genannten Tunnelstrom, der bei geringem Abstand zwischen einer Oberfläche und einer sehr spitzen Sonde fließt (tunnelt), wenn zwischen diesen eine Spannung angelegt wird. Nun kann die Sonde z.B. unter Konstanthaltung des Tunnelstroms die Probe abrastern und über die dadurch verursachte Höhenauslenkung der Sonde ein atomar genaues Abbild der Oberflächenbeschaffenheit kartieren. Genaugenommen „fühlt" oder ertastet die Sonde also die Probe. Mit dieser Methode lassen sich auch einzelne Atome aus der Probenoberfläche aufnehmen und versetzen. Eine interessante Weiterentwicklung ist z.B. das Elektrochemische Rastertunnelmikroskop. Hiermit können elektrochemische Prozesse an der Grenzfläche eines Metalls zu umgebender flüssiger Phase in-situ untersucht werden, z.B. das Rosten von Blechteilen.

Die Rasterkraftmikroskope (AFM, Atomic Force Microscope), derzeit die größte und vielfältigste Gruppe unter den Rastersondenmethoden, sind vom Aufbau her sehr eng mit den STMs verwandt. Sie nutzen jedoch nicht den Tunnelstrom, sondern jeweils die zwi-

schen Spitze und Probe auftretenden abstoßenden und anziehenden physikalischen, chemischen sowie auch biologischen Wechselwirkungen, die meist zu einer vermessbaren Höhen- und Seitenauslenkung der Sondenzunge führen. Dadurch sind sie primär unabhängig von den elektrischen Eigenschaften der Probe und machen auch nichtleitende Oberflächen direkt zugänglich. So dienen z.B. magnetische Spitzen zur Qualitätskontrolle bei Festplattenspeichern oder Disketten, Thermofühlerspitzen messen neben der Topographie die lokale Erhitzung von Leiterbahnen in elektronischen Schaltungen und mit speziellen Biomolekülen beschichtete Spitzen finden und analysieren z.B. ganz spezifische aktive Stellen an Enzymen. Darüber hinaus können AFMs auch als Schreib-/Lesegerät für neuartige Datenspeicher eingesetzt werden, die sich in der Entwicklung befinden.

In einer weiteren Gruppe werden alle Methoden zusammengefasst, die nicht eine nadelartige Spitze, sondern beispielsweise Licht, Partikel oder elektrolytgefüllte Glaspipetten als Sonde verwenden. Von diesen sei als Beispiel das neu entwickelte so genannte Photonische Kraftmikroskop hervorgehoben. Hier dient als Sonde ein kleines Partikel aus Metall, Glas oder Latex mit einem Durchmesser von wenigen 10 nm bis ca. 1 µm, das von den Dipol- und Streukräften im Fokus eines Laserstrahls über der Probenoberfläche gehalten und geführt wird. Es besteht also keine mechanische Verbindung zwischen Sonde und Mikroskop. Dadurch werden die Belastungen auf der Probe noch einmal um den Faktor 100 geringer, was eine absolut beschädigungsfreie Untersuchung lebender biologischer Proben ermöglicht. Gemessen wird die Variation des vom Partikel gestreuten Lichts, aus der sich die Oberflächenkonturen der Probe rechnerisch ermitteln lassen.

Schon seit einem Jahrzehnt werden viele der Rastersondentechniken auch in der industriellen Praxis jenseits der reinen Forschung eingesetzt, vor allem in der Qualitätskontrolle. Hierbei spielt jedoch meist nicht die atomare Auflösung die zentrale Rolle, sondern die Möglichkeit zur sehr schnellen, unkomplizierten und hochaufgelösten Überprüfung auch größerer Flächen in der Größenordnung von Quadratmillimetern.

November 2001 Stefan Reschke

Tribologie

Die relativ junge Wissenschaftsdisziplin Tribologie befasst sich mit der Erforschung der Phänomene von Reibung, Verschleiß und Schmierung. Insbesondere aus volkswirtschaftlicher Sicht kommt ihr eine ständig zunehmende Bedeutung zu. So liegen die durch Reibung und Verschleiß verursachten Schäden in den Industrienationen bei 5-6 % des Bruttosozialprodukts, in Deutschland also im dreistelligen Milliardenbereich.

Hauptziel der Tribologie ist die Suche nach Möglichkeiten zur Reduzierung von Reibung und der damit verbundenen Abnutzung. Hierfür hat man im Verlauf der Geschichte eine Vielzahl pragmatischer Lösungen gefunden, und bis heute wird der Erkenntnisfortschritt der Tribologie noch stark durch empirisches Vorgehen geprägt. In letzter Zeit gibt es jedoch zunehmende Bemühungen zum theoretischen Verständnis der zugrundeliegenden physikalischen und chemischen Phänomene. Diese sind in der Regel geschwindigkeitsabhängig und treten überall dort auf, wo Oberflächen relativ zueinander bewegt werden oder mit sonstigen bewegten Medien, wie z.B. Sand, Wasser oder Luft, wechselwirken. Daher hat die Tribologie einen engen Bezug zur Entwicklung optimierter Werkstoffe für beanspruchte Oberflächen und geeigneter flüssiger wie fester Schmierstoffe.

Ein wesentlicher Forschungsansatz der Tribologie geht von Modellsystemen aus, in denen größere Massen unter Auflast gegeneinander bewegt werden. Sie spiegeln Betriebszustände wider, die uns im täglichen Leben, beispielsweise in Fahrzeugen und Maschinen, begegnen. Besonders wichtig ist hierbei die spezifische Flächenpressung, deren Größe von Auflast und realer Kontaktfläche bestimmt wird, welche wiederum von Oberflächeneigenschaften wie Struktur, Rauhigkeit und Härte abhängt. Hier kommt es unvermeidlich zu Abrieb, also schädlichen Verschleißerscheinungen bei den Reibpartnern, sowie oft auch zu einer komplexen Abfolge chemischer Reaktionen an den Kontaktflächen. Maßgebliche Forschungsschwerpunkte liegen deshalb auf der werkstoffseitigen und geometrischen Oberflächenoptimierung, sowie der Verbesserung von Gleiteigenschaften durch neue maßgeschneiderte Schmierstoffe.

Ebenfalls große Bedeutung kommt der anwendungsspezifischen Auswahl geeigneter Werkstoffpaarungen zu. Die Weiterentwicklungen im Werkstoffbereich erlauben zunehmend eine Trennung in Struktur- und Funktionswerkstoffe so, dass tragende Teile aus günstigen Materialien mit dünnen, neuen und meist noch sehr teueren Spezialschichten veredelt werden. Hier gewinnen neben den über Gasphasenabscheidung aufgebrachten keramischen Schichten, wie z.B. Titannitrid oder Titancarbid, zunehmend diamantartige Schichten an Bedeutung. Diese sogenannten DLC-Schichten (Diamond-Like Carbon) bestehen aus Kohlenstoff, Wasserstoff und ggf. weiteren Elementen. Sie sind extrem hart und verschleißarm und können durch gezielten Einbau weiterer Elemente wie Fluor, Silizium, Titan etc. in ihren Eigenschaften auf spezifische Anwendungen hin maßgeschneidert werden. So lassen sich neben diamantähnlicher Härte und hoher Temperaturbeständigkeit (derzeit bis ca. 500°C) auch Benetzungs- bzw. Hafteigenschaften gegenüber Wasser oder Ölen über weite Bereiche einstellen und damit Standzeiten und Notlaufeigenschaften verbessern.

Ein weiterer Schwerpunkt bildet die Entwicklung von Schmiermitteln. Dies ist ein besonders interessantes Forschungsgebiet, da die zugehörige Chemie (Tribochemie) meist sehr komplex ist. So zeigen nicht nur fast alle Werkstoffe unterschiedliche chemische Reaktionen mit Schmiermitteln, wie z.B. Ölen und Fetten, sondern selbst ein und dasselbe Werkstoff-Schmiermittel-System kann seine Tribochemie mit Temperatur, Geschwindigkeit und Umweltbedingungen erheblich verändern. Inzwischen gibt es für viele Werkstoffklassen spezifische Basisschmierstoffe, die durch Zugabe von Additiven an die jeweiligen Betriebsbedingungen anpaßbar sind.

Neben dieser Fremdschmierung von außen, also z.B. durch Fette und Öle, gehen neuere Entwicklungen dazu über, Festschmierstoffe in die belasteten Oberflächen direkt einzulagern. Im Temperaturbereich unterhalb 200°C handelt es sich meist um Polytetrafluorethylen (PTFE, Teflon) und andere fluorierte Kohlenstoffverbindungen in PTFE oder Graphit. Für Hochtemperaturanwendungen, v.a. oberhalb von 1000°C, sind selbstschmierende Einlagerungen aus graphitischem Kohlenstoff oder Bornitrid, die auch in-situ durch Pyrolyse metallorganischer Beschichtungen erzeugt werden können, sowie dünne oxidische Schichten besonders interessant.

Für die Zukunft ist damit zu rechnen, dass sich neuartige Materialmodifikationen, wie Fullerene, Nanoröhren und Nanocluster aus Kohlenstoff, Bornitrid oder Molybdänsulfid, als Nanokugeln oder –walzen in speziellen Anwendungen zur Reibungsverminderung einsetzen lassen. Erste vielversprechende Ergebnisse aus der Forschung liegen bereits vor. Hinzu kommen Konzepte aus dem Maschinenbau wie werkstoff- und anwendungsgerechtes Konstruieren, die neuartige Tribosysteme ermöglichen.

Als ein völlig neuer Wissenschaftszweig gilt die sog. Nanotribologie, die sich in letzter Zeit auf der Basis der innovativen Rastersondentechniken entwickelt hat. Sie arbeitet mit Auflasten im Mikrogrammbereich und kann so bestenfalls einige Atomlagen tief wirken. Der Schwerpunkt nanotribologischer Untersuchungen liegt darin, ein fundamentales Verständnis von Ober- und Grenzflächenphänomenen zu entwickeln, sowie für Reibung und Schmierung wichtige physikalische und chemische Vorgänge an mikro- und nanostrukturierten Oberflächen unter Ausschluß verfälschender Umwelteinflüsse zu analysieren. Hierbei konzentriert sich das Interesse vorerst auf die atomaren Wechselwirkungen zwischen Rastersondenspitze und untersuchter Oberfläche, die entweder atomar sauber oder mit einer moleküldicken Schmiermittelschicht belegt ist.

August 2000 Stefan Reschke

Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung

Technologien zur Materialprüfung dienen der werkstoffgebundenen Qualitätssicherung und haben damit eine große Bedeutung für die Funktionsfähigkeit technischer Produkte. Das gilt erst recht vor dem Hintergrund verschärfter Sicherheitsanforderungen und zunehmender Bemühungen um die Kostenoptimierung in Herstellung und Betrieb, wo man Ausschuß vermeiden und Sicherheitszuschläge in den Materialeigenschaften minimieren möchte. Eine besondere Rolle spielen hier die Verfahren zur Zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, da sie die Gebrauchseigenschaften der untersuchten Objekte nicht beeinflussen und damit z.B. eine hundertprozentige Kontrolle ermöglichen.

Grundlage für die Funktion zerstörungsfreier Prüfverfahren sind gesetzmäßige Abhängigkeiten zwischen bestimmten quantifizierbaren physikalischen, also z.B. elektrischen oder magnetischen, Eigenschaften eines Werkstoffs und seinem makro- oder mikroskopischen Aufbau. Dieser wiederum kann z.B. im Zusammenhang mit mechanischen Charakteristika wie der Härte oder der Festigkeit stehen, die damit indirekt meßbar werden.

Während sich die Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung noch in den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts vor allem auf stichprobenartige Durchstrahlungsprüfungen mittels Röntgenstrahlen außerhalb der Fertigung beschränkte, begann vor etwa 60 Jahren ihre zunehmende Integration in den Fertigungsprozeß. Heute spielen ihre Verfahren in allen Phasen des Werkstofflebens eine Rolle, von der Erforschung der Grundlagen (z.B. Struktur-Eigenschafts-Beziehungen) über die Herstellung bis hin zu Betrieb und Instandhaltung. Ihre Hauptaufgaben sind die Defektoskopie, d.h. die Suche nach Fehlern im Volumen oder an der Oberfläche, die Dicken- und Schichtdickenmessung, die Gefüge- und Legierungskontrolle, die Messung mechanischer Spannungen und die Ermittlung von mechanischen oder anderen Werkstoffkennwerten. Für diese Zwecke gibt es heute eine Vielzahl von Einzeltechnologien.

Schwerpunkt der Anwendungen ist nach wie vor die Bewertung von Werkstoffehlern. Von Bedeutung sind hier insbesondere solche Verfahren, die sowohl die Existenz als auch den Ort und die Größe potentiell gefährlicher Fehlstellen aufklären können. Besondere Beachtung finden daher die Prüfmethoden Radiographie, Ultraschalluntersuchung, Wirbelstromverfahren, Magnetpulverprüfung, Penetrationsverfahren, Thermographie und akustische Emission.

Radiographische Methoden beruhen darauf, daß Röntgen- oder Gammastrahlen in Fehlerstellen weniger absorbiert werden als im fehlerfreien Material. Auch mit Ultraschallverfahren lassen sich Größe und Lage von Materialfehlern bestimmen. Sie beruhen auf der Reflexion oder Schwächung hochfrequenter elastischer Wellen. Magnetische Methoden sind für das Auffinden von Fehlern nahe der Oberfläche eines ferromagnetischen Werkstückes geeignet, da diese den Verlauf magnetischer Feldlinien erheblich verändern. Wirbelstromverfahren beruhen auf der Erzeugung eines mit der Induktion eines elektrischen Wirbelstromes im Werkstoff verbundenen Magnetfeldes, dessen Ausprägung durch Diskontinuitäten im Material spezifisch beeinflußt wird. Ihre Anwendung ist jedoch auf elektrisch leitende Stoffe beschränkt. Mit Penetrationsmethoden können Fehler (z.B.

Risse) an einer Materialoberfläche aufgrund des Eindringens von Farblösungen infolge der Kapillarwirkung nachgewiesen werden. Thermographische Prozesse zur Fehleranalyse beruhen dagegen auf dem Nachweis von Temperaturdifferenzen, die durch unterschiedliche thermische Eigenschaften bedingt sind. Bei der akustischen Emission schließlich werden extrem schwache Geräusche, die mit dem Wachstum von Materialfehlern verbunden sind, mittels hochempfindlicher Mikrofone nachgewiesen.

Daneben erlangen mehr und mehr auch sog. mikroskopische Effekte, wie sie aus der festkörperphysikalischen Grundlagenforschung seit längerem bekannt sind, Bedeutung für die Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung. Dazu gehören die Kernspintomographie oder die Rastermikroskopieverfahren, welche mit immer neuen Wirkprinzipien konzipiert und erprobt werden. Auch die Neutronenbeugung und die Positronenannihilation sind hier zu nennen. Außerdem steigt das Interesse daran, die bei der Magnetisierung in der Elementarbereichsstruktur ferromagnetischer Materialien ablaufenden mikroskopischen Wandverschiebungs- und Umklapp-Prozesse über das sog. Barkhausen-Rauschen für die zerstörungsfreie Prüfung von Versetzungsdichten auszunutzen.

Eine besondere Herausforderung stellt die Prüfung neuartiger Werkstoffe dar, die z.B. aufgrund ihrer Anisotropie (Faserverbunde) oder ihrer Sprödbruchempfindlichkeit bei Vorhandensein kleinster Fehler (Keramiken) neue Maßstäbe für die Prüfung setzen bzw. die Aufklärung ganz neuer Größen, wie z.B. Delaminationen, erfordern. Gerade die zerstörungsfreien Verfahren bereiten hier besondere Schwierigkeiten, da sie ein tiefgreifendes Verständnis physikalischer Wirkmechanismen im Werkstoff voraussetzen. Daraus ergibt sich eine enge gegenseitige Beeinflussung zwischen der Entwicklung neuer Werkstoffe und neuer Prüfverfahren.

Von wesentlicher übergeordneter Bedeutung im Bereich der Zerstörungsfreien Werkstoffprüfung ist die in der Praxis stark zunehmende Einbeziehung rechnergestützter Verfahren. Dabei spielen die sog. Wissensbasierten Systeme schon heute eine erwähnenswerte Rolle. Außerdem ist der Trend erkennbar, bereits die Herstellungsprozesse durch zerstörungsfreie Prüfverfahren zu steuern (process control) und mit ihrer Hilfe auch den Zustand der Maschinen und Anlagen zu überwachen (condition monitoring). Insgesamt richten sich die Bemühungen auf eine ganzheitliche sog. Computer Aided Quality Assurance (CAQ), das heißt auf ein integriertes Rechnergesamtsystem, in dem alle qualitätsrelevanten Daten verwaltet werden. Mit den zusätzlichen Möglichkeiten, die durch diese sekundären Entwicklungen eröffnet werden, wird auch die Bedeutung der einzelnen Prüfverfahren selbst noch einmal steigen.

Mai 2000 Jürgen Kohlhoff

Rapid Prototyping

Unter dem Sammelbegriff Rapid Prototyping (RP) versteht man die computergestützte schnelle Herstellung dreidimensionaler Designmodelle und Prototypen mittels Spezialmaschinen. Das RP automatisiert die handwerkliche Tätigkeit des Modellbauers und wird bisher vor allem für kleinere oder kompliziert strukturierte Modelle verwendet. Es hat sich aus dem wirtschaftlichen Zwang zu einer möglichst schnellen Umsetzung von Ideen in marktreife Produkte entwickelt. Allerdings ermöglicht erst die Nutzung moderner Computertechnologie in Kombination mit neuartigen RP-Maschinen sowie Methoden zur schnellen Materialmodifikation den effizienten Bau komplexer Modelle. Das RP greift immer auf Daten aus dem Computer Aided Design (CAD) zurück, die unmittelbar für Formenbau und Serienfertigung herangezogen werden können. Sie bilden eine stets abrufbare, normierte Kommunikationseinheit.

Im allgemeinen werden RP-Modelle aus geeigneten Werkstoffen, wie z.B. aus härtbaren Kunststoffen, Schicht für Schicht aufgebaut. Hier besteht zwischen Prototyp und CAD-Entwurf ein unmittelbarer funktionaler Zusammenhang, da dieser Entwurf für das RP schon im Computer in 0,1 bis 0,3 mm dünne Schichten unterteilt werden kann. Allerdings finden auch konventionelle Verfahren wie Fräsen, Fügen oder Gießen Anwendung. Die sog. Positivmodelle dienen Design und Demonstration genauso wie der Funktionsprüfung oder als Vorserie. Ein wichtiger Zweig des RP ist das sog. Rapid Tooling, mit dem Negativmodelle oder -formen z.B. für Abgüsse oder Werkzeuge hergestellt werden. Zwischen dem RP und der Serienproduktion von Gütern ist das sog. Rapid Manufacturing angesiedelt, mit dessen Hilfe auch Kleinstserien relativ kostengünstig herstellbar sind. Die größten über RP-Verfahren in einem Schritt herstellbaren Modelle haben derzeit eine Kantenlänge von ca. 100 cm. Der jeweilige Zeitbedarf ist generell abhängig von der Komplexität und Größe des Modells sowie dem gewählten Verfahren und liegt etwa zwischen einer und einhundert Stunden.

Heute kennt man rund ein Dutzend verschiedener RP-Verfahren, die sich technologisch teil-weise überschneiden und in ihrer wirtschaftlichen Bedeutung erheblich unterscheiden. Die drei wichtigsten sind die Stereolithographie, das Selektive Lasersintern und eine Laminated Object Manufacturing genannte Schichtklebetechnik. Sie nutzen computergesteuerte Laserstrahlung zur Formgebung. Andere Verfahren arbeiten ohne Laserunterstützung. So kann der Modellaufbau z.B. durch spezielle Kombinationen aus Belichtungslampen und Masken erfolgen. Möglich sind auch gesteuerte Extrusionsmethoden, die ähnlich Tintenstrahldruckern funktionieren.

Bei der Stereolithographie stammen die Ausgangswerkstoffe aus der Gruppe der photosensiblen Monomere. Das Herstellen des Modells erfolgt, indem diese Photomonomere schichtweise durch Laserlicht an den Stellen polymerisiert und ausgehärtet werden, die zur Modellstruktur gehören. Üblicherweise erfolgt der Aufbau des Modells auf einer Plattform, die in einem mit Monomerlösung gefüllten Vorratsbehälter steht. Nach jedem Polymerisationsschritt wird sie um eine Stufe im Submillimeterbereich abgesenkt, so daß die jeweils gebildete Schicht wiederum mit Lösung bedeckt ist. Nach der Fertigstellung wird die Monomerlösung abgegossen, das Modell gereinigt und gegebenenfalls nachbe-

handelt. Die Stereolithographie eignet sich besonders bei dünnen Wandstärken bis 1 mm und für die Herstellung von Kleinteilen.

Beim Selektiven Lasersintern werden Kunststoffe, Metallegierungen oder Wachse in verschiedenen Pulvermodifikationen durch den Laserstrahl aufgeschmolzen und verdichtet. In der Testphase befinden sich Verfahren zum Lasersintern keramischer Pulver. Das Modell entsteht schichtweise in einem Pulverbett analog zur Stereolithographie. Das Selektive Lasersintern eignet sich besonders bei Wandstärken unter 3 mm und erzielt hohe Festigkeiten. Allerdings kann im Rahmen des Rapid Manufacturing meist nur durch thermische Nachbehandlung und Polieren der Oberflächen die volle Betriebsfestigkeit erreicht werden.

Für das Laminated Object Manufacturing werden mittels Laserstrahl die gewünschten Konturen aus Folien herausgeschnitten und diese schichtweise übereinander verklebt. Als Werkstoffe kommen hier Halbzeuge aus Polymeren, Metallen, Keramiken und Papier in Betracht. Die Stärke dieses Verfahrens liegt in der problemlosen Herstellung großer Wanddicken und Bauteile. Zudem ist es sehr kostengünstig und relativ schnell.

Eine Weiterentwicklung des RP ist das sog. Virtual Prototyping, bei dem der Prototyp bereits im Computer virtuell erstellt, im Detail betrachtet und getestet werden kann. Dieses Verfahren wird bereits in verschiedenen Anwendungsbereichen wie z.B. dem Automobilbau eingesetzt. Hierdurch läßt sich die Prototypengestaltung vor dem Bau des Modells weiter optimieren, was vor allem bei komplexen Systemen wirtschaftliche Vorteile bietet. Idealerweise dient dann der gebaute Prototyp nur noch der Verbesserung des virtuellen Modells im Computer.

Das Virtual Prototyping wiederum ist als Vorstufe zum sog. Virtual Integrated Manufacturing zu sehen. Dieses im Entstehen begriffene Fabrikationskonzept integriert alle wesentlichen Aspekte von Rapid Prototyping/Tooling/Manufacturing sowie Simulationstechnik und Computer Integrated Manufacturing (CIM). Durch Einbeziehung moderner Kommunikationstechnik und Internet- bzw. Web-basierter Technologien gelingt es immer besser, Produkte fristgerecht weltumspannend direkt an dem Ort herzustellen, an dem sie benötigt werden. Erste kommerzielle Schritte in diese Product-on-Demand genannte Richtung weisen sog. 3D-Faxe, die sich derzeit in der Entwicklung befinden. Eine besondere Rolle wird hier das Rapid Manufacturing im Rahmen der dezentralen Ersatzteilversorgung z.B. auf Schiffen oder im Weltraum spielen.

Januar 2000 Stefan Reschke

Kombinatorische Chemie

Die Kombinatorische Chemie ist eine neue Strategie zur rationellen Synthese einer großen Anzahl chemischer Verbindungen einschließlich der Überprüfung ihrer Eigenschaften. Ihr Ziel ist der Aufbau eine Sammlung von Stoffen, der sog. Substanzbibliothek, in der nach den passenden Produkten für eine bestimmte Anwendung gesucht wird. Dazu werden definierte Ausgangsstoffe systematisch in geeigneten Reaktionen in allen möglichen Kombinationen so zusammengesetzt oder chemisch verändert, daß gleichzeitig eine große Vielfalt chemisch verwandter Produkte entsteht. Diese werden dann automatisch je nach Anwendungsfeld auf Eigenschaften wie biologische Wirksamkeit, elektrische Leitfähigkeit oder katalytische Wirkung getestet. Die Anforderungen der Kombinatorischen Chemie sind auch ein Schrittmacher für Entwicklungen auf den Gebieten Synthesechemie, Analysentechnik, Prozeßsteuerung und -automatisierung.

Die Kombinatorische Chemie ist ein Konzept, das in vielen Bereichen die Suche nach neuen Substanzen extrem beschleunigen und trotz erforderlicher Investitionen Kosten einsparen kann. Das hier bewußt eingesetzte Prinzip Zufall hat seine Parallele im Vorgehen der Natur, die bei der biologischen Evolution aus wenigen Grundbausteinen z.B. Millionen verschiedener Eiweißstoffe und Varianten der DNA geschaffen hat. Bei der Kombinatorischen Chemie geht es, wie auch in der Natur, nicht nur um das Erzielen von Zufallstreffern, sondern auch um die effiziente evolutionäre Verbesserung bekannter Strukturen.

Die Kombinatorische Chemie kann auch eine gute Ergänzung zu dem vom Ansatz her grundverschiedenen rechnergestützten Maßschneidern von Molekülen (Computational Modelling) sein. So zeigt sich, daß die Eigenschaften von am Computer konstruierten Molekülen aufgrund unvorhersehbarer Wechselwirkungen in der Praxis oftmals nicht den Erwartungen entsprechen. So kann z.B. ein potentielles Arzneimittel, dessen molekulare Struktur in der Computersimulation nach dem Schlüssel-Schloß-Prinzip zu einem bestimmten Zielmolekül paßt, auf seinem Weg durch den Körper schon verändert werden. Es kann auch beim Annähern an das Zielmolekül dessen Form so verändern, daß es nicht zur gewünschten Wechselwirkung kommt. Kombinatorische Chemie und Computational Modelling können sich hier synergetisch ergänzen, indem aus der Modellierung stammende Strukturvorschläge zur Optimierung im Labor oder sogar bereits virtuell am Rechner nach kombinatorischen Prinzipien variiert werden (Virtuelle Kombinatorische Chemie).

Das Konzept der Kombinatorischen Chemie wurde zuerst für die Suche nach neuen medizinischen Wirkstoffen eingesetzt und ist hier am weitesten fortgeschritten. Heute werden in Syntheseautomaten aus wenigen verschiedenen Ausgangsmolekülen Verbindungsbibliotheken synthetisiert, die bis zu Millionen verschiedener Substanzen enthalten können. Diese Bibliotheken werden ohne vorherige Trennung oder genaue Kenntnis der Einzelsubstanzen mit automatisierten Analyseverfahren auf eine spezifische biologische Aktivität hin überprüft (Hochleistungsscreening). Zeigt sich in einer Mischung eine aktive Verbindung, wird sie isoliert und ihre genaue Struktur aufgeklärt. Auf diese Weise hofft man, bislang unbekannte Leitstrukturen, also neue Wirkstofftypen, zu finden. Wurde das

Grundgerüst für einen möglichen neuen Wirkstoff identifiziert, versucht man die Substanz in parallelen Reaktionen durch geringe molekulare Anpassungen auf die gewünschte Wirkung hin zu optimieren.

Eine für die Wirkstoffsuche interessante Variante der Kombinatorischen Chemie ist die Kombinatorische Biologie. Hier bedient man sich zur Produktion kompliziert aufgebauter Naturstoffe der Biotechnologie. Mit gentechnischen Variationen an den produzierenden Mikroorganismen lassen sich dann beliebige Mutationen der Naturstoffe herstellen.

Auch in den Materialwissenschaften gibt es Anwendungsbereiche der Kombinatorischen Chemie, z.B. bei der Suche nach Hochtemperatur-Supraleitern. So läßt sich die Abscheidung dünner Schichten verschiedener Metalloxide aufeinander mit Hilfe von Masken so variieren, daß mit wenigen Arbeitsschritten eine große Vielfalt an Kombinationen entsteht. Nach dem Sintern erfolgt der automatisierte Test auf Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur. Auf vergleichbare Weise sucht man nach neuen magnetoresistiven Materialien für Datenspeicher, wobei die Magnetisierung der kleinen Proben mit besonders empfindlichen Magnetfeldsensoren (z.B. SQUIDs) gemessen wird.

Die automatisierte Dünnschichtsynthese zum Aufbau von kombinatorischen Substanzbibliotheken wird auch bei der Suche nach neuen Phosphoren angewandt. Diese Verbindungen, die beim Beschuß mit Elektronen Licht emittieren, sind wichtiger Bestandteil von Kathodenstrahlröhren. Gesucht werden Phosphore, die Licht bei geringeren Elektronenenergien emittieren können. Damit würde eine flachere Bauweise dieser Bildschirme ermöglicht. Das Screening läßt sich sehr einfach unter UV-Licht durchführen.

Kombinatorische Materialien mit besonders guten kommerziellen Aussichten sind die in der Industrie allgegenwärtigen Katalysatoren. Gesucht werden z.B. katalytische Beschichtungen, die in Direkt-Methanolbrennstoffzellen die Strom erzeugende chemische Reaktion an der Membran beschleunigen. Entscheidend für den Einsatz der Kombinatorischen Chemie bei der Entwicklung eines Katalysators ist die Möglichkeit zur automatisierten Messung der Katalysatoraktivität mit wenig Aufwand. Hierfür sind schon verschiedene Effekte wie Fluoreszenz, Wärmeabstrahlung oder pH-Änderung genutzt worden.

November 1999 Ulrik Neupert

Plasmatechnik

Als Plasma bezeichnet man ein Gemisch aus positiven und negativen Ladungsträgern (Ionen und Elektronen) sowie Neutralteilchen. Neben festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen wird das Plasma häufig als der vierte stoffliche Aggregatzustand bezeichnet, in dem sich ca. 99% der Materie des Weltalls befindet. So ist z.B. die Sonne ein ca. 15 Millionen Grad heißer Hochdruck-Plasmaball. Der weitgehend „plasmalose" Aufbau der Erde muß aus kosmischer Sicht als eine absolute Ausnahme angesehen werden.

Analog zu der Vielfalt bei den festen Körpern und den Flüssigkeiten gibt es auch sehr unterschiedliche Plasmakonfigurationen. So wird ein Plasma sowohl durch die Art der Atome und Ionen als auch durch Temperatur, Druck und Ausdehnung charakterisiert. Für alle Parameter gibt es große Bandbreiten, die sich über viele Größenordnungen erstrecken.

Die weltweite Plasmaforschung wird seit vielen Jahren durch die enormen Anstrengungen dominiert, einen Kernfusionsreaktor zur Energiegewinnung herzustellen. Die in Betracht kommenden Kernreaktionen erfordern bei den auf der Erde realisierbaren Druckbedingungen Temperaturen von ca. 100 Millionen Grad, bei denen sich alle beteiligten Stoffe vollständig im Plasmazustand befinden. Derzeit ist nicht absehbar, ob die kontrollierte Beherrschung eines solchen Plasmas jemals erreicht werden kann.

Die im täglichen Leben erfahrbaren Anwendungen der Plasmatechnik beschränken sich bis heute weitgehend auf einzelne Produkte wie Leuchtstoffröhren oder Plasmadisplays. Dagegen tritt in letzter Zeit das enorme industrielle Potential dieser Technologie als leistungsstarkes und flexibles Werkzeug immer mehr in den Vordergrund. Man nutzt hier gezielt die ungewöhnlichen Eigenschaften, die diese leitenden Gemische aufgrund der Überlagerung zahlreicher unterschiedlicher physikalischer und chemischer Effekte aufweisen. Insbesondere lassen sie sich durch äußere elektrische und magnetische Felder leicht beeinflussen und sind dadurch hervorragend steuerbar. Darüber hinaus ermöglichen Plasmen wegen ihres hohen Energieinhaltes Prozesse, die in anderen Materialzuständen nicht ablaufen können. Da sie chemisch aktiv sind, eignen sie sich auch für die Bearbeitung und Reinigung von Oberflächen.

Entscheidend für das Verhalten eines Plasmas ist seine Wechselwirkung mit der Umgebung. Während solche Randeffekte für die Hochtemperaturplasmen der Kernfusion das Hauptproblem darstellen, sind sie für technische Anwendungen häufig besonders interessant. Hier ist neben der Materialbearbeitung (wie Lichtbogenschweißen, -schneiden) insbesondere der gesamte Bereich der Oberflächentechnik (Beschichtung, Härtung, Korrosionsschutz) zu nennen, der zunehmend durch Plasmaverfahren dominiert wird.

Eine wichtige Beschichtungstechnologie ist z.B. das sog. Plasma-Pulver-Auftragschweißen, bei dem man einen pulverförmigen Schichtwerkstoff mit Hilfe des Plasmastrahls praktisch auf die Bauteiloberfläche aufschweißt. Beim sog. Plasmaspritzen wird das Plasma durch eine Düse gepreßt, mit Metall-, Kunststoff- oder Keramikpulver gemischt und gegen das Werkstück geblasen. So werden Überzüge als Korrosionsschutz, gegen Verschleiß und zum Erhöhen der Temperaturbeständigkeit hergestellt. Führt man dieses

Verfahren im Vakuum durch, lassen sich sehr dichte, nahezu porenfreie Schichten erzeugen. Es wird sogar möglich, Metalle wie Zirkonium, Titan und Niob aufzuspritzen, die bei Erhitzen in Luft sofort oxidieren würden.

Besonders anwendungsfreundlich ist das sog. Niederdruckplasma. Im Gegensatz zu den o.g. thermischen Plasmen, für deren Erzeugung hohe Temperaturen benötigt werden, wird hier das Gas durch elektrische Felder angeregt. Durch den geringen Druck kommt es nicht sofort zum thermischen Gleichgewicht zwischen den energiereichen freien Elektronen und den schweren Teilchen (Ionen und Neutralteilchen). Daher kann man für ein solches Gasgemisch, das auch „kaltes Plasma" genannt wird, typische mittlere Temperaturen zwischen Raumtemperatur und 250°C einstellen. Durch die niedrigen Prozeßtemperaturen ist es besonders gut für die Behandlung thermisch sensibler Substrate wie Kunststoffe und organische Materialien geeignet.

Ein vielversprechendes Niederdruckverfahren ist die sog. Plasmapolymerisation. Hierbei mischt man einem Plasma Kohlenstoffverbindungen bei, die zunächst zerrissen werden. Diese molekularen Bruchstücke reagieren mit der Oberfläche eines eingebrachten Objektes und bilden schließlich einen sehr dünnen polymeren Überzug. Auch für die Mikroelektronik hat die „kalte" Plasmatechnologie inzwischen große Bedeutung erlangt. Hier wird sie zunehmend zum Strukturieren von Chipoberflächen eingesetzt und ersetzt die bisherigen Naßätzverfahren.

Von übergeordneter Bedeutung ist der Trend, daß in letzter Zeit plasmatechnische Verfahren zunehmend umweltbelastende Prozesse ersetzen. Hierzu zählt z.B. die Reinigung von mit Öl, Fett oder Wachs verunreinigten Bauteilen vor der Weiterbearbeitung. Ein weiteres umweltschonendes Verfahren ist das sog. Plasmaschmelzen von schadstoffbelastetem Schrott. Durch die hohen Prozeßtemperaturen lassen sich die unerwünschten Stoffe kontrolliert vom Metall abtrennen und zersetzen.

Februar 1999 Thomas Kretschmer

Membrantechnologien

Als Membranen bezeichnet man sehr dünne Strukturen, typischerweise im Submillimeterbereich. Ihre große Bedeutung in Natur und Technik beruht neben der Nutzung der elastischen Eigenschaften (z.B. in Lautsprechern) vor allem auf ihrer Fähigkeit zum selektiven Stofftransport unter dem Einfluß verschiedener Kräfte. Je nach Beschaffenheit können sie bestimmte Stoffe passieren lassen oder sogar aktiv transportieren, andere wiederum nicht. So können z.B. Organismen über Membranen gezielt Stoffe aus der Umgebung aufnehmen oder an sie abgeben, eine Grundvoraussetzung für viele biologische Prozesse.

Die ersten für einfache technische Trennprozesse genutzten Membranen waren aus natürlichen Materialien wie Häuten, Blasen, Tuch oder Filz hergestellt. Synthetische Membranen werden seit etwa 40 Jahren aus organischen Polymeren und anorganischen Materialien (Glas, Keramik, Zeolithe, Kohlenstoff, Metalle) mit spezifischer Porenstruktur und Oberfläche hauptsächlich zur Trennung von Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen entwickelt. Die für den Stofftransport benötigte Antriebskraft kann eine Druck-, Konzentrations-, Partialdruck- oder elektrische Potentialdifferenz zwischen beiden Seiten der Membran sein. Um eine Membran effizient einsetzen zu können, müssen ihre Bauform und die Verfahrenstechnik auf den jeweiligen Anwendungsfall hin abgestimmt werden. Fortschritte im Design besonders spezifischer und effizienter Membranen führen nicht nur zu Verfahren, die verglichen mit herkömmlicher chemischer Trenntechnik oft wesentlich energiegünstiger sind, sondern erschließen auch ganz neue Einsatzbereiche.

Die klassischen Membranverfahren für die Stofftrennung sind Mikrofiltration, Ultrafiltration und Umkehrosmose. Bei der Mikrofiltration werden Mikroorganismen und -teilchen (Größe 0,1-10 μm) mit Hilfe eines Membranfilters unter Anwendung von Druck aus Flüssigkeiten abgetrennt. Nach diesem Prinzip kann mit Bakterien und Schadstoffen verunreinigtes Wasser auf einfachste Weise trinkbar gemacht werden. Unter Ultrafiltration versteht man die Abtrennung von Makromolekülen (2 nm-0,1 μm). Sie dient der Abtrennung von Blutplasma, der Prozeßabwasseraufbereitung, der Reinstwasserherstellung für die Pharmazeutik und der Rückführung teurer Katalysatoren bei chemischen Prozessen. Auch für die Abwasserreinigung auf Schiffen kommt sie in Betracht. Die Umkehrosmose wird zur Meerwasserentsalzung benutzt. Dabei läßt man das Wasser unter hohem Druck durch eine Polymermembran diffundieren, die für das gelöste Salz undurchlässig ist.

Ein modernes Verfahren ist die Dialyse, bei der kleinere Moleküle aufgrund von Konzentrationsunterschieden durch eine Membran diffundieren, während Makromoleküle und vergleichbar große Teilchen zurückgehalten werden. Wichtigste Anwendung ist die künstliche Niere, in der das Blut von Stoffwechselschlacken und anderen überflüssigen Bestandteilen gereinigt wird und die mit neuen maßgeschneiderten Polymermembranen hinsichtlich Behandlungsdauer und Verträglichkeit optimiert werden konnte.

Die Trennung von Gasen mittels Membranen beruht auf dem Siebeffekt der Porengröße oder auf Diffusionsvorgängen an der Porenoberfläche. Eine neue Anwendung dieser Technologie ist die Rückgewinnung von Benzin aus der Abluft beim Betanken von Autos.

Membranen in Regenbekleidung, die nur für Wasserdampf, nicht aber für Regenwasser durchlässig sind, funktionieren nach einem ähnlichen Prinzip.

Zunehmend Eingang in die chemische und biochemische Industrie findet heute die Kopplung von chemischer Reaktion und nachfolgender Stofftrennung durch Membranen in sog. Membranreaktoren. Vorteil ist, daß bei Gleichgewichtsreaktionen durch kontinuierliche Abtrennung des Produktes größere Ausbeuten erreicht werden. Die Membranoberfläche kann dabei als Träger biochemischer Katalysatoren oder ganzer Zellen dienen. Membranreaktoren werden auch als Biosensoren und als künstliche Organe in der Medizintechnik eingesetzt.

Der Aspekt des selektiven Stofftransports durch Membranen steht bei Systemen zur Energiespeicherung und Energieumwandlung wie Batterien und Brennstoffzellen im Vordergrund. Die Brennstoffzellentechnologie ist wegen der hohen erreichbaren Wirkungsgrade und Leistungsdichten eines der vielversprechendsten Verfahren zur Energiewandlung. Schlüsselelement der Brennstoffzelle ist der Elektrolyt, durch den selektiv nur bestimmte Ionen transportiert werden dürfen. In den Niedertemperatur-Trennstoffzellen, wie sie z.B. im neuen U-Boot U 212 und in Prototypen von Brennstoffzellen-Autos verwendet werden, besteht dieser Elektrolyt aus einer platinbeschichteten Fluor-Kunststoff-Protonenaustauschmembran. Zur Senkung der Kosten und des Gewichts werden derzeit dünnere, fluorfreie Membranmaterialien mit höherer Leistungsdichte entwickelt sowie Katalysatorbelegungen, die mit weniger Platin auskommen.

Generelle Ziele der Membranentwicklung sind die Verbesserung der Trennleistung, hoher Transmembranfluß und eine höhere thermische und chemische Stabilität. Oberflächenmodifikationen, die bestimmte Stoffe besonders ansprechen, oder Strukturen mit Trägersubstanzen, die bestimmte Komponenten aktiv durch die Membran transportieren, ermöglichen neue Anwendungen. Denkbar sind auch Membranen, deren Transporteigenschaften von außen gesteuert werden, z.B. durch ein elektrisches Feld. Auch versucht man, neue Membranbildungsmechanismen wie die Selbstorganisation von Schichten mit möglichst gleichmäßiger Porengröße von der Natur abzuschauen. Auf Basis theoretischer Funktionsmodelle wird an Simulationstechniken zur rechnergestützten Entwicklung maßgeschneiderter Hochleistungsmembranen gearbeitet. Die wirtschaftliche und technische Bedeutung der Membrantechnik wird sich bei der Fülle bereits realisierter und potentieller zukünftiger Anwendungen stetig weiter erhöhen.

Dezember 1998 Ulrik Neupert

Lasergestützte Materialbearbeitung

Laser sind künstliche Lichtquellen, die mit hoher Leistung kohärente Strahlung, d.h. elektromagnetische Wellen mit fester Phasendifferenz, emittieren. In der Materialbearbeitung ist ihr Einsatz inzwischen weit verbreitet und fest etabliert. Das gilt vor allem für eine Vielzahl von Schneid- und Bohranwendungen, aber auch zum Schweißen, Löten, Strukturieren und Beschriften sowie zur Oberflächenbehandlung werden sie zunehmend genutzt. Hauptanteil an den weiterhin hohen Zuwachsraten haben Metallverarbeitungssysteme, aber auch die lasergestützte Bearbeitung von anderen Werkstoffen findet wachsende Aufmerksamkeit.

Die Einsetzbarkeit von Lasern in der Materialbearbeitung beruht auf der durch die Absorption der Strahlung entstehenden thermischen Wirkung im Werkstück. Sie ist im Prinzip unabhängig von dessen Härte. Die Punktgenauigkeit des Strahls auf Brennfleck-Durchmesser, die theoretisch bis hinab in den Bereich der Wellenlänge des Laserlichtes reichen können, ermöglicht eine präzise lokalisierbare Energieeinwirkung. So läßt sich die Wärmebelastung in der Umgebung der Bearbeitungsstelle und damit ein Verziehen des Werkstückes erheblich reduzieren. Weitere Vorteile von Laserwerkzeugen sind die berührungslose und damit abnutzungsfreie Bearbeitung sowie das Fehlen von Schneid- oder Rückwirkungskräften, wie sie bei der mechanischen Bearbeitung auftreten. Dazu kommt eine ganze Reihe produktionstechnischer Vorzüge wie die besonders gute Eignung für die Automatisierung und für hohe Prozeßgeschwindigkeiten sowie die Fähigkeit zur Makro- und Mikrobearbeitung in einem Arbeitsgang.

Ein wesentlicher Nachteil des Einsatzes von Laserwerkzeugen ist der damit verbundene große Energieaufwand, der aus den relativ geringen Wirkungsgraden der Laser resultiert. Trendhemmend für ihre weitere Verbreitung ist auch die Konkurrenz durch andere innovative Verfahren (z.B. Wasserstrahlschneiden), die im Einzelfall technologische oder wirtschaftliche Vorteile haben. Zu einem Schlüsselproblem dürfte außerdem die Tatsache werden, daß beim Laserbearbeiten insbesondere von Polymeren gefährliche gas- oder partikelförmige Schadstoffe emittiert werden können. Gerade bei der Bearbeitung von Polymeren gibt es daneben Probleme mit der Verkohlung der Oberfläche am Ort des Einwirkungsvorganges. Trotzdem sollte die Bedeutung des Lasers auch in der Kunststoffverarbeitung steigen, z.B. als Werkzeug zur genau lokalisierbaren Erweichung von Thermoplasten.

Verschiedene Lasertypen unterscheiden sich im wesentlichen durch das optisch aktive Medium (z.B. Gas, Festkörper, Halbleiter), in dem die Strahlung entsteht. Die gebräuchlichsten Systeme für den Einsatz in der Materialbearbeitung sind CO_2-, Festkörper- und in zunehmendem Maße auch sog. Excimer-Laser, welche die spezifischen Eigenschaften bestimmter Edelgas-Verbindungen nutzen. Die beiden Merkmale Wellenlänge und damit Fokusradius sowie die mittlere Leistung bestimmen die Haupteinsatzbereiche dieser drei Lasertypen.

CO_2-Laser haben den größten Wirkungsgrad (ca. 20%) und die größte mittlere Ausgangsleistung von bis zu einigen 10 kW im kontinuierlichen Betrieb. Sie können heute

z.B. zum Schneiden von Baustählen mit einer Dicke von mehr als 25 mm praktisch eingesetzt werden. Der kommerziell am weitesten verbreitete Festkörper-Laser, der Nd:YAG-Laser (mit Neodym dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall), bringt es dagegen nur auf Wirkungsgrade von ca. 5% und mittlere Ausgangsleistungen von einigen kW. Die mittleren Lichtleistungen von Excimer-Lasern liegen noch einmal darunter. Während CO_2- und Festkörper-Laser im fernen bzw. im nahen infraroten Strahlungsbereich emittieren, arbeiten Excimer-Laser im ultravioletten Bereich bei einer relativ geringen Wellenlänge. Sie sind daher besonders zum Einsatz in der Mikrobearbeitung geeignet und werden z.B. für die Herstellung integrierter Schaltkreise eingesetzt.

Besondere Entwicklungsbemühungen gibt es um das dreidimensionale Bearbeiten von Bauteilen und hier z.B. um das kontinuierliche Schweißen von Automobil-Karosserien. In diesem Zusammenhang sind vor allem Festkörper-Laser interessant, da die von ihnen emittierte Wellenlänge relativ verlustfrei durch Glasfasern übertragbar ist, beispielsweise an die Spitze eines beweglichen Roboterarmes. Für viele derartige Einsätze muß allerdings ihre mittlere Leistung noch weiter erhöht werden. Eine ähnlich flexible Übertragung der Strahlung von CO_2-Lasern ist auch mit aufwendigen Spiegelsystemen nur schwierig zu verwirklichen. Dazu bedarf es alternativer Fasermaterialien, deren Entwicklung ebenfalls betrieben wird. Im Bereich relativ geringer Leistungen könnte langfristig die Einsetzbarkeit sog. Faser-Laser (Glasfasern mit integriertem optisch aktivem Medium) zu deutlichen Fortschritten beim räumlich flexiblen Einsatz von Laserwerkzeugen führen.

Neben der allgemeinen Erhöhung der Ausgangsleistungen bzw. Wirkungsgrade ist die Einführung von Halbleiter-Lasern die wichtigste technologische Weiterentwicklung im Bereich der lasergestützten Materialbearbeitung. Halbleiter-Laser geringer Leistung sind in der Kommunikationstechnik (z.B. CD-Spieler) schon weit verbreitet. Durch das Aneinanderfügen vieler solcher Einzellaser können die Ausgangsleistungen heute bereits bis in den kW-Bereich gesteigert werden. Ihre technologischen Vorteile sind ein relativ hoher Wirkungsgrad und vor allem die miniaturisierte Bauform, die in Verbindung mit neuen Maschinenkonzepten zu innovativen Lösungen führen wird. Aufgrund ihrer für viele Anwendungen noch nicht ausreichenden Strahlqualität werden Halbleiter-Laser jedoch zunächst hauptsächlich als sog. „Pumplichtquellen“ zur Leistungssteigerung von Festkörper-Lasern eingesetzt.

September 1998 Jürgen Kohlhoff

Katalysatoren

Als Katalysatoren bezeichnet man Stoffe, die durch ihre Gegenwart eine chemische Reaktion beschleunigen. In letzter Zeit entwickelt sich ihr Design immer mehr zu einer Schlüsseltechnologie, die zu innovativen Produkten und umweltfreundlicheren Produktionsmethoden führt.

Katalysatoren wirken dadurch, daß sie die zum Reaktionsverlauf benötigte Energie herabsetzen. So schwächen sie z.B. die chemische Bindung der Ausgangsmoleküle oder zwingen diese in eine für die Reaktion besonders günstige räumliche Anordnung. Der katalysierte Prozeß läuft schneller, spezifischer und damit wirtschaftlicher ab, bzw. wird überhaupt erst ermöglicht. Dabei ist die für die Beschleunigung einer Reaktion gebrauchte Katalysatormenge winzig im Vergleich zur umgesetzten Stoffmenge. Der Katalysator liegt nach Ablauf der Reaktion wieder unverändert vor und wird im Prinzip nicht verbraucht. Generell unterscheidet man zwischen den chemisch-technischen Katalysatoren und den Enzymen (Biokatalysatoren).

In der chemischen Industrie werden heute ca. 90% aller großtechnischen Prozesse von Katalysatoren unterstützt. Hierzu zählen insbesondere die Produktion von Schwefelsäure, für deren Herstellung ein Vanadiumkatalysator erforderlich ist, und Ammoniak, das durch Reaktion von Wasserstoff und Luftstickstoff auf einem Eisenkatalysator erzeugt wird. In Erdölraffinerien werden Crack-Katalysatoren zur Spaltung von schwerem Rohöl in leichtere Komponenten, zur Erhöhung der Oktanzahl und zur Entschwefelung von Kraftstoff benutzt. Katalysatoren beschleunigen nicht nur Reaktionen, sie können auch das Reaktionsprodukt bestimmen. So entsteht z.B. aus einem Gemisch von Kohlenmonoxid und Wasserstoff je nach Katalysatortyp Methangas, Methanol oder Benzin.

Katalytisch beschleunigte Reaktionen finden oft auf der Oberfläche der Katalysatoren statt. Daher wird bei der Herstellung von Katalysatoren eine Struktur mit möglichst großer Oberfläche angestrebt. Hier haben sich Zeolithe, kristalline Verbindungen aus Aluminium, Silizium und Sauerstoff, bewährt. Wegen ihrer besonderen Hohlraumstruktur haben sie nicht nur eine große Oberfläche, sie wirken auch als molekulare Siebe. Nur solche Stoffe, die in die winzigen Tunnel und Kanäle des Zeolith-Katalysators passen, können dort auch umgesetzt werden. Bei der Herstellung künstlicher Zeolithe können die Kanaldurchmesser und Oberflächeneigenschaften auf die Reaktionen und speziellen Anforderungen in der Petrochemie hin maßgeschneidert werden. Autoabgas-Katalysatoren bestehen aus einer mit Platinmetallen beschichteten porösen Keramik. Die Forschung zielt hier auf die Verbesserung des keramischen Trägers und den Ersatz der teuren Platinmetalle durch Seltenerdelemente.

Die Herstellung von Polymeren profitiert von einer neuen Klasse von Hochleistungskatalysatoren, den Metallocenen. Dies sind Verbindungen aus Metallen und organischen Molekülen in Sandwich-Anordnung. Sie vermitteln das Polymerisieren, die Bildung von Molekülketten aus einzelnen Bausteinen (Monomeren). Dabei sind Kettenlänge und räumliche Anordnung der einzelnen Bausteine durch geeignete Metallocene so steuerbar, daß gezielt physikalische Eigenschaften wie Temperaturbeständigkeit, Schmelz-

punkt, Härte, Schlagfestigkeit und Transparenz eingestellt werden können. Da sich aus nur wenigen verschiedenen Monomeren durch die Wahl des Katalysators Polymere mit unterschiedlichen Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten herstellen lassen, wird die Stoffvielfalt verringert und somit das stoffliche Recycling vereinfacht.

Enzyme sind komplex aufgebaute Proteine (Eiweiße), ohne deren katalytische Wirkung kein biologisches Leben möglich wäre, da sie für unzählige Stoffwechselvorgänge verantwortlich sind. Sie sind unter chemisch milden Bedingungen bei niedrigen Temperaturen aktiv, ihre Anwendung ist allerdings auf biologisch verträgliche Umgebungsbedingungen beschränkt. In vielen Prozessen können sie Chemikalien und Energie einsparen helfen. Sie reagieren sehr spezifisch nach dem Schlüssel-Schloß-Prinzip, d.h. die räumliche Molekülstruktur läßt nur die Umsetzung eines definierten Ausgangsstoffes in ein ganz bestimmtes Produkt zu. Die zukünftige Bedeutung der Enzymtechnologie liegt im Ersatz chemischer Methoden durch biologisch verträgliche, Rohstoffe und Energie sparende Verfahren und der Nutzung nachwachsender Rohstoffe.

Enzyme werden in Waschmitteln eingesetzt, wo sie eiweißhaltige Verschmutzungen (z.B. Gras, Blut, Schweiß) bei niedrigen Temperaturen zu besser wasserlöslichen Fragmenten abbauen. Ein weiteres Anwendungsfeld ist der Nahrungsmittelbereich. Altbekannte Beispiele sind die alkoholische Gärung und die Käseherstellung. Wie im lebenden Organismus kopiert man auch im Labor DNA-Fragmente mit Enzymen. So wird z.B. der genetische Fingerabdruck durch die Analyse des so vervielfältigten Erbgutes gewonnen. Als Bestandteil von Biosensoren dienen Enzyme in der Umweltanalytik und Prozeßtechnik zur Bestimmung von Stoffkonzentrationen. Auch im Pflanzenschutz könnten sie als Ersatz von Pestiziden in Zukunft eine Rolle spielen.

Gerade in Zeiten steigender Energie- und Rohstoffpreise und unter dem ökologischen Zwang zur umweltfreundlichen Produktion wird die Bedeutung von Katalysatoren weiter zunehmen. Mit großem Forschungsaufwand arbeitet man an der Optimierung der Parameter Aktivität, Selektivität, physikalische Stabilität und Toxizität, welche den Rohstoff- und Energieverbrauch, das Ausmaß unerwünschter Nebenprodukte, die Standdauer sowie die ökologischen und gesundheitlichen Gefahren bestimmen. Bei der Entwicklung von chemischen Katalysatoren ist man zur Zeit noch auf empirische Methoden und Erfahrung angewiesen, da die an der Katalysatoroberfläche ablaufenden Prozesse noch nicht ausreichend verstanden sind. Die Molekülstruktur von Enzymen ist dank der Fortschritte in der Informationstechnologie rechnerisch faßbar. Damit können Auswirkungen von molekularen Variationen auf die räumliche Struktur und die chemische Aktivität simuliert werden. Auch das komplette Neudesign von maßgeschneiderten Enzymen wird zunehmend möglich, was die Anwendungsmöglichkeiten stark erweitern dürfte.

Juli 1998 Ulrik Neupert

Klebetechnologien

Kleben gehört zu den ältesten und gleichzeitig zu den modernsten und innovativsten Fügeverfahren überhaupt. Ermöglicht wurde diese Entwicklung sowohl durch den in jüngerer Zeit erreichten Erkenntnisgewinn über die zugrundeliegenden chemischen und physikalischen Vorgänge als auch durch die inzwischen enorm gestiegenen Möglichkeiten zur Entwicklung und Herstellung neuer synthetischer Polymere als Grundlage für neue Klebstoffe.

Maßgeblich für Festigkeit und Langzeitbeständigkeit einer Klebung sind die Adhäsion, also die durch molekulare Kräfte verursachte Haftung zwischen Substratoberfläche und Kleber, und die Kohäsion, d.h. die innere Festigkeit des Klebstoffs. Generell unterscheidet man einerseits nach dem jeweiligen Verfestigungsprozeß in physikalisch abbindende oder chemisch härtende Klebstoffe und andererseits nach Anzahl der Komponenten in Ein- und Zweikomponentenklebstoffe. Letztere härten vom Prinzip her immer chemisch aus.

Bei physikalisch abbindenden Klebstoffen wird der für die Adhäsion notwendige flüssige Zustand durch physikalische Prozesse wie Schmelzen, Lösen oder Dispergieren erzeugt. Der Klebstoff bindet ab, indem die Schmelze erstarrt oder das Lösungs- bzw. Dispersionsmittel entweicht. Vor allem aus Gründen des Umweltschutzes nimmt hier die Bedeutung von Systemen, die organische Lösungsmittel enthalten, zugunsten der anderen Typen, insbesondere der Schmelzklebstoffe, stark ab.

Eine ganze Reihe besonders interessanter Neuentwicklungen gibt es auf dem Gebiet der mittels chemischer Reaktionen härtenden Kleber, die sich in besonderem Maße für die Herstellung fester und beständiger Konstruktionen eignen. Bei Zweikomponenten-Systemen findet die chemische Vernetzungsreaktion erst nach dem Zusammentreffen der entsprechenden Partner statt und kann so in ihrem zeitlichen Ablauf gesteuert werden. Bei Einkomponentenklebern wird die Reaktion durch Erhöhung der Temperatur, durch Bestrahlung z.B. mit UV-Licht, durch zugeführte bzw. in der Substratoberfläche vorhandene Feuchtigkeit oder durch Metallkontakt bei gleichzeitigem Sauerstoffausschluß (anaerob) ausgelöst.

Aufgrund ihrer Vielseitigkeit haben sich Klebeverfahren bereits ein ausgedehntes Anwendungsfeld in den unterschiedlichsten Bereichen der Industrie geschaffen. Das gilt vor allem für die Herstellung von Massengütern wie Haushaltswaren, Sportartikel oder Möbel. Vorreiter für ihren Einsatz in anspruchsvolleren Technologien ist der Flugzeugbau, wo die Forderung nach Gewichtseinsparung schon relativ früh zu neuen Bauweisen und Konstruktionswegen führte und Klebeverfahren heute ebenfalls zum Stand der Technik gehören. Bei einem modernen Flugzeug sind heute bereits etwa 70% aller Nähte geklebt.

Zunehmenden Einsatz finden innovative Klebetechnologien inzwischen auch in der Fertigung von Kraftfahrzeugen. Dort ermöglichen sie die Verringerung des Gewichtes und der Korrosionsanfälligkeit sowie ein verbessertes Crashverhalten. Gerade im möglichst weitgehenden Ersatz des Schweißens im Automobilbau liegt gleichzeitig eine der größ-

ten Herausforderungen und eine besondere Chance für die weitere Verbreitung der Klebetechnologie. Hier sind die Anforderungen besonders hoch, weil die übliche Vorbehandlung der Bleche bei der Montage von Großserien nicht praktikabel ist und die Teile während des Fertigungsprozesses zudem noch mit Korrosionsschutzölen überzogen sind. Weitere Anwendungen mit besonders hohen erwarteten Zuwachsraten kommen aus der Elektronik, wo z.B. eine moderne Leiterplattenherstellung mit automatischer Bestückung ohne die Klebetechnik gar nicht möglich wäre.

Der wesentliche Vorteil der Klebetechnik gegenüber Alternativen wie Nieten, Schrauben, Löten oder Schweißen liegt in ihrer Fähigkeit, neben der eigentlichen Verbindung gleichzeitig weitere Aufgaben zu übernehmen. Dazu gehören dichtende, dämpfende, elektrisch isolierende oder leitende, imprägnierende und vor Korrosion schützende Funktionen. Außerdem vermeiden Klebeverfahren bestimmte Nachteile anderer Verbindungstechniken, die z.B. als thermische Prozesse zu Veränderungen des Werkstoffs in der Wärmeeinflußzone führen oder auf Löcher und damit Verletzungen in der Werkstoffstruktur angewiesen sind.

Allerdings erfordert die Einführung moderner Konstruktionskleber oft eine aufwendige und teure Anpassung der Verarbeitungs- und Montageverfahren. Nachteile haben sie auch im Hinblick auf ihre Zugfestigkeit (Kohäsion) und ihre Empfindlichkeit gegen abschälende Kraftwirkungen. Diese müssen durch eine entsprechende konstruktive Gestaltung, also eine klebgerechte Konstruktion, so weit wie möglich vermieden werden. Außerdem wirken Klebungen meist nur in einem bestimmten, dabei relativ niedrigen Temperaturbereich optimal. Besonders nachteilig ist die Tatsache, daß gerade bei geklebten Verbindungen die Langzeitfestigkeit entscheidend von umgebungsbedingten Alterungserscheinungen beeinflußt wird, die z.B. durch das Eindringen von Wasser in die Klebeschicht verursacht werden.

Das weitere Vordringen der Klebetechnologie wird nicht zuletzt von der Verringerung dieser Nachteile abhängen. Dabei wird es vor allem darauf ankommen, das Verständnis für die theoretischen Grundlagen noch weiter zu vertiefen, gerade auch im Hinblick auf die im praktischen Einsatz tatsächlich auftretenden Effekte. Zusammen mit der Weiterentwicklung geeigneter empirischer Untersuchungsmethoden soll dadurch die zuverlässige Vorhersage des Gebrauchsverhaltens ermöglicht und die Sicherheit beim Einsatz von Klebstoffen weiter verbessert werden. Dabei wird sich der Trend zur Entwicklung von immer neuen Spezialklebstoffen für bestimmte Anwendungen auch in Zukunft fortsetzen.

Juni 1998 Jürgen Kohlhoff

Fertigungs- und Bearbeitungstechnologien

Unter diesem Begriff fasst man alle Technologien zusammen, welche im Rahmen der stofflichen Wertschöpfungskette Anwendung finden, die vom Rohstoff über Werkstoffkomponenten, Werkstoff, Halbzeug und Bauteil bis zum Produkt reicht. Übergeordnete Ziele Bereich sind die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und die vermehrte Berücksichtigung des sog. produktionsintegrierten Umweltschutzes. Beiden Zwecken dient eine zunehmende Automatisierung der Prozesse, die wiederum durch vielfältige Neuentwicklungen im Bereich der Sensorik sowie der Steuerungs- und Regelungssysteme ermöglicht wird. Viele chemische Abläufe werden zudem durch Einsatz immer ausgeklügelterer Katalysatoren beschleunigt bzw. gesteuert.

Von herausragender Bedeutung für die Fähigkeit, neue Werkstoffe und Produkte mit maßgeschneiderten Eigenschaften zu erzeugen, ist die verstärkte Spezialisierung der Fertigungsverfahren. Mit der Zahl der spezifischen Anforderungsprofile steigt so auch die Menge der zur Verfügung stehenden Verfahrensvarianten weiter stark an.

Eine wichtige Rolle spielen die originären Fertigungs- und Bearbeitungsverfahren, die im wesentlichen charakteristisch für spezielle Werkstoffklassen sind. Bei den Metallen sind hier in erster Linie neuartige pulvermetallurgische Varianten zu nennen. Polymere werden zunehmend in direkten Verfahren hergestellt, welche Synthese, Aufbereitung und Formgebung möglichst in einen Schritt integrieren sollen. Die wichtigsten Entwicklungsbemühungen im Bereich der Keramikfertigung zielen auf die Verringerung der inhärenten Sprödigkeit und auf die Erhöhung der Reproduzierbarkeit der Eigenschaften. Von besonderer Bedeutung für die weitere Verbreitung faserverstärkter Verbundwerkstoffe ist die Senkung der Herstellungskosten durch Automatisierung der bisher immer noch weitgehend manuellen Abläufe.

Den ständig wachsenden Anforderungen an die Materialeigenschaften kann jedoch nicht allein durch Weiterentwicklung der Grundwerkstoffe begegnet werden. Außerdem gelingt nur in den wenigsten Fällen eine endkonturnahe Fertigung mit bauteilnahen Abmessungen. Entsprechend steigt die Bedeutung geeigneter Verfahren zur Be- und Verarbeitung, die immer gezielter auch zur Einstellung spezifischer Werkstoffeigenschaften eingesetzt werden. Dazu gehören Oberflächentechnologien, Technologien der lasergestützten Materialbearbeitung, Füge- sowie Trenn- und Zerspanungsverfahren.

Die Oberflächentechnik bietet die Möglichkeit der Aufgabentrennung zwischen einem gegebenenfalls preiswert herstellbaren konventionellen Kernwerkstoff, der Festigkeits- und Steifigkeitsaufgaben übernimmt, und der Beschichtung bzw. der entsprechend modifizierten Oberfläche, die über zusätzliche Funktionseigenschaften verfügt. Nutzte man bislang vorwiegend chemische und elektrochemische, mechanische und thermische Verfahren, so verlangen heute gesteigerte oder auch ganz neue Anforderungen vielfach den Übergang zu vakuum-, plasma- und ionentechnischen Prinzipien. Diese sind darüber hinaus vielfach umweltfreundlicher als die konventionellen Methoden. Eine praktisch uneingeschränkte Kombinationsfreiheit zwischen Kern- und Beschichtungswerkstoff hat man bei den Verfahren zur Abscheidung aus der Gas- oder Dampfphase, also insbeson-

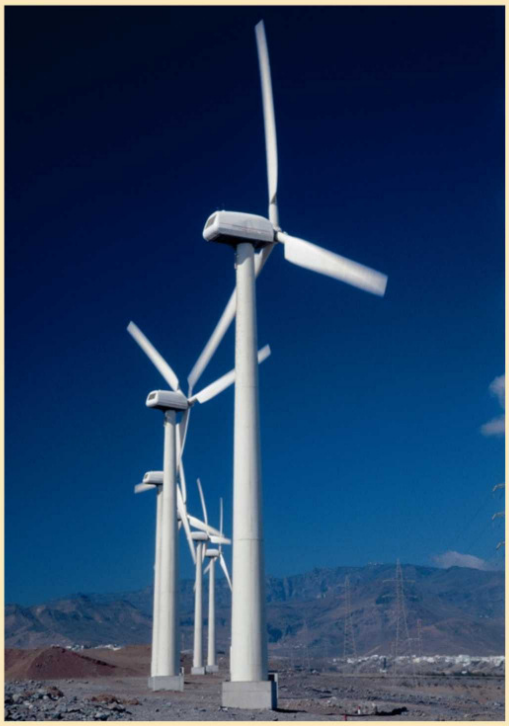
dere den CVD (Chemical Vapour Deposition)- und den PVD (Physical Vapour Deposition)-Prozessen.

Die Materialbearbeitung mit Laserstrahlen ist inzwischen weit verbreitet und fest etabliert. Das gilt vor allem für eine Vielzahl von Schneid- und Bohranwendungen, aber auch zum Schweißen, Löten und zur Oberflächenbehandlung werden zunehmend Laser eingesetzt. Die Regelbarkeit der Laserleistung und die Möglichkeit zur kontinuierlichen oder gepulsten Betriebsform erlauben eine kontrollierte und reproduzierbare Energieeinwirkung auf ein Werkstück. Die gebräuchlichsten Lasersysteme für den industriellen Einsatz sind CO_2- und Festkörperlaser. Zahlreiche Anwendungen von Excimerlasern werden derzeit im Labor- bzw. Vorserienstadium getestet.

Technologien zum Zusammenfügen und Verbinden sind für die Fertigungsindustrie von grundlegender Bedeutung. Sie haben nach Zahl, Wert und in ihren Auswirkungen auf Leistung, Zuverlässigkeit und Sicherheit industrieller Erzeugnisse den höchsten Stellenwert vor allen anderen Fertigungsverfahren. Aufgrund ihrer Vielseitigkeit wird insbesondere die Bedeutung von Klebeverfahren in Zukunft noch weiter steigen. Bereits heute gehören sie zum Stand der Technik bei der Herstellung von Massengütern, aber auch im Flugzeugbau. Auch in der Fertigung von Kraftfahrzeugen nimmt ihr Einsatz zu. Inzwischen gibt es bereits tausende von Spezifikationen moderner Klebstoffe, wobei es sich ausnahmslos um vollsynthetische Produkte handelt. Der hier erkennbare Trend zur Entwicklung von Spezialklebstoffen für bestimmte Anwendungen wird sich auch in Zukunft fortsetzen.

Auch die Ansprüche an die industriellen Schneidprozesse sind in den letzten Jahren enorm gestiegen. Überall dort, wo thermisches oder mechanisches Schneiden nicht praktikabel sind bzw. zu nicht akzeptablen Veränderungen der Eigenschaften an der Schnittfläche führen, ist heute das Wasserstrahlschneiden eine technische und wirtschaftliche Alternative. Je nach Anwendung ergänzt es die lasergestützten Prozesse in sinnvoller Weise. Dieses Verfahren arbeitet mit Wasserdrücken von bis zu 4000 bar und kann bei Zusatz geeigneter Abrasivstoffe im Prinzip zum Schneiden jedes beliebigen Werkstoffes eingesetzt werden. Als besonderer Vorteil erweist sich seine vergleichsweise hohe Umweltfreundlichkeit. Wasserstrahlschneiden erzeugt weder Späne noch giftige Gase oder Dämpfe.

August 1996 Jürgen Kohlhoff



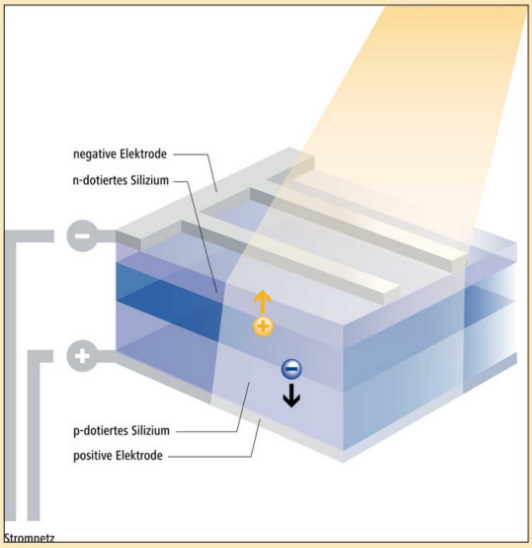
Materie & Energie

Materie & Energie

Materie & Energie

Materie & Energie

Materie & Energie



Materie & Energie

Materie & Energie

Energietechnik

Energy Harvesting	2009	
	2008	
	2007	Superkondensatoren
Geothermische Energie	2006	
	2005	
Mikro-Brennstoffzellen		
Hochleistungs-Mikrowellenquellen	2004	
Thermoelektrische Generatoren	2003	
	2002	
	2001	
Batterien	2000	
Photovoltaik		Wasserstofftechnologie
	1999	Mittel- und Hochenergielaser
	1998	
Brennstoffzellen		
	1997	
		Werkstoffe der Energietechnik
	1996	



Energy Harvesting

Unter dem Begriff „Energy Harvesting (Ernten von Energie)“ fasst man das technologische Prinzip zusammen, bei dem die von einem Verbraucher benötigte (i.d.R. elektrische) Energie aus seiner unmittelbaren Umgebung gewonnen wird. Als Quellen kommen z.B. Licht-, Wärme- oder Bewegungsenergie in Betracht. Insbesondere durch die zunehmende Miniaturisierung der hierfür eingesetzten Technologien haben sich für das Energy Harvesting in letzter Zeit vielfältige neue Anwendungsoptionen ergeben. Eine wesentliche Motivation liegt z.B. in der autonomen Energieversorgung von drahtlosen Sensornetzwerken für die Überwachung von Motoren, Turbinen und Getrieben oder in der Gebäudetechnik zur Regelung der Klimatisierung. Weitere Anwendungsbereiche sind die Umweltüberwachung, das Zustandsmonitoring von Bauwerken und medizinische Anwendungen. Bei elektronischen Geräten mit geringem Energiebedarf könnten Energy-Harvesting-Technologien zunehmend die Batterien zur Stromversorgung ablösen, insbesondere wenn ein Batteriewechsel unwirtschaftlich oder unmöglich ist.

Eine für das Energy Harvesting geeignete Gruppe von Energiewandlern sind Thermoelektrische Generatoren. Diese Halbleiterelemente wandeln Temperaturunterschiede, z.B. zwischen Boden und Luft oder zwischen Körperoberfläche und Umgebung, in eine elektrische Spannung um, wobei die Energieausbeute mit der Temperaturdifferenz steigt. Sie zeichnen sich durch lange Lebensdauer und Zuverlässigkeit aus. Allerdings sind sie bislang vergleichsweise teuer und trotz sich abzeichnender Verbesserungen durch spezielle nanoskalige Halbleiterschichten ist ihr Wirkungsgrad noch sehr gering. Daher werden sie vor allem für Anwendungen mit sehr kleinen Leistungsanforderungen wie bei Uhren oder Sensoren eingesetzt. Auch progammierbare Heizungsventile, die ihre Energie aus der Heizkörperwärme beziehen, wurden schon realisiert und können den jährlich anfallenden Batteriewechsel ersparen. Darüber hinaus wird die Anwendung winziger thermoelektrischer Generatoren im Bereich der Stromversorgung von implantierbaren medizinischen Sensoren oder auch von Herzschrittmachern untersucht.

Kinetische Energie in Form fast überall vorhandener niederfrequenter Schwingungen oder ungeordneter Bewegungen lässt sich auf verschiedene Weise in elektrische Leistung überführen. So wurde auf der Basis piezoelektrischer Materialien, die in Schuhsohlen eingebracht wurden, ein Generator konstruiert, der den variierenden Druck beim Abrollen der Füße in elektrische Energie umsetzt. Selbst aus dem pulsierenden Blutdruck des Menschen könnte piezoelektrisch Energie gewonnen werden. Elektrostatische Wandler gewinnen elektrische Energie aus der sich bei Vibration ändernden Kapazität variabler Kondensatoren und sind gut in elektrische Schaltkreise integrierbar. Bei elektromagnetischen Vibrationsgeneratoren sorgt die Relativbewegung einer Spule gegenüber einem Magneten für die Stromerzeugung.

Auch Windenergie kann für die Stromversorgung von Sensoren genutzt werden. So wurde bereits ein autonomes Windmessgerät konstruiert, bei dem der Wind über eine miniaturisierte Windturbine nicht nur das Messsignal erzeugt, sondern auch die für die Messung und drahtlose Kommunikation benötigte Energie. In Gebäuden könnten ähnliche in Luftkanälen untergebrachte Sensoren zur Ventilationssteuerung genutzt werden.

Solarzellen werden schon seit vielen Jahren zur Stromversorgung von z.B. Uhren oder Taschenrechnern eingesetzt. Allerdings sind die bisher verwendeten Zellen aus Silizium-Wafern nicht flexibel und können daher nur in starre Flächen integriert werden. Neue flexible Dünnschichtzellen aus amorphem Silizium auf leitfähiger Polymerunterlage oder komplett auf Basis von Polymeren und organischen Farbstoffen aufgebaute Solarzellen können dagegen auch in Ausrüstung oder Kleidung integriert werden. Damit wird die Bedeckung größerer Flächen ermöglicht. Besonders interessant dürfte die geplante Weiterentwicklung dieser flächigen Solarzellen zu Fasern sein, aus denen sich z.B. Kleidung, Taschen oder Zelte herstellen ließen.

Prinzipiell ist auch die Energie vorhandener Strahlungsquellen (Radio, Fernsehen, Mobilfunk, niedrigfrequente Wechselfelder der Elektroinstallation) zur Versorgung eines Mikrosystems geeignet. An derartigen Systemen, die effizient eine große Bandbreite von Frequenzen nutzen können, wird gearbeitet.

In den meisten Fällen wird ein System, das seine Energie aus der Umgebung bezieht, nicht ohne einen Energiespeicher auskommen, um die gewonnene Energie an den Bedarf anzupassen. So treten bei Sensoren während der drahtlosen Datenübermittlung typischerweise Spitzen im Leistungsbedarf auf. Als Speicher eignen sich vor allem Lithium-Ionen-Akkus mit ihrer hohen Speicherdichte, aber auch Elektrochemische Kondensatoren. Letztere weisen mit ihrer extrem hohen Zyklenzahl einen wichtigen Vorteil auf, haben aber gegenüber Akkus eine deutlich geringere Speicherdichte. Auch die Zusammenführung von Energiewandler und -speicher wurde bereits erprobt. So lassen sich flexible Lithium-Polymerbatterien mit organischen Solarzellen zu kompakten polymeren Solarbatterien integrieren, deren erste Prototypen bereits weniger als einen Millimeter dick sind.

Zusätzlich zu den Energiewandlern und -speichern ist auch das Strommanagement von entscheidender Bedeutung für das Energy Harvesting. Die vom Wandler generierte Spannung muss an den Verbraucher angepasst werden, wobei die für den Regelungsprozess benötigte Energie möglichst gering sein sollte. Sonst würde die geerntete Leistung, die typischerweise im Mikrowatt- bis Milliwattbereich liegt, bereits hierfür verbraucht.

Generell gilt, dass Energy-Harvesting-Technologien derzeit noch in relativ wenig konkreten Fällen zur Energieversorgung eingesetzt werden. Dank der kontinuierlichen Fortschritte bei Wandlern und sparsamer Elektronik dürften sie sich jedoch zunehmend für viele Anwendungen mit geringem Strombedarf zu einer echten Alternative zu Batterien entwickeln.

Oktober 2008 Ulrik Neupert

Superkondensatoren

Als Kondensatoren werden in der Elektrotechnik bestimmte Bauelemente bezeichnet, die elektrische Ladungen bzw. Energie speichern. Sie bestehen im Prinzip aus zwei leitenden Elektroden, die durch einen Isolator (Dielektrikum) von einander getrennt sind. Beim Anlegen einer Gleichspannung an die Elektroden laden sich diese auf, und zwischen ihnen baut sich ein elektrostatisches Feld auf, das auch beim Abtrennen der Spannungsquelle erhalten bleibt. Eine wesentliche Kenngröße eines Kondensators ist seine Kapazität, die ein Maß für die in diesem Feld gespeicherte Energie ist. Je nach Konfiguration und verwendeten Materialien der Elektroden und Dielektrika gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Kondensatortypen. Die Bandbreite reicht von einfachen Platten- bis zu komplexen Wickel- und Schichtanordnungen aus Metall, Papier, Kunststoff oder Keramik.

Wichtige Eigenschaften der herkömmlichen Kondensatoren sind die Schnelligkeit, mit der die gespeicherte Energie zur Verfügung gestellt werden kann, sowie die große Anzahl von möglichen Lade- und Entladezyklen. Ihre Energiedichten sind allerdings relativ niedrig. Zwar ermöglichen einige Dielektrika, wie z.B. spezielle Keramiken, höhere Kapazitäten und Energiedichten. Diese sind jedoch aufgrund der begrenzten Lebensdauer und der hohen Selbstentladungsrate nur eingeschränkt einsetzbar.

Ein zum Kondensator konkurrierendes elektrisches Speicherelement ist die Batterie, bei der die Energiespeicherung nicht elektrostatisch, sondern durch langsamer ablaufende elektrochemische Reaktionen an den Elektroden erfolgt. Sie verfügen zwar über höhere Energiedichten, hinsichtlich Leistungsdichte und Zyklenfestigkeit liegen sie jedoch hinter den Kondensatoren.

Einen Weg, die Vorteile von Batterien und Kondensatoren zu vereinen, bieten die so genannten Superkondensatoren, die auch unter Markennamen wie Supercaps oder Ultracaps bekannt sind. Im Unterschied zu den herkömmlichen Kondensatortypen besteht hier die Schicht zwischen den Elektroden nicht aus einem Dielektrikum, sondern aus einem flüssigen Elektrolyten. Beim Anlegen einer Spannung wandern die frei beweglichen Ionen des Elektrolyten zu den jeweils entgegengesetzt geladenen Elektroden, und es bilden sich dort nur wenige Nanometer dicke so genannte Doppelschichten aus. Dieser Kondensatortyp wird deshalb häufig auch als Doppelschichtkondensator bezeichnet. Ein weiterer Grund für seine hohe Kapazität ist die Verwendung von hochporösen Elektrodenmaterialien mit einer sehr großen effektiven Oberfläche. Zwar liegen die Energiedichten typischer Superkondensatoren immer noch rund eine Größenordnung unter denen von Lithium-Ionen-Batterien, allerdings sind ihre Leistungsdichten um ein bis zwei Zehnerpotenzen besser.

Generell zeichen sich Superkondensatoren im Vergleich zu Batterien durch ihre deutlich höhere Zyklenfestigkeit, hohe Betriebssicherheit, bessere Umweltfreundlichkeit und ihren geringeren Wartungsaufwand sowie durch einen Einsatzbereich von typischerweise von - 60°C bis + 80°C aus. Begrenzender Faktor ist die geringe Spannungsfestigkeit des Elektrolyten von nur einigen Volt, so dass sich die für typische Anwendungen notwendigen Spannungen nur durch aufwendige Anpassschaltungen erreichen lassen.

Noch höhere Kapazitäten versprechen die so genannten Pseudokondensatoren. Bei ihnen tragen Kapazitäten, die auf Reaktionen von elektrochemisch aktiven Verbindungen im Grenzbereich zwischen Elektrode und Elektrolyt zurückzuführen sind, zusätzlich zur Ladungs- bzw. Energiespeicherung bei. Sie besitzen jedoch im Gegensatz zu Doppelschichtkondensatoren wegen der elektrochemischen Reaktionen nur eine geringe Lebensdauer. Eine weitere Variante sind die so genannten Hybridkondensatoren, bei denen sich nur an einer Elektrode eine Doppelschicht ausbildet. An der zweiten Elektrode können z.B. elektrochemische Prozesse wie in einer Batterie stattfinden, so dass hier noch höhere Energiedichten erreicht werden können.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften der Superkondensatoren haben die Porengröße und -verteilung der Elektroden, deren Optimierung Gegenstand der aktuellen Forschung ist. Als Elektrodenmaterial finden neben Metalloxiden häufig speziell aufbereitete Kohlenstoffe als Pulver, Gewebe oder Aerogele, aber auch in Form von Nanoröhren oder Fullerenen Verwendung. Elektroden aus leitfähigen Polymeren befinden sich noch in der Grundlagenforschung. Als Elektrolyte werden gegenwärtig häufig bestimmte Salzlösungen eingesetzt. Forschungsaktivitäten gehen hier in Richtung preisgünstiger Substanzen mit hoher Leitfähigkeit und großer Spannungsfestigkeit sowie einer guten Umweltverträglichkeit.

Hybridkondensatoren sind aus Kostengründen zur Zeit hauptsächlich für die Raumfahrt sowie im militärischen Bereich interessant, z.B. für zukünftige elektrische Kanonen. Die größten Märkte für Superkondensatoren mit geringen Kapazitäten findet man in der Konsumelektronik, z.B. für Mobilfunkgeräte. Im Bereich von Fahrzeugantrieben und der kurzfristigen und lokalen Energiebereitstellung für Bord- und Betriebssysteme von Fahrzeugen werden Superkondensatoren meist in Kombination mit Brennstoffzellen, Batterien, dieselelektrischen Antrieben oder Verbrennungsmotoren eingesetzt. Dabei können sie Spitzenstrombedarf decken, z.B. bei Beschleunigung und Bergfahrten, und somit eine hohe Fahrdynamik ermöglichen. Darüber hinaus eignen sie sich nach der entsprechenden Umwandlung zur Speicherung von Bremsenergie, die so wieder für den Fahrbetrieb oder für ergänzende elektrische Systeme zur Verfügung steht. Im Bereich von elektrischen Stromnetzen finden Superkondensatoren zur Überbrückung kurzer Stromunterbrechungen und zum Ausgleich von Leistungsschwankungen Anwendung.

Generell gilt jedoch, dass für einen breiteren Einsatz Superkondensatoren derzeit noch zu teuer sind. Eine Möglichkeit zur Kostensenkung bietet z.B. der Einsatz von natürlichen Ausgangsstoffen als Elektrodenmaterial.

Februar 2007 Birgit Weimert

Geothermische Energie

Als Geothermie oder Erdwärme bezeichnet man die im Erdball gespeicherte Wärmeenergie. Diese stammt hauptsächlich vom schmelzflüssigen Kern im Erdinneren, von wo aus sie an die Erdoberfläche dringt. Durch den Wärmefluss werden Gesteins- und Erdschichten sowie auch unterirdische Wasserreservoirs erhitzt. Etwa 30% dieser Energie entstammen der Ursprungswärme aus der Zeit der Erdentstehung vor ca. 4,55 Milliarden Jahren und etwa 70% aus dem noch andauernden Zerfall natürlicher radioaktiver Isotope. Zusätzlich erwärmt sich die Erdoberfläche noch durch Sonneneinstrahlung und durch Wärmekontakt mit der Luft.

Da sie nach menschlichen Maßstäben unerschöpflich ist, wird die Geothermie zu den erneuerbaren Energiequellen gezählt. Allerdings ist der Wärmestrom aus dem Erdinneren normalerweise nur gering. Daher muss die Geothermienutzung in der Regel so ausgelegt sein, dass der Anlagenbetrieb nicht unwirtschaftlich wird, weil der betreffende Erdbereich zu stark auskühlt. Bei der direkten Nutzung verwendet man die geothermische Energie zum Kühlen oder zur Erzeugung von Wärme für Heizzwecke oder andere industrielle Wärmeverbraucher. Die indirekte Nutzung besteht in der Umwandlung zu Elektrizität. Hier sind zur Optimierung des Wirkungsgrades solche Kraftwerke besonders ökonomisch, die gleichzeitig Strom und Heizenergie liefern (Kraft-Wärme-Kopplung).

Je nach Entnahmebereich unterscheidet man zwischen der oberflächennahen und der tiefen Geothermie. Die oberflächennahe Erdwärme (bis 400 m) wird meist direkt zum Heizen oder Kühlen genutzt. Ihre wichtigste Anwendung ist die natürliche Kühlung, bei der das Wasser mit der Temperatur des flachen Untergrundes (in Deutschland im Jahresmittel ca. 8-10°C) direkt zur Gebäudekühlung verwendet wird. Die Erschließung dieses Wärmeniveaus erfolgt mit Erdwärmesonden. Dabei handelt es sich um Rohrbündel, in denen für den Wärmetransport eine Trägerflüssigkeit zirkuliert. Die Rohre werden mit vertikalen oder schrägen Bohrungen in das Erdreich eingebracht oder in Betonfundamente integriert.

Für Heizzwecke muss das Temperaturniveau erst mit einer Wärmepumpe angehoben werden. In dieser wird die Temperatur der durch die Erdwärmesonden zirkulierenden Flüssigkeit auf ein Kältemittel übertragen. Dieses verdampft und dehnt sich dabei stark aus. Im Verdichter wird das Kältemittel wieder komprimiert und verflüssigt, wobei seine Temperatur steigt. Diese Temperatur kann dann mit einem Wärmetauscher auf die Gebäudeheizung übertragen werden. Die bei diesem Prozess gewonnene Heizenergie stammt zu ca. 75% aus der Erdwärme, der Rest kommt aus der zum Betrieb der Anlage benötigten elektrischen Energie.

Dort, wo durch geothermische Anomalien bereits in geringer Tiefe mehrere hundert Grad heiße Wasservorkommen anzutreffen sind, sind die Bedingungen zur Stromerzeugung besonders günstig. So tragen z.B. im vulkanisch geprägten Island mehrere geothermische Kraftwerke in Ergänzung zur dort dominierenden Wasserkraft zur Stromversorgung bei. Außerdem wird das heiße Wasser über isolierte Rohrleitungen auch über größere Entfernungen zum Heizen von Gebäuden und Fußwegen genutzt.

In nichtvulkanischen Gebieten sind in der Regel tiefe Bohrungen nötig, um in Bereiche mit höheren Temperaturen vorzudringen. Aus tiefer Geothermie mit Bohrtiefen in der Größenordnung von 1000 - 3000 m können die zum Heizen benötigten Tiefengewässer mit Temperaturen von 40 - 100°C häufig direkt zur Verfügung gestellt werden. In solchen als hydrothermal bezeichneten Systemen wird das Wasser über eine Förderbohrung an die Oberfläche gebracht, gibt einen Teil seiner Wärmeenergie in Wärmetauschern ab und wird über eine zweite Bohrung wieder zurückverpresst.

Eine weitere Methode zur Wärmeentnahme aus dem Untergrund sind die so genannten Petrothermalen Systeme. Hier werden bei trockenem Untergrund mit hydraulischen Stimulationsmaßnahmen Risse und Klüfte erzeugt, in welchen Wasser zwischen mindestens zwei tiefen Brunnen zirkuliert, über die es eingebracht und wieder entnommen wird. Aber auch geschlossene Systeme sind bei der tiefen Geothermie möglich. Mit Erdwärmesonden können Tiefen im Bereich von 2000 - 3000 m erreicht werden. Dabei zirkuliert die Flüssigkeit in einem koaxialen Rohr, im dünneren Innenrohr fließt die kalte Flüssigkeit nach unten, im Außenrohr steigt die erwärmte Flüssigkeit nach oben. Auch die Bohrungen und Schächte von stillgelegten Bergwerken könnten für die tiefe Geothermie genutzt werden.

Die tiefe Geothermie dient neben der direkten Nutzung auch zur Stromerzeugung. Dampfvorkommen mit Temperaturen über 150°C können Turbinen direkt antreiben. Mit neuen Kraftwerkstechniken ist aber auch die Nutzung geringerer Temperaturen ab ca. 80°C zur Stromerzeugung technisch möglich. Dies geschieht in Anlagen, bei denen im Unterschied zum Dampfturbinenprozess statt Wasser ein Kohlenwasserstoff mit niedrigerem Siedepunkt als Arbeitsflüssigkeit eingesetzt wird. Eine Weiterentwicklung nutzt hierfür ein Gemisch aus Ammoniak und Wasser. Auf diese Weise werden höhere Wirkungsgrade bei allerdings größerer Anlagenkomplexität erreicht.

Mit Ausnahme der Nutzung oberflächennaher heißer Lagerstätten, die derzeit international sogar stark zunimmt, befindet sich die geothermische Stromerzeugung noch in einem frühen Entwicklungsstadium. In Deutschland ist man hier derzeit in der Pilotphase mit einem verschwindend kleinen Anteil an der gesamten Stromerzeugung. Hier bedarf es noch wesentlicher Fortschritte sowohl bei der Kraftwerkstechnik als auch bei der Steigerung der Ausbeute der Quellen sowie der Vorhersage ihrer Ergiebigkeit. Dagegen wird vor allem das oberflächennahe geothermische Potenzial wegen seiner Wirtschaftlichkeit zunehmend zum Heizen und Kühlen von Gebäuden bzw. zur Warmwasserbereitung genutzt. Da sich dieses Verfahren trotz anfänglich etwas höherer Investitionen schnell rentiert, ist hier mit deutlichem Wachstum zu rechnen.

Januar 2006 Ulrik Neupert

Mikro-Brennstoffzellen

Brennstoffzellen sind galvanische Zellen, welche die Energie einer chemischen Reaktion in elektrische Energie umwandeln. Im Prinzip handelt es sich um zwei Elektroden, die durch einen ionenleitenden Elektrolyten getrennt und über einen externen Stromkreis elektrisch leitend verbunden sind. Nachdem lange die Nutzung der Brennstoffzellen-Technologie für Systeme mit hohem Leistungsbedarf, wie z.B. Fahrzeugantriebe und Kraftwerke, im Vordergrund des Interesses standen, wird in letzter Zeit zunehmend die Option diskutiert, miniaturisierte Brennstoffzellen in kleinen tragbaren Geräten (z.B. Mobiltelefone, Camcorder, Laptops, Navigationsgeräte, Digitalkameras) einzusetzen.

Miniaturisierte Brennstoffzellen-Systeme mit einer im Vergleich zu Batterien um den Faktor 5 bis 10 höheren Energiedichte würden die Betriebszeit von mobilen Geräten um ein Mehrfaches erhöhen. Sie könnten kleiner und leichter konstruiert werden und der Trend, ihre Funktionalität z.B. durch Integration von mehr Rechenleistung oder Sprach- und Datendiensten zu erweitern, würde unterstützt. Durch den Wegfall langer Ladezeiten würde sich der Anwendungskomfort erhöhen. Auch über kompakte Hybridsysteme z.B. durch die Kombination mit Superkondensatoren oder Lithiumionen-Akkus wird nachgedacht, um die Ausgangsleistung der Brennstoffzelle bei Geräten mit sehr variabler Leistungsaufnahme nicht auf nur zeitweise benötigte Spitzenlasten auslegen zu müssen.

Für den hier angesprochenen Anwendungsbereich wird vor allem die so genannte Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (PMFC) wegen ihres hohen elektrischen Wirkungsgrades und ihrer niedrigen Arbeitstemperatur favorisiert. Sie verwendet Wasserstoff und Luftsauerstoff als Partner für die stromliefernde Reaktion; der Elektrolyt ist eine für Protonen durchlässige Membran. Der Wasserstoff wird an der mit einem Platinkatalysator belegten Anode oxidiert. Das freigesetzte Proton diffundiert durch die Membran zur ebenfalls mit einem platinbasierten Katalysator belegten Kathode, wo es sich mit dem dort reduzierten Sauerstoff zum Reaktionsprodukt Wasser verbindet. Gleichzeitig kommt es über den externen Stromkreis zu einem Elektronenfluss, der die erforderliche elektrische Arbeit leistet.

Eine Variante der PMFC-Zelle ist die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC). Methanol hat als Brennstoff eine höhere Energiedichte als Wasserstoff in den bislang verfügbaren physikalischen Speicherformen. Allerdings hat dieser Brennstoffzellentyp eine geringere Leistungsdichte und ist noch weniger ausgereift. Daher geht man auch den Weg, die höhere Leistungsdichte der PMFCs mit der Energiedichte des Methanols zu verbinden, indem man aus Methanol in einem vorgeschalteten Reformer Wasserstoff erzeugt.

Um Brennstoffzellen auf die Größenordnung von Batterien, die sie ersetzen sollen, zu reduzieren und ihre Leistungsdichte zu erhöhen, bedient man sich verschiedener Ansätze aus der Mikrosystemtechnik, der Produktion integrierter elektrischer Schaltkreise und der Nanotechnologie. Die Brennstoffzelle selber wird in Dünnschichtbauweise aus dünnen Lagen des nanostrukturierten Polymerelektrolyten und der mit katalytisch wirkenden Nanopartikeln belegten nanoporösen Elektroden hergestellt. Es wurde auch schon demonstriert, dass sich die verschiedenen Brennstoffzellen-Lagen mit speziell entwickel-

ten Tinten auf ein Substrat drucken lassen. Als ein völlig anderes Aufbaukonzept wurden röhrenförmige Brennstoffzellen aus Kapillaren mit etwa 1,5 mm Durchmesser entwickelt, die eine höhere Leistungsdichte bei noch niedrigeren Fertigungskosten bieten sollen.

Von besonderer Bedeutung bei der Konstruktion von Mikro-Brennstoffzellen ist die gleichmäßige Versorgung der Elektrodenflächen mit Luft und Wasserstoff, vor allem, wenn die Zellen bei einer Bauhöhe im Millimeterbereich vollständig selbstatmend und ohne zusätzlichen Lüfter ausgelegt sein sollen. Gleichzeitig muss das Reaktionsprodukt Wasser schnell von der Elektrode abgeführt werden. Für diese Aufgabe benutzt man z.B. dünne Bipolarplatten aus leitfähigem Polymer, die über Verfahren wie Extrusion, Heißpressen oder Spritzgießen mit einer Mikrostruktur aus Kanälen versehen werden. Darüber hinaus sind die Bipolarplatten auch für die Ableitung der Reaktionswärme und bei gestapelten Brennstoffzellen für die elektrische Kontaktierung benachbarter Zellen zuständig.

Neben der eigentlichen Brennstoffzelle muss auch die Peripherie miniaturisiert werden. Chemische Reaktoren für die Reformierung von Methanol mit ihren Leitungen, Verdampfern, Heizelementen und Wärmetauschern lassen sich in Form von mehrschichtigen keramischen Systemen realisieren. Diese entstehen aus Keramikwafern, aus denen man zunächst mit Lasern z.B. die Reaktionskanäle herausbohrt. Die Wafer werden anschließend übereinandergelegt und durch Sintern verbunden. In einem anderen Konzept wird der Methanolreformer samt Heizelementen, Sensoren und Steuerungselektronik durch Photolithographie, Ätz- und Sputtertechniken auf einem kleinen Siliziumchip untergebracht.

Einen weiteren Schritt bei der Miniaturisierung stellt die in der Entwicklung befindliche, in lebendes Gewebe implantierbare Brennstoffzelle dar. Diese Zelle erzeugt im Blutkreislauf Energie aus der Oxidation des Blutzuckers und der Reduktion des im Blut gelösten Sauerstoffs an mit zwei unterschiedlichen Enzymen beschichteten Kohlenstofffaser-Elektroden. Damit ließen sich Peilsender an Kleintieren oder sogar an Insekten mit Energie versorgen bzw. Biosensor-Transmitter-Systeme betreiben, die z.B. den Glucosegehalt im Blut von Diabetikern überwachen.

Da der größte Kostenfaktor bei Brennstoffzellen nicht im Materialwert der Systemkomponenten sondern in der bislang überwiegend handwerklichen Fertigung liegt, ist davon auszugehen, dass die Produktion in großen Stückzahlen mit Mikrofabrikationstechniken große Einsparungen bringen wird. Daher ist damit zu rechnen, dass in wenigen Jahren bei der Stromversorgung von tragbaren Geräten die bisher verwendeten Akkus oder Batterien vielfältig von Mikro-Brennstoffzellen-Systemen ersetzt werden. Bei Kraftfahrzeugen und Kraftwerken wird diese Technologie allerdings erst wesentlich später konkurrenzfähig werden können, da hier die etablierten Lösungen noch lange deutlich preiswerter bleiben werden.

Juni 2004 Ulrik Neupert

Hochleistungs-Mikrowellenquellen

Für viele technische Anwendungen spielen Mikrowellen, d.h. elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich zwischen 300 MHz und 300 GHz (entsprechend Wellenlängen zwischen 1 m und 1 mm) seit langem eine wichtige Rolle. In letzter Zeit gewinnen neben der Informations- und Kommunikationstechnik sowie der Sensorik, die in der Regel Strahlungsquellen relativ niedriger Leistung erfordern, die Möglichkeiten zur Nutzung so genannter Hochleistungs-Mikrowellen (HLM) immer mehr an Bedeutung. Insbesondere bei den hierfür erforderlichen Quellen mit Spitzenleistungen von über 100 MW bzw. mittleren Leistungen von über 100 kW ist eine Reihe vielversprechender neuer Entwicklungen zu beobachten.

Der wichtigste Typ von HLM-Quellen basiert auf der Erzeugung des Mikrowellenfeldes mit Hilfe eines Elektronenstrahls. Die Dauer des erzeugten Pulses lässt sich je nach Konstruktion von Nanosekunden bis Minuten variieren. Bei gepulsten Quellen wird zunächst die Primärenergie langsam in einem Zwischenspeicher (z.B. einer Kondensatorbank) gesammelt und dann durch eine schnelle Entladung mit anschliessender Pulsformung als komprimierter Hochspannungspuls an eine Elektronenröhre gelegt. Diese erzeugt aus dem Hochspannungspuls einen Elektronenstrahl, der in Wechselwirkung mit einem geeigneten Hohlraumresonator und ggf. einem äußeren Magnetfeld ein Mikrowellenfeld hervorbringt. Dabei wird entweder ein extern eingespeistes Hochfrequenzsignal verstärkt (Klystron) oder geeignete Eigenmoden des Hohlraumresonators angeregt und verstärkt (Magnetron, Gyrotron). Bei permanent arbeitenden Quellen entfällt die Leistungskompression per Zwischenspeicher und die von der Röhre benötigte Leistung muss dauerhaft zur Verfügung gestellt werden.

Bestimmt durch die jeweiligen Anwendungsfelder haben sich drei verschiedene Entwicklungslinien von HLM-Elektronenstrahlquellen herausgebildet. Am ältesten sind gepulste Quellen, meist Hochleistungs-Klystrons, mit Spitzenleistungen im Bereich von 100 MW. Sie haben Pulsdauern im Bereich von Mikrosekunden und Pulswiederholraten im Bereich von 100 Hz. Diese Quellen können tagelang ohne Probleme laufen. Sie werden seit über fünfzig Jahren für die besonderen Anforderungen in großen Elementarteilchen-Linearbeschleunigern entwickelt. Hierbei müssen Hunderte bis Tausende solcher Quellen entlang der Beschleunigungsstrecke in exakter Abstimmung zusammenwirken.

Eine zweite Entwicklungslinie umfasst HLM-Quellen, meist Gyrotrons, mit hoher mittlerer Leistung für Pulsdauern bis in den Minutenbereich. Sie werden zur Aufheizung von durch Magnetfelder eingeschlossenen heißen Plasmen in Fusionsreaktoren genutzt. Je nach Art der Energieübertragung vom Mikrowellenfeld auf die geladenen Plasmateilchen und je nach Plasmazustand muss die Quelle für eine optimale Heizfrequenz ausgelegt werden. Seit Beginn der Fusionsforschung sind die geforderten Frequenzen und Leistungen für die jeweils aktuellen Forschungsreaktoren permanent gestiegen und bedingen so eine dauernde Weiterentwicklung der Quellen. Hauptprobleme sind hier die thermische Belastung der Gyrotronwand und des dielektrischen Austrittsfensters der HLM-Strahlung zwischen Quelle und Plasma. In jüngerer Zeit werden auch industrielle Anwendungen

vorangetrieben wie das Sintern von Keramiken mit maßgeschneiderten Eigenschaften oder das Tempern von Halbleitern.

Noch in frühem Stadium befindet sich die Entwicklung von Quellen mit Spitzenleistungen im GW-Bereich und Pulsdauern im Mikrosekundenbereich für Folgen von etwa 100 Pulsen innerhalb einer Sekunde. Die gewünschte Pulsdauer konnte bisher noch nicht erreicht werden, da das im Hohlraumresonator induzierte Feld nach einigen 100 ns durch Überschläge an kritischen Stellen der Wand kurzgeschlossen wird, bevor der Elektronenstrahl abbricht. Zu den HLM-Quellen dieser Gruppe gehören sowohl relativistische Versionen klassischer Systeme wie Magnetron, Klystron oder Rückwärtswellengenerator als auch neuartige Quellen wie der Vircator oder der Magnetically Insolated Line Oscillator (MILO), die nur bei hohen Stromstärken funktionieren. Im Unterschied zu ihren klassischen Vorläufern verwenden die relativistischen Varianten intensive Elektronenstrahlen mit hohen Stromstärken bei relativistischer Elektronenergie. Zur Erzeugung der hohen Stromstärken dienen so genannte kalte Kathoden, bei denen die Elektronen durch eine hohe Diodenspannung aus dem Kathodenmaterial herausgerissen werden. Potentielle Anwendungen dieses Quellentyps sind HLM-Waffen zur Ausschaltung gegnerischer Elektronik aus größeren Entfernungen sowie Impulsradare zur Früherkennung bewegter Systeme vor störendem Hintergrund.

Ein neuer Typ von HLM-Quellen sind die so genannten Impulsquellen, bei denen ein extrem kurzer Hochspannungspuls ohne den „Umweg" über einen Elektronenstrahl direkt über eine Antenne abgestrahlt wird. Die Pulse sind extrem kurz (100 ps bis 10 ns) und werden aufgrund ihrer sehr großen relativen Bandbreite auch als Ultra-Wideband (UWB)-Pulse bezeichnet.

Das Funktionsprinzip solcher Impulsquellen ist einfach. Wie bei gepulsten Elektronenstrahlquellen lädt eine Hochspannungsquelle einen Zwischenspeicher auf, der beim Erreichen eines Schwellwertes einen schnellen Schalter zündet und sich in Form eines stark komprimierten Leistungspulses entlädt. Für extreme Bandbreiten schickt man diesen Puls über eine Pulsformungsleitung, die Dauer und Anstiegszeit des Pulses weiter verkürzt, direkt in eine geeignete UWB-Antenne, die einen möglichst großen Teil der Pulsenergie abstrahlt. Anders als bei Elektronenstrahlquellen, wo das Mikrowellenfeld schon im Resonanzhohlraum der Elektronenröhre entsteht und von dort über Hohlleiter zur Antenne geleitet wird, entsteht das abgestrahlte Mikrowellenfeld einer Impulsquelle erst in der Antenne.

Trotz Spitzenleistungen im GW-Bereich ist die mittlere Leistung von HLM-Impulsquellen gering. Ihr niedriger Energieverbrauch erlaubt den kompakten Bau des gesamten Senders und die Verwendung in mobilen Plattformen. Anwendung finden sie in Impulsradaren zur Detektion von Minen, unterirdischen Strukturen und getarnten Objekten sowie zur Identifizierung von Objekten, deren Ausdehnung groß ist gegen die Pulslänge. Eine weitere Anwendungsoption ist die vorübergehende Störung von Elektronik aller Art.

Juli 2003 Wilhelm Ochs

Thermoelektrische Generatoren

Als thermoelektrische Energiewandlung wird die direkte Umsetzung von Wärmeenergie in elektrische Energie bezeichnet. Die so genannten Thermoelektrischen Generatoren basieren auf einem speziellen thermoelektrischen Effekt, bei dem in einem Leiterkreis aus zwei verschiedenen Metallen eine materialabhängige elektrische Spannung (Thermospannung) erzeugt wird, wenn die Verbindungsstellen unterschiedliche Temperaturen haben. Dieser so genannte Seebeck-Effekt tritt bereits bei geringen Temperaturunterschieden auf und wird in der Messtechnik, bei Spezialanwendungen (z.B. in der Raumfahrt) zur Stromerzeugung und in seiner Umkehrung, dem Peltier-Effekt, zum Wärmen und Kühlen benutzt. Thermoelektrische Generatoren können zur Nutzung der Abwärme, die bei Energiewandlungs- und anderen Produktionsprozessen freigesetzt wird, ergänzend eingesetzt werden. Sie können aber auch zusammen mit nuklearen, chemischen oder solaren Wärmequellen eigenständige Aggregate bilden. Darüber hinaus sind sie im Aufbau einfach, können sehr klein sein und sind in der Größe nach oben hin frei skalierbar. Da sie keine mechanisch bewegten Teile enthalten, eignen sie sich auch sehr gut für Langzeitanwendungen.

Üblicherweise bestehen Thermoelektrische Generatoren aus jeweils einem p- und einem n-leitenden thermoelektrischen Halbleiterelement (z.B. aus einer Bismut-Tellur-Legierung), deren Enden jeweils auf unterschiedlichem Temperaturniveau liegen. Ihr relativ geringer Wirkungsgrad in Höhe von wenigen Prozent sowie die hohen Herstellungskosten haben die breite Nutzung dieser Technologie bisher verhindert. Eine Reihe von vielversprechenden Forschungsergebnissen der letzten Jahre scheint jedoch einen breiteren Durchbruch möglich zu machen. Ein Ziel ist die Herstellung thermoelektrischer Werkstoffe, die eine hohe Thermospannung und sowohl eine hohe elektrische Leitfähigkeit zur Vermeidung von Widerstandsverlusten als auch eine geringe Wärmeleitfähigkeit zur Vermeidung des Temperaturausgleichs aufweisen. Bei dieser Suche geht es nicht nur um neue Halbleitermaterialien, sondern auch um neuartige Strukturen. So wurde kürzlich demonstriert, dass thermoelektrische Elemente, die aus alternierenden nanoskaligen Schichten unterschiedlicher Halbleiter bestehen, mehr als doppelt so effizient sein können wie die bisher eingesetzten. Die Ursache hierfür liegt in der Gitterstruktur der Schichtlagen, welche die für den Wärmetransport verantwortlichen Molekülschwingungen blockiert, jedoch den Elektronenfluss zulässt.

Eine weitere Variante von Thermoelektrischen Generatoren mit einem etwas komplexeren Aufbau zeigt, dass die Umwandlungseffizienz nicht nur von elektrischer Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Thermospannung begrenzt sein muss. So kann die Leistung eines guten thermoelektrischen Halbleiters durch Einfügen zusätzlicher Elektronenemitter- und Ausgleichsschichten um ein Mehrfaches verbessert werden. Dieses neue, als thermische Diode bezeichnete, Bauelement nutzt den so genannten thermionischen Effekt, der den Austritt von Elektronen aus einer heißen Elektrode, ihren Übertritt zu einer anderen Elektrode und den somit erzeugten Stromfluss beschreibt. Im Gegensatz zu den üblichen thermionischen Vakuum-Röhrendioden tritt bei der Halbleiterversion ein nennenswerter Stromfluss nicht erst bei Temperaturen von ca. 1000°C auf, sondern der-

zeit bereits schon ab 200°C. Hierdurch wird eine viel breitere praktische Nutzung möglich.

Im Weltraum werden Thermoelektrische Generatoren schon seit langem als Bestandteil von Nuklearbatterien benutzt, wobei die Wärme aus dem Zerfall von Radioisotopen stammt. Sie sind gegenüber kosmischer Strahlung oder Mikrometeoriten robuster als Solarzellen, bieten eine höhere Energiedichte und stellen für zukünftige miniaturisierte Raumsonden die aus jetziger Sicht einzig mögliche über Jahrzehnte funktionierende Energieversorgung dar. Auch mit Spiegeln oder Linsen konzentriertes Sonnenlicht kann zur thermoelektrischen Stromerzeugung im Weltraum genutzt werden.

Weitere Anwendungen gibt es bei Kraftfahrzeugen, Schiffen und Luftfahrzeugen. Hier lässt sich die in den Motoren bzw. auch in Turbinen oder Brennstoffzellen entstehende Abwärme zur Stromerzeugung nutzen. So existiert bereits ein Experimental-LKW, bei dem soviel elektrische Energie aus dem heißen Abgasstrom des Dieselmotors gewonnen wird, dass auf die Motorleistung verbrauchende Lichtmaschine verzichtet werden kann.

Auch in der stationären Energieversorgung gibt es eine Reihe von Anwendungsmöglichkeiten für Thermoelektrische Generatoren. So können sie elektrische Energie direkt aus den regenerativen Energiequellen Sonnenlicht und Biomasse erzeugen. Dort, wo fossile Brennstoffe zur Energieerzeugung verwendet werden, kann die Abwärme sinnvoll genutzt und damit der Gesamtwirkungsgrad erhöht werden. Im kleinen Maßstab, wie bei Heizkesseln, lässt sich die zum Betrieb für Steuerungselektronik und Lüfter notwendige elektrische Energie aus der Abwärme gewinnen. Damit werden solche Anlagen unabhängig von externer Stromversorgung. Es ist aber auch denkbar, Thermoelektrische Generatoren direkt mit fossilen Brennstoffen zu betreiben. So wären z.B. thermische Dioden mit erwarteten Wirkungsgraden von über 20% gegenüber konventionellen, mit einem Verbrennungsmotor angetriebenen, Generatoren konkurrenzfähig. Sie hätten den großen Vorteil, keinen Lärm zu verursachen.

Viele interessante Anwendungen für Thermoelektrische Generatoren ergeben sich durch die Möglichkeit, elektrische Energie aus der verhältnismäßig niedrigen Körperwärme des Menschen zu beziehen. Im Handel ist bereits eine auf diese Weise betriebene Armbanduhr erhältlich. Auch für die so genannte Intelligente Bekleidung, d.h. Textilien mit integrierten elektronischen Applikationen (z.B. Sensoren für medizinische Daten, Mobiltelephone, Computer) könnte dies die Unabhängigkeit von Batterien bedeuten.

Generell gilt, dass die deutlichen Verbesserungen bei Thermoelektrischen Generatoren in den letzten Jahren vor allem auf die Fortschritte der Materialwissenschaften bei Dünnschichten zurückzuführen sind. Aufgrund der dadurch möglichen Effizienzsteigerung wird diese Technologie, von Nischenapplikationen ausgehend, zukünftig immer größere Anwendungsbereiche finden.

März 2003 Ulrik Neupert

Batterien

Batterien sind chemische Speicher elektrischer Energie. Sie bestehen aus sog. galvanischen Zellen, in denen zwischen zwei Elektroden unterschiedlicher Zusammensetzung, die über einen Elektrolyten miteinander leitfähig in Verbindung stehen, eine stromerzeugende chemische Reaktion stattfindet.

Wenn der Vorgang der Stromabgabe hinsichtlich der Elektrochemie und Struktur der Elektroden annähernd reversibel ist, d.h. sich durch Zufuhr einer entsprechenden Elektrizitätsmenge die Batterie wieder in ihren ursprünglichen Zustand zurückversetzen läßt, ist das System wiederaufladbar (Sekundärbatterie bzw. Akkumulator). Dabei sind je nach Batterietyp bis zu über 1000 Lade- und Entladezyklen möglich. Da Akkus mit der Zeit ihre Ladung verlieren (Selbstentladung), sind sie z.B. nicht für Geräte geeignet, die nur selten benutzt werden.

Vor allem die starke Nachfrage nach leistungsfähigen Akkus für mobile Geräte treibt ihre Weiterentwicklung voran, aber auch im Bereich der Elektrofahrzeuge gibt es inzwischen leistungsfähige Systeme. Dabei spiegelt die Vielzahl verschiedener Batterietypen die unterschiedlichen Anforderungen wider, die nicht von einem einzigen System erfüllt werden können, das alle Eigenschaften optimal in sich vereinen müßte. Neue Batteriekonzepte in unterschiedlichen Entwicklungsstadien zeigen aber, daß hinsichtlich Energiedichte, Leistungsdichte, Lebenszyklen und Umweltverträglichkeit noch mit deutlichen Verbesserungen gerechnet werden kann.

Bei den nicht wiederaufladbaren Batterien (Primärbatterien) werden wesentliche Fortschritte von den auf Lithium als Anodenmaterial basierenden Zellen erwartet. Ihre Vorteile liegen v.a. in der außerordentlich hohen gewichts- und volumenbezogenen Energiedichte, der sehr geringen Selbstentladung und der dadurch bedingten langen Lagerfähigkeit (zehn Jahre oder mehr). Eine Übergangsform zu den Akkus stellt eine neue Variante der Alkali-Mangan-Primärzelle dar, die mit einem darauf abgestimmten Ladegerät wieder aufgefrischt werden kann. Sie erreicht dabei zwar nicht die Zyklenzahl von Nickel-Cadmium-Akkus, ist aber frei von Schwermetallen.

Der Bereich der wiederaufladbaren Batterien wurde lange von den Bleiakkus und Nickel-Cadmium-Zellen dominiert. Das Entwicklungspotential des Bleiakkus ist weitgehend ausgereizt. Für Elektrofahrzeuge hat sich die geschlossene, wartungsfreie Blei-Gel-Batterie durchgesetzt, deren Vorteile der günstige Preis und die sichere, zuverlässige Handhabung sind. Nickel-Cadmium-Akkus werden sich dort behaupten können, wo es auf Schnelladung und Hochstrombelastung ankommt. Auf den meisten Gebieten werden sie aber von Nickel-Metallhydrid-Akkus ersetzt werden, die bei sonst vergleichbaren oder besseren Eigenschaften eine höhere Kapazität haben.

Noch größere Energiedichten erreichen die Lithium-Ionen-Zellen, mit denen es erstmals gelungen ist, das besonders hohe elektrochemische Potential von Lithium auch in wiederaufladbaren Batterien zu nutzen. Obwohl sie erst am Anfang ihrer Entwicklung stehen, nimmt ihre Verwendung in tragbaren Geräten bereits sprunghaft zu. Darüber hinaus wird dieses vielversprechende System auch zu Großbatterien für Elektrofahrzeuge

weiterentwickelt. Lithium-Ionen-Zellen können jedoch wegen ihrer höheren Zellspannung die Nickel-Cadmium- oder Nickel-Metallhydrid-Akkus in vorhandenen Geräten nicht direkt ersetzen und sind nicht für höchste Strombelastungen geeignet. Forschungsbemühungen zielen auf preisgünstigere und umweltverträglichere Materialien und die Verwendung fester Polymerelektrolyte ab. So werden bereits Lithium-Polymer-Batterien in Form dünner, flexibler Folien hergestellt.

Batterien auf der Basis von Natrium (Natrium-Schwefel-, Natrium-Nickelchlorid-Systeme) haben eine deutlich höhere Energiedichte als Blei- oder Nickelbatterien. Da sie aber Reaktionstemperaturen von fast 300°C benötigen, müssen sie thermisch isoliert und auf Betriebstemperatur gehalten werden. Bei der Natrium-Schwefel-Batterie kommen noch Korrosionsprobleme dazu, so daß dieses System nur noch für stationäre Anlagen weiterentwickelt wird. Elektrofahrzeuge mit Natrium-Nickelchlorid-Akku (ZEBRA-Batterie) sind dagegen bereits im Handel. Eine weitere für Elektrofahrzeuge interessante Hochtemperaturbatterie ist eine Variante der Zink-Luft-Batterie. An der Anode wird Luftsauerstoff reduziert, während an der Kathode Zink irreversibel oxidiert wird. Die Zinkelektroden dieser Primärbatterie sind in Wechselkassetten untergebracht, so daß durch deren Austausch ein mechanisches Laden möglich ist.

Zukünftig werden sog. intelligente Akkus zu Komponenten eines elektronischen Batteriemanagementsystems. Diese Akkus enthalten einen Chip, der Informationen über den Akkutyp, den Ladezustand, die Zahl der durchlaufenen Ladezyklen, die Batterietemperatur usw. bereithält. Diese Informationen werden von darauf ausgelegten Geräten wie Mobiltelefonen oder tragbaren Computern dazu genutzt werden, die verbleibende Betriebsdauer anzuzeigen, die Akkus schnell und sicher vollständig zu laden und damit die Lebensdauer und die Gesamtsystemleistung zu erhöhen. So ist selbst ein effizienter Mischbetrieb unterschiedlicher Batterietypen und sogar die Integration anderer Energiequellen wie Solar- oder Brennstoffzellen möglich.

Trotz der zunehmenden Konkurrenz insbesondere durch Brennstoffzellen werden Batterien vorläufig die wichtigste mobile Quelle elektrischer Energie bleiben. Dabei geht die Entwicklung vor allem zu wiederaufladbaren Systemen, die sich möglichst einfach in Geräte integrieren lassen. Der hiermit zusammenhängende Trend zu biegsamen Außengehäusen wird auch durch die Entwicklung metallfreier Batterien unter Verwendung elektrisch leitender Polymere verdeutlicht.

März 2000 Ulrik Neupert

Photovoltaik

Unter Photovoltaik versteht man die Summe aller Techniken zur direkten Umwandlung von Licht in elektrische Energie unter Nutzung des photoelektrischen Effektes. Kernstück der Stromerzeugung aus Sonnenlicht sind die Solarzellen. Eine solche Zelle kann heute ein Vielfaches der Energie erzeugen, die bei ihrer Herstellung verbraucht wurde. Trotz der derzeit hohen Herstellungskosten spielt die Photovoltaik als umwelt- und klimafreundliche Alternative in Szenarien für eine künftige nachhaltige Energieversorgung eine große Rolle.

Solarzellen bestehen in der Regel aus einer Scheibe hochreinen Halbleitermaterials mit einem p-n-Übergang parallel zur Oberfläche. Durch Absorption von Lichtquanten, deren Energie größer ist als die Bandlücke, werden freie Ladungsträger erzeugt. Diese diffundieren und werden durch das innere elektrische Feld des p-n-Übergangs getrennt. Die so erzeugte elektrische Gleichspannung wird außen abgegriffen und kann elektrische Arbeit verrichten. Die verschiedenen Zellentypen unterscheiden sich vor allem im verwendeten Halbleitermaterial und den daraus resultierenden Herstellungskosten und Wirkungsgraden. Darüber hinaus wird an Solarzellen geforscht, die nach einem anderen Prinzip funktionieren. In ihnen wird ein organischer Farbstoff oder ein leitfähiges Polymer durch das Sonnenlicht zur Abgabe von Elektronen anregt.

Die Spannung beträgt bei Zellen aus Silizium etwa 0,5 V. Mit höherer Beleuchtungsstärke nimmt die maximale Stromstärke zu, während die Spannung relativ konstant bleibt. Zur Anpassung an unterschiedliche Leistungsanforderungen werden einzelne Solarzellen zu Modulen verschaltet. Wieviel von der eingestrahlten Lichtmenge in nutzbare elektrische Energie umgewandelt wird, gibt der Wirkungsgrad an. Vergleichswerte beziehen sich in der Regel auf Laborbedingungen (25°C). Bei höheren Zelltemperaturen nimmt der Wirkungsgrad ab.

Unter den Halbleiter-Solarzellen sind die Siliziumzellen am weitesten erforscht und werden in verschiedenen Varianten industriell gefertigt. Silizium für monokristalline Zellen wird aus einer hochreinen Schmelze gezogen und in dünne Scheiben gesägt. Bei sehr guter Stabilität konnten Wirkungsgrade bis zu 24 % erreicht werden, was bereits sehr nahe am theoretischen Maximum von 28 % liegt. Polykristalline Zellen entstehen aus gegossenen Siliziumblöcken, die ihre polykristalline Struktur durch spezielle Abkühlprozesse erhalten. Sie zeigen ein sehr gutes Stabilitätsverhalten, erreichen Wirkungsgrade von bis zu ca. 20 % und verbrauchen bei der Herstellung weniger Energie. Noch preisgünstiger sind Zellen, bei denen eine dünne Siliziumschicht materialsparend und großflächig auf Glas oder einem anderen Substratmaterial abgeschieden wird. Die industriell gefertigten Dünnschichtmodule haben einen Wirkungsgrad von 10 %, der innerhalb eines Jahres auf einen stabilen Wert von ca. 8 % sinkt.

Solarzellen aus anderen Materialien als Silizium sind in ihrer Entwicklung größtenteils weiter zurück. Zellen auf Basis der III-V-Halbleiter (z.B. GaAs, GaSb, AlSb, InP) sind derzeit relativ teuer, haben allerdings eine sehr gute Stabilität und auch hohe Laborwirkungsgrade (17-25 %). GaAs-Zellen konnten sich daher und wegen ihrer guten Strahlen-

festigkeit für Raumfahrtanwendungen durchsetzen. Zellen auf Basis der II-VI-Halbleiter (z.B. CdTe) oder des I-III-VI-Halbleiters Kupferindiumdiselenid (CIS, $CuInSe_2$) können mit Hilfe der Dünnschichttechnologie besonders preiswert gefertigt werden. Vor allem die CIS-Zellen haben ein großes Zukunftspotential. Durch Zulegieren von Gallium konnten Wirkungsgrade von fast 18 % erreicht werden.

Da dem Wirkungsgrad einer einfachen Solarzelle physikalische Grenzen gesetzt sind, geht man einige neue Wege, um den Wirkungsgrad des Gesamtsystems zu erhöhen. Eine Möglichkeit besteht darin, zur besseren Nutzung des Sonnenspektrums zwei bis drei Halbleitermaterialien unterschiedlicher Bandlücken zu kombinieren. Wirkungsgrade von 35 % werden für realisierbar gehalten. Für Stapelanordnungen sind auch Zellen mit kleiner Bandlücke, z.B. aus GaSb, interessant, die Wärmestrahlung in elektrische Energie umwandeln können (Thermovoltaik). Eine mehrfache Ausnutzung des Sonnenlichtes ist auch mit Kollektoren möglich, welche die photovoltaische Stromerzeugung mit der solarthermischen Erwärmung von Wasser ergänzen.

Um die Oberfläche der Solarzelle optimal mit Licht zu versorgen, wurden Zellen entwickelt, bei denen Reflexionsverluste durch Oberflächenstrukturierung oder Entspiegelung vermindert werden. In Konzentratorzellen wird durch die Verwendung von Spiegel- und Linsensystemen eine höhere Lichtintensität auf die Zellen fokussiert. Mit sog. bifacialen Solarzellen ist es gelungen, sowohl das auf der Vorder- wie auch auf der Rückseite auftreffende Licht zu nutzen. Dadurch kann nicht nur die direkte Einstrahlung der Sonne, sondern auch die Reflexion aus der Umgebung genutzt und eine größere Energieausbeute pro Fläche erreicht werden.

Nach wie vor ist die Kostenreduktion die größte Herausforderung bei der Herstellung von Solarmodulen. Dabei sind nicht nur hohe Wirkungsgrade, sondern vor allem vereinfachte Prozeßtechnologien für eine preisgünstige Großserienfertigung entscheidend. Daher ist anzunehmen, daß zukünftig Dünnschichtzellen, z.B. auf Basis von Silizium oder CIS, eine größere Rolle spielen werden. Im Vergleich zu den Stromerzeugungspreisen aus fossilen Energieträgern werden photovoltaische Kraftwerke dennoch auf lange Sicht deutlich teurer bleiben. Bei der netzfernen Energieversorgung in entlegenen Gegenden und vor allem für eine Vielzahl dezentral oder mobil genutzter Geräte ist die Photovoltaik schon heute rentabel. Durch den wachsenden Markt und die weiter sinkenden Kosten wird sich die Palette ihrer Anwendungen stark erweitern.

Oktober 1999 Ulrik Neupert

Wasserstofftechnologie

Alle Verfahren, die sich mit Gewinnung, Transport, Lagerung und Nutzung von Wasserstoff befassen, werden unter dem Begriff Wasserstofftechnologie zusammengefaßt. Elementarer Wasserstoff läßt sich unter Einsatz verschiedener Energieformen (Strom, Wärme, Licht) und Rohstoffe (Wasser, Biomasse, Kohle, Erdgas) gewinnen. Bei der Umwandlung von Wasserstoff in Strom oder Wärme entsteht im Idealfall nur Wasserdampf. Voraussetzung für einen sinnvollen Einsatz von Wasserstoff als Speicher- und Transportmedium für Energie sind kostengünstige und ökologisch unbedenkliche Energiequellen für dessen Gewinnung sowie effiziente und sichere Transport-, Speicher- und Umwandlungstechniken.

Die Ursprünge der Wasserstofftechnologie liegen fast 200 Jahre zurück, als erstmals die Elektrolyse von Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff gelang. Die Umkehrung dieses Prozesses, die Stromerzeugung aus Wasserstoff und Sauerstoff in Brennstoffzellen, erreichte man bereits vierzig Jahre später. Als Hauptbestandteil des Stadtgases wurde Wasserstoff in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts zur Wärme- und Lichterzeugung genutzt. In den letzten Jahrzehnten entstanden mit Wasserstoff betriebene Luftfahrzeug- und Raketenantriebe. In der chemischen Industrie wird Wasserstoff heute vor allem zur Herstellung von Ammoniak und Methanol, zur Fetthärtung und in Raffinerieprozessen zur Herstellung von Benzin verwendet.

Vor dem Hintergrund des industriellen Wasserstoffbedarfs haben sich großtechnische Verfahren zur Wasserstoffgewinnung aus fossilen Energieträgern und aus Wasser entwickelt. In Frage kommen in erster Linie die Dampfspaltung von Erdgas, die Kohlevergasung und die Elektrolyse. Die ersten beiden Verfahren sind unter Umweltgesichtspunkten (Emissionsreduktion, CO_2-Verminderung) in einer Wasserstoff-Energiewirtschaft problematisch. Bei der Elektrolyse hängt die Umweltfreundlichkeit von der Art der Erzeugung des benötigten Stroms ab. Wirtschaftlich ist dieses Verfahren dort, wo Strom kostengünstig hergestellt werden kann (z.B. durch Wasserkraft) oder wo Überschußenergie aus bestehenden Kraftwerkskapazitäten anfällt. Hoffnung setzt man auf den Preisverfall bei der Erzeugung von Solarstrom. Kurz vor der Marktreife steht die in der CO_2-Bilanz neutrale Vergasung von Biomasse. Auch an einer direkten Erzeugung von Wasserstoff mit von der Photosynthese abgeleiteten Verfahren z.B. durch Algen wird geforscht.

Die Frage der Speicherung von Wasserstoff ist für seine Verwendung entscheidend. Zwar hat Wasserstoffgas auf seine Masse bezogen einen großen Energieinhalt; auf das Volumen bezogen ist seine Energiedichte unter Normalbedingungen jedoch nur sehr gering. Zur Verkleinerung des Speichervolumens geht man verschiedene Wege. Unter Druck kann das Gas derzeit bis zum Faktor 300 komprimiert gespeichert werden. Wegen des hohen Gewichts von stählernen Drucktanks, das vor allem für mobile Anwendungen nachteilig ist, konzentriert sich die Entwicklung auf moderne Verbundwerkstoffe, die gleichzeitig leichter sind und höhere Drücke ermöglichen sollen. Wasserstoff läßt sich durch Abkühlung unter -253°C auch verflüssigen. Flüssigwasserstoffspeicher haben eine höhere Speicherdichte als Drucktanks, weisen aber eine gewisse Abdampfrate auf und sind derzeit wegen des hohen Isolationsaufwandes teurer.

Auch die chemische Speicherung von Wasserstoff ist möglich. So geben Metallhydride bei Wärmezufuhr Wasserstoff ab und sind unter Wärmeabgabe wieder aufladbar. Sie sind allerdings sehr teuer und relativ schwer, weshalb sie eher für Spezialanwendungen wie U-Boote in Betracht kommen. Soll Wasserstoff auf lange Zeit gespeichert werden, ist dies in Form organischer Hydride möglich. So läßt sich z.B. Toluol reversibel zum benzinähnlichem Methylcyclohexan hydrieren, das mit vorhandener Infrastruktur gelagert und transportiert werden kann. Für mobile Anwendungen ist Methanol als Quelle für Wasserstoff ein aussichtsreicher Kandidat. Es wird durch einen Reformer zu Wasserstoff umgesetzt. Bei diesem Prozeß wird aber unvermeidlich auch CO_2 freigesetzt. Zu einem idealen Wasserstoffspeicher könnten sich zukünftig die bislang nur in kleinen Mengen verfügbaren Kohlenstoff-Nanoröhren (Fullerene) entwickeln.

Wasserstoff kann zur Stromerzeugung mittels Brennstoffzellen in Kraftwerken oder bei mobilen Anwendungen (Autos, Schienenfahrzeuge) genutzt werden. Gerade Fortschritte bei den Niedertemperatur-Brennstoffzellen mit polymerer Protonenaustauschmembran (PEM) ermöglichen in wenigen Jahren die Einführung von mit Methanol betankten Elektroautos. Zur Wärmeerzeugung kann Wasserstoff in Gasheizkesseln oder katalytischen Heizsystemen verwandt werden. Wasserstoff kann auch dem Erdgas zugesetzt werden, bis zu einem Anteil von etwa 16 % auch ohne Anpassung der Verbrauchseinrichtungen. Die kombinierte Nutzung von elektrischer Energie und Wärme ist mit hoher Ausbeute in Blockheizkraftwerken mit Hochtemperatur-Brennstoffzellen oder Gasmotoren möglich. Industriegasturbinen sind mit großen Wasserstoffanteilen betreibbar, die Umstellung auf reinen Wasserstoffbetrieb bereitet derzeit wegen der hohen Verbrennungstemperaturen aber noch Probleme. Die Umrüstung von Luftfahrzeugturbinen ist wegen der hohen Leistungsdichten entsprechend schwieriger.

Obwohl die Komponenten einer umweltfreundlichen Wasserstoffgewinnung und -nutzung existieren, ist eine Wasserstoff-Energiewirtschaft wegen der erheblichen Kosten frühestens in einigen Jahrzehnten zu erwarten. Bis dahin wird gezielt an der Weiterentwicklung und Kostenreduzierung ihrer Schlüsselkomponenten gearbeitet werden müssen. Auch sind noch sicherheitsrelevante Fragen (wie z.B. wasserstoffinduzierte Stahlversprödung, Diffusionsprobleme) zu lösen. Die Möglichkeiten zur dezentralen und netzunabhängigen Energieversorgung, z.B. in abgelegenen Gebieten oder für mobile Anwendungen, können aber bereits in Kürze genutzt werden.

Mai 1999 Ulrik Neupert

Mittel- und Hochenergielaser

Laser sind künstliche Lichtquellen, die kohärente und monochromatische Strahlung, also elektromagnetische Wellen mit fester Phasenbeziehung und Wellenlänge, emittieren. Seit ihrer ersten technischen Realisierung im Jahre 1960 haben sie sich aus komplizierten Laborgeräten zu zuverlässigen Komponenten mit vielfältigen Anwendungen in Technik, Naturwissenschaft und Medizin entwickelt. Je nach Ausgangsleistung unterscheidet man zwischen Nieder-, Mittel- und Hochenergielasern.

Die Grundlage für den technischen Einsatz von Niederenergielasern mit relativ kleinen Ausgangsleistungen (typischerweise < 1 kW mittlere Leistung) ist ihre Nutzbarkeit zur Signalübertragung. Hier sind im zivilen, aber auch im militärischen Bereich bereits vielfältige Anwendungen zur Kommunikation sowie in der Meßtechnik und Sensorik fest etabliert.

Die Anwendungen von Lasern, die im Bereich größerer Leistungen arbeiten (typischerweise > 1 kW mittlere Leistung), beruhen auf der Nutzung der mit dem Lichtstrahl übertragenen Energie, in der Regel also auf der durch die Absorption entstehenden thermischen Wirkung. Ihr Einsatz ist in der industriellen Materialbearbeitung inzwischen weit verbreitet, vor allem zum Schneiden und Bohren. Aber auch zum Schweißen, Löten und zur Oberflächenbehandlung werden sie zunehmend genutzt. Wesentliche Vorteile sind die im Prinzip in der Größenordnung der Wellenlänge liegende Punktgenauigkeit der Energieeinwirkung, die abnutzungsfreie Bearbeitung sowie das Fehlen von Schneid- oder Rückwirkungskräften. Der gravierendste Nachteil ist der hohe Energieaufwand, der aus den relativ geringen Wirkungsgraden der Laser resultiert.

Verschiedene Lasertypen unterscheiden sich im wesentlichen durch das aktive Medium, in dem die Strahlung entsteht. Die gebräuchlichsten Systeme für den Einsatz in der Materialbearbeitung sind CO_2- und Festkörper-Laser sowie in zunehmendem Maße sog. Excimer-Laser, welche die spezifischen Eigenschaften bestimmter Edelgas-Verbindungen nutzen. Unter den derzeit industriell eingesetzten Typen haben die CO_2-Laser den größten Wirkungsgrad (ca. 20%) und die größte mittlere Ausgangsleistung von bis zu einigen 10 kW. Sie können heute zum Schneiden von Baustählen mit einer Dicke von mehr als 25 mm praktisch eingesetzt werden. Der kommerziell am weitesten verbreitete Festkörper-Laser, der Nd:YAG-Laser (mit Neodym dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall), bringt es dagegen nur auf Wirkungsgrade von ca. 5% und mittlere Ausgangsleistungen von einigen kW. Die Leistungen von Excimer-Lasern liegen noch darunter. Während CO_2- und Festkörper-Laser im fernen bzw. im nahen Infrarot emittieren, arbeiten Excimer-Laser im ultravioletten Bereich bei einer relativ geringen Wellenlänge. Sie sind daher besonders zum Einsatz in der Mikrobearbeitung geeignet.

Der wichtigste Zukunftsaspekt im Bereich der lasergestützten Materialbearbeitung ist die zunehmende Einsetzbarkeit von Halbleiter-Lasern, die in der Kommunikationstechnik schon weit verbreitet sind. Heute sind sie bereits mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich realisierbar. Ihre Vorteile sind ein relativ hoher Wirkungsgrad und vor allem die miniaturisierte Bauform.

Im Hinblick auf militärische Anwendungen kann man die (zukünftig) zur Energieübertragung bzw. mit thermischer Wirkung einsetzbaren Laser noch einmal in Mittel- und Hochenergielaser unterscheiden. Hier sind wesentlich höhere Ausgangsleistungen als im zivilen Gebrauch erforderlich, schon allein weil die Energie über größere Strecken übertragen werden muß. Mittelenergielaser (bis zu einige 100 kW mittlere Leistung) sind für die Zerstörung von optischen bzw. elektrooptischen Geräten z.B. in Suchköpfen geeignet. Hier gibt es bereits Prototypen. Hochenergielaser sollen noch einmal höhere Ausgangsleistungen im Megawattbereich haben und zur Zerstörung von (relativ leichten) Strukturen z.B. an Flugkörpern dienen. Auch hier dürften technologische Durchbrüche für eine endgültige Entwicklung nicht mehr nötig sein.

Mittelenergielaser können als aktives Medium sowohl Gase als auch Festkörper nutzen. Festkörper-Laser zeichnen sich durch relativ hohe Leistungsdichten im aktiven Medium aus und können kompakter sein als Gaslaser. Die Entwicklung neuer Lasermaterialien und die Einsetzbarkeit von Halbleiter-Lasern als sog. „Pumplichtquellen" zur Leistungssteigerung lassen für die Zukunft weitere Reduzierungen ihrer Massen und Volumina erwarten. Für Hochenergielaser kommen nur Gase als aktives Medium in Frage. Geeignet sind hier Kohlendioxid, Sauerstoff/Iod, Fluorwasserstoff oder Deuteriumfluorid. Der in letzter Zeit häufig genannte sog. Freie-Elektronen-Laser (FEL) hat zwar den Vorteil der Durchstimmbarkeit der Wellenlänge, scheint aber in erster Linie nicht als Waffenlaser zur Zerstörung von Strukturen, sondern eher für die Schädigung von Sensoren in ihrem jeweils empfindlichen Bereich (In-Band) in Betracht zu kommen.

Bereits in absehbarer Zeit ist mit der militärischen Einsetzbarkeit von Mittel- und auch von Hochenergielasern gegen technische Systeme zu rechnen. Den vielfältigen Vorteilen (verzugsloser Einsatz und schnelle Zielwechsel, Schießen ohne Vorhalt) von Laserwaffen stehen allerdings einige Nachteile gegenüber. Dazu gehören neben den hohen Anforderungen an eine angemessene Energieversorgung vor allem die atmosphärischen Einflüsse bei erdgebundenen Anwendungen (Absorption, Streuung usw.). Teilweise können diese Einflüsse durch adaptive Optiken kompensiert werden. Bei schlechtem Wetter allerdings (starker Nebel oder Regen) versagen alle Laserwaffen. Und selbst unter optimalen Bedingungen wird ein Einsatz von Lasern gegen schwere Panzerungen z.B. von Landfahrzeugen auch langfristig nicht möglich sein.

April 1999 Jürgen Kohlhoff

Brennstoffzellen

Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler, in denen der mit der Oxidation eines Stoffes verbundene Austausch von Elektronen so gesteuert wird, daß die frei werdende Energie nicht in Form von Wärme sondern als Elektrizität auftritt. Bei diesem auch als „kalte" Verbrennung bezeichneten Vorgang handelt es sich im Prinzip um die Umkehrung der Elektrolyse. Als Brennstoff ist vor allem Wasserstoff geeignet, aber je nach Zellentyp sind auch Stoffe wie Methan, Methanol oder Kohlegas möglich.

Wie Batterien sind Brennstoffzellen aus zwei Elektroden mit einem dazwischen liegenden Elektrolyten aufgebaut, nur daß die reagierenden Stoffe hier kontinuierlich zu- bzw. abgeführt werden. Auf der einen Seite einer solchen Zelle gibt der Brennstoff Elektronen ab. Diese fließen durch einen äußeren Stromkreis über einen Verbraucher auf die andere Seite, wo sie sich an den Oxidator (normalerweise Sauerstoff) anlagern. Durch die Abgabe bzw. Aufnahme von Elektronen entstehen Ionen. Im Gegensatz zu den neutralen Ausgangsstoffen können diese je nach Typ in vorbestimmter Weise durch den Elektrolyten wandern, sich verbinden und als Reaktionsprodukt austreten.

Brennstoffzellen haben besonders vielversprechende Eigenschaften. Die direkte Umwandlung von chemischer in elektrische Energie vermeidet den Umweg konventioneller Motor-Generator-Einheiten über Wärme und kinetische Energie und ist außerdem nicht durch den sog. Carnot-Faktor eingeschränkt, der aus thermodynamischen Gründen den Wirkungsgrad aller Wärmekraftmaschinen begrenzt. Selbst unter Berücksichtigung aller verlustbehafteten Nebeneffekte liegen die maximal möglichen Wirkungsgrade für die Erzeugung elektrischer Energie in der Praxis bei 60%. Dagegen erreichen die modernsten heute in der Energiewirtschaft eingesetzten Kombinationen aus Wärmekraftmaschinen und Generatoren noch nicht einmal 40%. Dazu kommen stark verringerte Schadstoff-Emissionen. Aus wehrtechnischer Sicht sind außerdem die geräusch- und vibrationsarme Arbeitsweise und die je nach Typ geringe Wärmesignatur interessant. Günstig ist auch der modulare Aufbau einer Funktionseinheit aus mehreren Einzelzellen und dadurch die einfache Anpaßbarkeit an verschiedene Anforderungsprofile.

Die Anwendungsmöglichkeiten der Brennstoffzellen reichen von kleinen dezentralen Energieversorgungsanlagen z.B. zur mobilen Stromversorgung über den elektrischen Antrieb von Fahrzeugen bis zur großindustriellen Elektrizitätserzeugung in Kraftwerken. Besonders erwähnenswert ist der innerhalb der nächsten Jahre bevorstehende Einsatz als außenluftunabhängige Antriebskomponente des U-Boots der Klasse 212.

Bisher gibt es fünf verschiedene Entwicklungslinien, die sich in Bezug auf die verwendeten Materialien und die Betriebstemperaturen (T) unterscheiden. Die Alkalische Brennstoffzelle (60°C-90°C) mit Kalilauge als Elektrolyt ist bereits als Marktprodukt erhältlich. Sie wird aber auf Dauer nicht über Nischenanwendungen hinauskommen, da sie prinzipbedingt mit reinem Sauerstoff betrieben werden muß und ihre Nutzung damit sehr teuer bleiben wird.

Bessere Zukunftsaussichten werden der Brennstoffzelle mit einer Kunststoff-Folie als Elektrolyt (PEM: Polymer-Electrolyt-Membran oder auch Proton-Exchange-Membrane,

60°C-80°C) eingeräumt. Diese soll in einer weiterentwickelten Form auch mit Luft betrieben werden können und scheint damit für mobile Anwendungen besonders geeignet zu sein. Interessant wäre ihre Kombination mit vorgeschalteten Reformeranlagen, die Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen wie Erdgas oder Methanol aufbereiten. Sie wird bereits prototypisch zum Antrieb von Kraftfahrzeugen eingesetzt. Auch im U-Boot der Klasse 212 wird eine PEM-Zelle verwendet werden, hier allerdings mit reinem Sauerstoff als Oxidator und Wasserstoff als Brennstoff.

Insbesondere für stationäre Kraftwerksanlagen interessant ist die Phosphorsaure Brennstoffzelle (160°C-220°C) mit Phosphorsäure als Elektrolyt, die bereits in vielen Demonstrationsanlagen eingesetzt wird. Sie hat damit einen Entwicklungsvorsprung und mittelfristig bessere Marktchancen als ihre Konkurrenten, die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (650°C) mit geschmolzenem Kalium-/Lithiumkarbonat und die Feststoffoxid-Brennstoffzelle (900°C-1000°C) mit einer Zirkoniumoxid-Keramik als Elektrolyt. Diese Hochtemperaturzellen könnten allerdings besonders günstig in Blockheizkraftwerken mit Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt werden, wodurch der mögliche Gesamtwirkungsgrad bis auf 70% steigt. Außerdem sollen sie beliebige Brenngase ohne Reformeranlage nutzen können. In bestimmten Versionen könnten Feststoffoxid-Brennstoffzellen langfristig auch zur primären Stromversorgung von Überwasserschiffen dienen. Allerdings führen die hier auftretenden enorm hohen Temperaturen zu weitaus größeren Werkstoff- und Dichtungsproblemen als bei Schmelzkarbonat-Zellen.

Im Prinzip ist die Technologie der Brennstoffzelle bereits seit über 150 Jahren bekannt und damit älter als die elektrodynamische Stromerzeugung mit Generatoren. Trotzdem konnten sich unter den elektrochemischen Energiewandlern bis heute lediglich die Batterien durchsetzen, wenn man einmal von wenigen Spezialanwendungen insbesondere in der Raumfahrt absieht. Das liegt vor allem an den hohen Materialbeanspruchungen, die sich in Brennstoffzellen je nach Typ z.B. aus der Korrosivität der verwendeten Medien, den hohen Temperaturen sowie der Notwendigkeit eines offenen Systemdesigns mit Zu- und Ableitungen ergeben. Wenn man die Brennstoffzelle trotzdem als vielversprechende neue Technologie bezeichnen kann, dann liegt das im wesentlichen an den inzwischen erreichten Fortschritten im Werkstoffbereich sowie an deutlich gestiegenen ökologischen Anforderungen, welche ihre technische und wirtschaftliche Einsetzbarkeit heute wieder realistisch erscheinen lassen.

Oktober 1997 Jürgen Kohlhoff

Werkstoffe der Energietechnik

Hochentwickelte Werkstoffe bilden eine wesentliche Basis der modernen Energietechnik. Das Anwendungsspektrum reicht hierbei von der Gewinnung, Weiterverarbeitung und Aufbereitung von Energieträgern über die Umwandlung von Energie in andere Formen bis zu ihrer Verteilung und wirksamen Nutzung. Generell gilt, daß der Weg der Energie von der Primärquelle bis zur Nutzung immer komplizierter wird und alle beteiligten Prozeßschritte wesentlich von neuen Werkstoffentwicklungen abhängen. Die spezifischen Anforderungen ergeben sich dabei jeweils aus den Bedingungen, unter denen die Energiesysteme arbeiten müssen, wie z.B. mechanische Spannung, Temperatur, Druck und chemische Umgebung.

Ein wichtiger Aspekt der neuen Werkstoffe ist ihr Potential zur Steigerung des Wirkungsgrades der Energienutzung. Dieser Wirkungsgrad beträgt gemittelt über die gesamte Energiewirtschaft gegenwärtig ca. 10 Prozent. Daher steckt hier ein gewaltiges Einsparpotential.

Im Bereich der elektrischen Energieübertragung läßt sich z.B. durch supraleitende Kabel eine Verringerung der Übertragungsverluste erreichen. Ein eher indirekter Beitrag zur Energieeinsparung durch neue Werkstoffe ergibt sich aus der Verwendung von Leichtbaustoffen für Fahrzeuge aller Art. Nach dem Flugzeugbau wird aufgrund des Mengenumsatzes insbesondere die Verwendung von Leichtmetallen und Kunststoffen im Fahrzeugbau eine zunehmende Bedeutung erlangen. Darüber hinaus ermöglichen neue Dämmaterialien wie Aerogele oder Schaumwerkstoffe Verbesserungen der thermischen Isolierfähigkeit.

Für die auf der Verbrennung von fossilen Brennstoffen basierenden Energiewandlern sind in erster Linie die strukturellen Werkstoffeigenschaften von Interesse. So verlangt die Verbesserung des Wirkungsgrades in thermodynamischen Energiewandlungsprozessen in der Regel eine Erhöhung der Betriebstemperatur. Hier nimmt die Gasturbine insbesondere im Hinblick auf die werkstoffseitigen Anforderungen eine technologische Vorreiterrolle ein, wobei außer der Hochtemperaturfestigkeit noch eine Reihe weiterer Eigenschaften wie hohe mechanische Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Lebensdauer gefordert sind. Relativ kurzfristige Verbesserungen verspricht die Weiterentwicklung der heute eingesetzten Superlegierungen auf Nickelbasis. Hierzu zählen Maßnahmen wie gerichtete bzw. einkristalline Erstarrung oder die Oxiddispersionsverstärkung. Auch an der keramischen Beschichtung von besonders belasteten Bauteilen (z.B. Turbinenschaufeln) wird intensiv gearbeitet. Weitere entscheidende Temperatur- bzw. Wirkungsgradsteigerungen durch Verwendung massiver Bauteile aus neuen Werkstoffen wie Intermetallischen Phasen, Strukturkeramiken oder kohlenstoffaserverstärktem Kohlenstoff dürften erst mittel- bis langfristig realisiert werden.

Eine direkte Folge der Bestrebungen zur Energieeinsparung durch Erhöhung der Betriebstemperatur und duch Gewichtseinsparung sind die neuesten werkstofforientierten Entwicklungen bei den Antrieben, wie die Verwendung von Bauteilen aus Verbundwerkstoffen oder Keramiken für Flugzeugtriebwerke und Fahrzeugmotoren. So gibt es bereits

Prototypen von Automotoren, deren Ventile aus Siliziumnitrid bestehen. Generell verlangen die außerordentliche Komponentenvielfalt sowie die unterschiedlichen Anforderungen und Beanspruchungen im Motorenbau jedoch den Einsatz eines sehr breiten Werkstoffspektrums. Durch Anwendung moderner Herstellungstechnologien, Oberflächenbehandlungen und optimaler konstruktiver Gestaltung bieten hier nach wie vor die metallischen Werkstoffe ein beträchtliches Leistungspotential.

In letzter Zeit rücken immer mehr die Energiewandlungsprinzipien der Photovoltaik und der Brennstoffzellen in den Vordergrund des Interesses, für die aus Werkstoffsicht in erster Linie die funktionellen Eigenschaften gefragt sind. Im Bereich der Photovoltaik ist derzeit der Halbleiter Silizium sowohl in einkristalliner als auch polykristalliner Form das dominierende Material. Von den theoretisch möglichen Wirkungsgraden nahe 30% ist man noch weit entfernt. Aus physikalischer Sicht kommen zwar auch noch andere Halbleiter, wie z.B. Galliumarsenid oder Cadmiumtellurid, zur Licht-Strom-Wandlung in Betracht. Diese sind aber entweder zu teuer oder umweltproblematisch.

Bei der Brennstoffzelle handelt es sich im Prinzip um die sog. kalte Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser, wobei elektrische Energie frei wird. Für diese elektrochemische Umkehrreaktion der Elektrolyse werden Elektrolytmaterialien mit speziellen Eigenschaften benötigt. So sorgt z.B. ein keramischer Ionenleiter (mit Yttrium stabilisiertes Zirkondioxid) in Hochtemperatur-Brennstoffzellen für den Ionentransport und ermöglicht das Schließen des Stromkreises im Inneren der Zelle. Zumindestens langfristig wird der Brennstoffzellentechnik ein enormes Marktpotential eingeräumt, da sie insbesondere in mobilen Anwendungen eine umweltfreundliche Alternative zur direkten Verbrennung von Kohlenwasserstoffen bietet.

August 1996 Thomas Kretschmer

Wissen & Information



ssen & Information

Wissen & Information

Wissen & Information

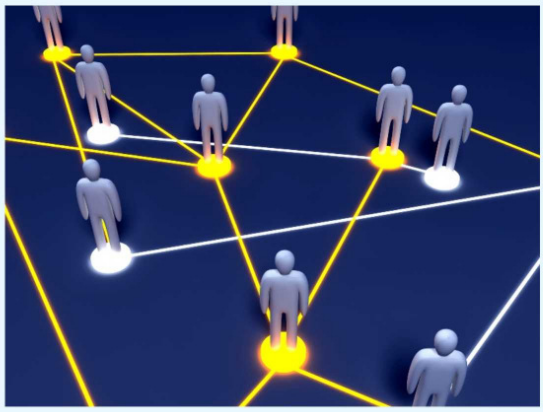
Wissen & Information

Wissen & Informati



Wissen & Information

Informationsverarbeitung: Grundlagen und Konzepte



Cloud Computing Autonomic Computing	2009	
Schwarmintelligenz	2008	
	2007	
	2006	
	2005	
Neuroinformatik	2004	
Information Retrieval	2003	Digitale Sprachverarbeitung
Fuzzy-Logik	2002	
	2001	Selbstorganisierende Systeme
Soft Computing	2000	Kryptologie
Metacomputer	1999	Quantencomputer
Neuronale Netze	1998	
	1997	
	1996	

Cloud Computing

In jüngster Zeit erlangt ein unter der Bezeichnung „Cloud Computing“ verbreitetes neues Konzept der Informationstechnik (IT) zunehmende Bedeutung. Dabei handelt es sich um die Bereitstellung von IT-Ressourcen (z.B. Rechenleistung) durch entsprechende Dienstleister, auf die externe Kunden im Internet zugreifen können. Die betreffenden Ressourcen sind gewissermaßen im Internet angesiedelt, typischerweise in Gestalt von sehr großen Rechenzentren. Der Zugriff kann von beliebigen Orten aus, zu jeder Zeit und auf der Basis verschiedener internetfähiger Endgeräte (z.B. herkömmliche Computer, Personal Digital Assistants (PDAs) oder Handys) erfolgen.

Der Begriff Cloud Computing resultiert daraus, dass in schematischen Darstellungen das Internet häufig in Gestalt einer Wolke (engl. Cloud) visualisiert wird. In gewisser Weise stellt das Prinzip des Cloud Computing eine Weiterentwicklung von einigen schon seit längerem bekannten Konzepten dar. So besteht z.B. die Zielsetzung des verwandten Grid Computing darin, einen ähnlich einfachen Zugriff auf IT-Ressourcen in einem Netzwerk zu gestatten, wie dies bei der Stromversorgung auf der Grundlage des Stromnetzes (engl. Power Grid) der Fall ist. Beide Konzepte besitzen deswegen einige gemeinsame technische Herausforderungen.

Für den Nutzer weist der Ansatz des Cloud Computing eine Reihe von Vorteilen auf. So erfolgt beispielsweise ähnlich wie bei einem Stromversorgungsunternehmen die Bezahlung der in Anspruch genommenen IT-Dienstleistung (z.B. der Rechenleistung) auf der Basis des tatsächlichen Verbrauchs. Darüber hinaus muss die erforderliche IT-Infrastruktur nicht erst durch den Kunden mühsam aufgebaut und anschließend verwaltet werden. Weiterhin muss er über die genauen Details der jeweiligen Realisierung der Infrastruktur beim Dienstleister nicht informiert sein. Dadurch können sich Unternehmen auf ihre Kernkompetenzen anstatt auf den Betrieb einer IT-Lösung konzentrieren, was insbesondere für kleinere Firmen einen erheblichen Vorteil bedeutet. Außerdem lassen sich neue IT-Projekte auf diese Weise schneller und einfacher verwirklichen.

Weiterhin ermöglicht das Cloud Computing eine schnelle und flexible Reaktion auf eine veränderte Nachfrage nach Ressourcen. Wird z.B. kurzfristig von einem Nutzer mehr Rechenleistung benötigt, so kann der Dienstleister ihm entsprechend mehr der hierfür benötigten Ressourcen zur Verfügung stellen. Bei der traditionellen Vorgehensweise ist es hingegen zur Abfederung derartiger Lastspitzen notwendig, das zu diesem Zweck genutzte Rechenzentrum größer auszulegen, als es eigentlich für die Abwicklung der durchschnittlich anfallenden Geschäftsprozesse erforderlich ist.

Mit Hilfe des Cloud Computing lassen sich verschiedene IT-Dienstleistungen auf unterschiedlichen technischen Ebenen zur Verfügung stellen. Eine Möglichkeit besteht z.B. darin, Hardware als eine Form von Dienstleistung anzubieten (Hardware as a Service). Hierzu zählt u.a. die Bereitstellung der Rechenleistung von Mikroprozessoren oder auch von Speicherplatz. Zurzeit bereits realisierte kommerzielle Beispiele für diese Varianten des Cloud Computing stellen die Dienstleistungsangebote „Elastic Compute Cloud“ und „Simple Storage Service“ der Firma Amazon dar. Auch Software kann als Dienstleistung

angeboten werden (Software as a Service). In diesem Bereich existieren u.a. bereits Dienste, die einen einheitlichen Zugriff auf Daten gewährleisten, welche auf unterschiedlichen Geräten gespeichert sind, wie z.B. „Live Mesh" der Firma Microsoft. Darüber hinaus gibt es auch Kombinationen bzw. Varianten der oben genannten Cloud-Dienstleistungen im Hardware- und Softwarebereich. Hierzu zählt z.B. die Bereitstellung einer geeigneten Plattform zur Entwicklung einer Softwareanwendung und der anschließende Betrieb auf dieser Plattform (Platform as a Service). Ein Beispiel für diese Variante ist die „App Engine" der Firma Google.

Generell gibt es eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten für das Cloud Computing. Ein Einsatzfeld existiert z.B. im Bereich der Automatisierung von Geschäftsprozessen, dem so genannten E-Business. Auf diese Weise kann u.a. auf saisonbedingte oder konjunkturabhängige Geschäftsentwicklungen flexibel reagiert werden. Ebenso kann die Erzeugung virtueller Welten, wie sie z.B. in einigen Internet-basierten Computerspielen auftreten, aufgrund ihres umfangreichen Bedarfs an Rechen- und Speicherkapazität von der Nutzung des Cloud Computing profitieren. Andere Anwendungsgebiete, die einen ähnlich hohen Leistungsbedarf aufweisen, beinhalten z.B. die Auswertung sehr großer Datenmengen, umfangreiche Videoübertragungen im Internet oder auch Sprachübersetzungen in Echtzeit.

Bei den aktuellen Technologien im Bereich des Cloud Computing handelt es sich üblicherweise um herstellerspezifische Lösungen. Daher gibt es derzeit Überlegungen, durch Einführung geeigneter Standardisierungen zukünftig eine mögliche Zusammenarbeit zwischen den unterschiedlichen Systemen zu gewährleisten. Darüber hinaus beschäftigen sich aktuelle Arbeiten auf diesem Gebiet mit Fragestellungen der Datensicherheit und des Datenschutzes.

Die Verbreitung des Cloud Computing wird durch eine Reihe von allgemeinen Entwicklungen im Bereich der Informationstechnik begünstigt. So wird z.B. durch immer leistungsfähigere Netzwerktechnologien sowohl im drahtlosen als auch im leitungsgebundenen Bereich ein immer schnellerer Zugriff auf IT-Ressourcen im Internet ermöglicht. Außerdem nimmt auch bei Mikroprozessoren die Leistungsfähigkeit kontinuierlich zu. Dies wird u.a. durch eine steigende Anzahl der so genannten Prozessorkerne, d.h. Komponenten zur unabhängigen Ausführung von unterschiedlichen Instruktionen, erreicht. Dadurch erhöht sich zugleich auch die Flexibilität, mit der beim Cloud Computing auf dynamisch veränderliche Ressourcenanforderungen reagiert werden kann.

Dezember 2008 Klaus Ruhlig

Autonomic Computing

Die zunehmende Miniaturisierung bei Integrierten Schaltungen hat mittlerweile immer komplexere Computersysteme hervorgebracht. Eine zusätzliche Erhöhung der Systemkomplexität entsteht aufgrund der verstärkten Vernetzung einzelner Computer untereinander, insbesondere auf der Basis des Internets. Dieser Trend wird sich voraussichtlich auch in Zukunft fortsetzen. Da sich die Beherrschung der Komplexität von Systemen im Bereich der Informationstechnologie für den Menschen jedoch zunehmend schwieriger gestaltet, sind zukünftig neue Ansätze bei deren Konzeption notwendig. Einen derartigen Ansatz stellt die Vision des so genannten Autonomic (autonomen) Computing dar.

Dieses Konzept strebt zur Lösung des Komplexitätsproblems einen höheren Grad von Autonomie in Form von sich teilweise selbstorganisierenden Computersystemen an. Diese sollen in der Lage sein, sich selbstständig den augenblicklichen Einsatzbedingungen anzupassen. Derartige Systeme sollen die Eigenschaften besitzen, sich selbst zu konfigurieren, zu optimieren, zu „heilen" und zu schützen. Als Vorbild für diese Technologie dient dabei das autonome Nervensystem von Lebewesen, das unbewusste Körperfunktionen kontrolliert, wie z.B. Atmung oder Herzschlag.

Die Fähigkeit zur Selbstkonfiguration bedeutet, dass das Computersystem aus übergeordneten, z.B. aus Geschäftsprozessen abgeleiteten, Anforderungen selbstständig die hierfür notwendigen technischen Veränderungen und Einstellungen erkennen und umsetzen kann. Weiterhin sollen sich neu hinzuzufügende Komponenten nahtlos in ein bestehendes System integrieren, wobei sich das Gesamtsystem dann den neuen Gegebenheiten entsprechend anpasst. Die Eigenschaft der Selbstoptimierung soll dazu führen, dass Computersysteme selbstständig nach Möglichkeiten suchen, ihre Leistungsfähigkeit zu verbessern. Eine derartige Optimierung kann u.a. dadurch erfolgen, dass mit veränderten Einstellungen der Systemparameter experimentiert wird, z.B. hinsichtlich der Verwaltung von Speicher- oder Prozessorressourcen. Aus den hierbei gemachten Erfahrungen kann dann eine verbesserte Konfiguration gelernt und anschließend realisiert werden.

Im Rahmen der Selbstheilung sollen gewisse Hard- und Softwareprobleme automatisch erkannt, analysiert und behoben werden. Bei einem Softwarefehler kann zur Fehlerbehebung z.B. anhand der Problemdiagnose nach einem geeigneten Software-Update gesucht und dieses dann installiert werden. Anschließend überprüft das System dann, ob der Fehler hierdurch tatsächlich behoben werden konnte. Die Fähigkeit des Selbstschutzes soll es einem Computersystem schließlich erlauben, sich gegen böswillige Angriffe, z.B. durch Computerviren, und gegen umfangreichere Fehlfunktionen zu schützen, die durch die Selbstheilungsmaßnahmen nicht behoben werden können. Dabei sollen Frühwarnmaßnahmen genutzt werden, die systemweite Fehlfunktionen bereits im Vorfeld vorhersehen und dadurch verhindern sollen.

Der Einsatz des Autonomic Computing erlaubt eine Reihe von Verbesserungen im Bereich der Informationstechnologie, z.B. bezüglich der Stabilität und des Wartungsaufwands von Computersystemen. Eine denkbare Anwendung stellt dabei z.B. das so

genannte Grid (Netz) Computing dar. Dieses Konzept erlaubt eine vereinfachte und verbesserte Ausnutzung der Ressourcen von miteinander vernetzten Computern, indem es diese für Benutzer oder Softwareanwendungen wie ein einziges großes System erscheinen lässt. Die Fähigkeit zur Selbstoptimierung kann sich hier z.B. dadurch zeigen, dass automatisch die für eine bestimmte Aufgabenstellung geeignetsten Systeme aus den augenblicklich verfügbaren Computern ausgewählt werden.

Ein weiteres mögliches Einsatzgebiet liegt im Bereich des so genannten Ubiquitous (allgegenwärtigen) Computing. Hiermit wird die zunehmende Integration von Informationstechnologie in das tägliche Leben in Gestalt von unterschiedlichen, miteinander vernetzten Geräten bezeichnet, wie z.B. Mobiltelefonen oder in die Umgebung verteilten intelligenten Sensoren. Aufgrund der Heterogenität der einzelnen Geräte kann hier z.B. die Fähigkeit zur Selbstkonfiguration des Autonomic Computing von erheblichem Nutzen sein. Darüber hinaus stellt die Reduzierung des Stromverbrauchs in Rechenzentren eine interessante Anwendung dar. Hier könnte die Eigenschaft der Selbstoptimierung nicht nur zur Verbesserung der Rechenleistung, sondern auch zur Verringerung des Stromverbrauchs eingesetzt werden.

Die geforderten Fähigkeiten des Autonomic Computing zeigen, dass bis zu einer vollständigen Realisierung dieser Vision noch erhebliche Forschungsanstrengungen erforderlich sind. Allerdings sind weniger anspruchsvolle Implementierungen schon früher zu erwarten, wie z.B. Systeme mit einem geringeren Autonomiegrad. Aktuelle Forschungen auf dem Gebiet des Autonomic Computing beschäftigen sich u.a. mit einem besseren Verständnis der grundlegenden Prinzipien von sich selbstorganisierenden Systemen. Außerdem erfordert die Fähigkeit, sich an kontinuierlich verändernde Einsatzbedingungen anpassen zu können, eine gewisse Lernfähigkeit des betreffenden Computersystems. Zur Zeit werden daher in dieser Hinsicht geeignete Methoden aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz erforscht. Diese Anpassungsfähigkeit bedeutet darüber hinaus, dass sich das System hinsichtlich der Hard- und Software selbstständig an die wechselnden Anforderungen einstellen können muss. Als Basis hierfür sind u.a. Hardware-Architekturen erforderlich, deren Konfiguration im laufenden Betrieb verändert werden kann. Hinsichtlich der Selbstheilungseigenschaft kann dies z.B. dazu genutzt werden, Komponenten, die zuvor als fehlerhaft erkannt wurden, durch eine Rekonfiguration der Hardware vom Gebrauch auszuschließen und ihre Funktion anschließend auf andere Systemkomponenten zu übertragen. Erste Ansätze in dieser Richtung sind teilweise bereits kommerziell verfügbar.

August 2008 Klaus Ruhlig

Schwarmintelligenz

Der Begriff Schwarmintelligenz beschreibt ein neuartiges Problemlösungskonzept aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz. Im Prinzip handelt es sich um einen bionischen Ansatz, d.h. er basiert auf der Erfahrung, dass die Natur für zahlreiche Problemstellungen bereits weitgehend optimale Lösungen oder Lösungsverfahren hervorgebracht hat. Im Falle der Schwarmintelligenz bezieht man sich auf die Beobachtung, dass Schwärme, Kolonien oder Staaten von (sozialen) Tieren zu Verhaltensweisen fähig sind, die als intelligent bezeichnet werden können. Dabei entsteht häufig der Eindruck, als agiere der Schwarm als Ganzes intelligent, gleichsam wie ein Superorganismus. Typische Beispiele für solches Verhalten sind Kolonien von Ameisen und Termiten bei der Bewältigung alltäglicher Aufgaben, wie Nestbau, Futtersuche und Futtertransport, aber auch Fisch- und Vogelschwärme bei der Abwehr von Fressfeinden. Die Schwarmintelligenz hat große Ähnlichkeit zur so genannten Kollektiven Intelligenz, die sich jedoch vorwiegend auf soziale, menschliche Systeme bezieht.

Auch wenn einige Details der Funktionsweise noch unklar sind, so lassen sich doch die notwendigen Bausteine und Grundprinzipien identifizieren, damit ein natürliches System Schwarmintelligenz ausbilden kann. Zunächst bedarf es einer großen Anzahl von agierenden Individuen als Mitglieder des Schwarms. Wichtig ist ferner, dass keine zentrale Instanz existiert, die für die Kontrolle des Schwarms in seiner Ganzheit verantwortlich ist. Stattdessen handelt es sich um ein dezentral organisiertes System autonomer Einheiten mit relativ einfachen Verhaltensweisen, die sich meist darauf beschränken, dass einem bestimmten Reiz jeweils eine spezifische Antwort zugeordnet ist.

Ein solches System kann auf globaler Ebene mittels des bekannten Phänomens der Selbstorganisation ein kollektives und intelligentes Verhalten ausbilden, welches nicht explizit auf der Ebene der Individuen vorhanden ist (Emergenz). Hierfür müssen die Mitglieder des Schwarms über ein begrenztes Repertoire an Fähigkeiten zur Wahrnehmung der lokalen Umgebung und zur Kommunikation mit ihren Artgenossen verfügen. Dabei kann es sich einerseits um eine direkte, allerdings nicht weitreichende, Kommunikation handeln, wie sie z.B. bei Honigbienen beobachtet wird. Eine andere wichtige Kommunikationsform basiert auf einer lokalen Veränderung der Umwelt durch die Individuen des Systems. Ein typisches Beispiel hierfür ist die Kommunikation zwischen Ameisen über Botenstoffe, um den Weg zu einer Futterquelle zu markieren. Solche Wechselwirkungen der Mitglieder des Schwarms untereinander sind in der Lage, Schwankungen, die sich auf Grund des zufälligen oder individuellen Verhaltens des Einzelnen ergeben, zu verstärken. Diese so genannten positiven Rückkopplungen stellen einen wesentlichen Bestandteil selbstorganisierter Systeme dar. Gleichzeitig treten aber auch negative Rückkopplungen auf, die den positiven entgegenwirken und das Gesamtsystem stabilisieren.

Können Ameisen beispielsweise auf zwei unterschiedlich langen Wegen, die sie mit Duftstoffen markieren, zur Futterquelle gelangen, so findet wegen des Zusammenspiels von positiver und negativer Rückkopplung eine Auswahl des kürzesten Weges statt. Anfangs werden beide Wege benutzt und markiert. Weil aber der kürzere Weg schneller zurückgelegt werden kann, ist dort die Duftspur etwas stärker und somit attraktiver. Die posi-

tive Rückkopplung sorgt dafür, dass dieser Unterschied durch die häufige Nutzung noch größer wird. Wegen der negativen Rückkopplung (u.a. durch Verdampfung der Duftstoffe) wird der längere Weg schließlich gar nicht mehr benutzt und alle Ameisen gelangen auf kürzestem Weg zur Futterquelle.

Das erläuterte Grundkonzept lässt sich in verschiedenen Bereichen anwenden. Es wird z.B. für Computeralgorithmen benutzt, die komplexe Fragestellungen insbesondere aus dem Bereich der Optimierung lösen sollen. Ein bekannter Anwendungsfall ist das so genannte Traveling Salesman Problem. Hierbei geht es darum, den kürzesten Weg zwischen einer vorgegebenen Anzahl von Städten zu finden, so dass jede Stadt nur einmal besucht wird. Es hat große Ähnlichkeit zum oben skizzierten Beispiel der Futtersuche von Ameisen und kann erfolgreich mittels Algorithmen gelöst werden, die eben dieses Verhalten imitieren. Auf diese Weise lassen sich auch konkrete praktische Probleme lösen, wie z.B. die Berechnung der optimalen Lastverteilung von Internet-Servern.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit liegt im Bereich der Robotik. Hier gibt es Versuche, eine größere Anzahl von einfachen und eigenständig handelnden Robotern miteinander agieren zu lassen. Gemäß den erläuterten Grundprinzipien für Schwarmintelligenz verfügen diese Roboter über Sensoren zur Wahrnehmung der Umwelt und über eine einfache Möglichkeit, miteinander zu kommunizieren. Erste Experimente zeigen, dass sich in solchen Systemen ein kooperatives Verhalten ausbilden kann. Dieses lässt sich derzeit bereits zur gezielten Lösung einfacher Problemstellungen, wie das Bewegen von Körpern oder das kooperative Überwinden von Hindernissen nutzen.

Die erörterten Beispiele aus dem Bereich der Robotik sind jedoch bislang nicht über die Stufe des Machbarkeitsbeweises hinausgekommen. Eines der wesentlichen Probleme liegt hier derzeit noch darin, intelligentes Verhalten nicht bereits von vornherein über einen Zentralrechner in das System zu implementieren und ohne die Kommunikation mit diesem auszukommen. Die fortschreitende Miniaturisierung von Robotern, Kommunikationstechnik und Sensoren eröffnet für die Zukunft jedoch vielseitige Anwendungsmöglichkeiten für Schwarmintelligenz. Denkbar wäre der Einsatz in den Bereichen (Fern-) Erkundung, Überwachung oder Rettung. Für den Bereich der militärischen Aufklärung dürfte zukünftig insbesondere der Einsatz von Schwärmen miniaturisierter fliegender unbemannter Sensorsysteme interessant werden.

Februar 2008 Marcus John

Neuroinformatik

Die Neuroinformatik ist ein interdisziplinäres Forschungsgebiet im Grenzbereich von Informatik, Biologie, Mathematik, Physik und Kognitionswissenschaften. Sie befasst sich mit der Modellierung und Nutzung von Bau- und Funktionsprinzipien der biologischen Informationsverarbeitung in Nervenzellen mit dem Ziel der Konstruktion technischer informationsverarbeitender Systeme. Im Zentrum des Interesses steht dabei die Frage, wie einzelne einfache biologische Elemente komplexe Systeme bilden, die Informationen aufnehmen und verarbeiten können. Im Prinzip ist der Begriff Neuroinformatik (auch Konnektionismus) auf den deutschsprachigen Raum begrenzt. Im Englischen wird dieses Gebiet als „Neurocomputation" bzw. „Computational Neuroscience" bezeichnet.

Als empirische Wissenschaft will die Neuroinformatik biologische Informationsverarbeitungsprozesse im Kontext des Verhaltens von Organismen in ihrer Umwelt untersuchen und modellieren. Hierbei ist ein wesentlicher Grundansatz die Tatsache, dass jedes biologische System als Ganzes dem Selektionsdruck der Evolution unterliegt. Daher führt die Optimierung des informationsverarbeitenden Apparates im Laufe des Evolutionsprozesses zu einer gegenseitigen Anpassung von Sinnesorganen, Gehirnen und Verhaltensweisen der in einem gemeinsamen ökologischen System zusammenlebenden Arten. Beispielsweise besitzen zwar die Nervensysteme von Mensch und Tier Gesamtarchitekturen unterschiedlicher Komplexität. Diese sind jedoch alle aus prinzipiell gleich aufgebauten Funktionselementen gebildet, die als Neuronen bezeichnet werden.

Jedes einzelne Neuron dient der Informationsübertragung, indem es als Empfängerelement Signale von anderen Neuronen aufnimmt, diese in elektrische Aktivität umwandelt, an einen anderen Ort weiterleitet und dort als Senderelement an andere Neuronen weitergibt. Diese Signalübertragung findet an besonders spezialisierten Kontaktstellen, den Synapsen statt. Die Schaltzeiten von Neuronen liegen im Millisekundenbereich. Im Vergleich zu Transistoren sind Nervenzellen somit recht langsam arbeitende Bauelemente. Zudem ist ihr Befehlsvorrat gegenüber dem von Mikroprozessoren sehr gering. Es werden lediglich einlaufende Impulse von anderen Neuronen zu jedem Zeitpunkt summiert und selbst Impulse einer bestimmten Größe gesendet, wenn diese Summe einen Schwellenwert überschreitet. Dennoch ist es in einem Netzwerk vieler geeignet miteinander verbundener Neuronen möglich, hochkomplexe Impulsmuster hervorzubringen.

Ein weiterer großer Unterschied zwischen technischer und neuronaler Informationsverarbeitung besteht in der Abbildbarkeit der Aufgaben biologischer Systeme auf ihre Strukturen, welche in technischen informationsverarbeitenden Systemen im allgemeinen nicht gegeben ist. Die biologische Informationsverarbeitung kann deshalb als isomorph bezeichnet werden, d.h. die Daten sind innerhalb des Systems entsprechend ihrem äußeren Zusammenhang angeordnet. Im Gegensatz dazu besteht bei digitalen Computern hinsichtlich der internen Datenrepräsentation in Speicheradressen üblicherweise nur ein indirekter Bezug zur ursprünglichen Datenanordnung. Eine wichtige Grundlage für die isomorphe Implementierung der Informationsverarbeitung biologischer Systeme liegt in der Parallelität der Berechnungen. So werden z.B. zwei- oder drei-dimensionale Strukturen in biologischen Systemen nicht sequentiell abgetastet und "Pixel für Pixel" berech-

net, abgespeichert und erst dann nach vorgeschriebenen Regeln miteinander in Beziehung gesetzt, wie dies bei technischen Systemen in der Regel der Fall ist, sondern soweit wie möglich gleichzeitig aufgenommen und parallel verrechnet.

In den letzten Jahren hat sich die Neuroinformatik durch erfolgreiche Anwendungen in vielen Gebieten auch in der Praxis etabliert. Im Vordergrund steht dabei die Entwicklung von lernfähigen Systemen, die in definierten Bereichen autonom zu agieren vermögen und eine Architektur aufweisen, welche für steigende Komplexität offen ist. Die für praktische Nutzungen wichtigsten Modellbildungen (Methoden) der Neuroinformatik sind die so genannten Künstlichen Neuronalen Netze (KNN). Dabei werden in Anlehnung an die Nervenzellen des Gehirns einfache uniforme Verarbeitungselemente zu einem Netzwerk geeigneter Topologie verbunden. In der Regel bestehen diese Netzwerke aus mehreren Schichten von Elementen (Ein- und Ausgabeschicht sowie eine oder mehrere verborgene Schichten). Sie werden meist als Softwaresimulatoren realisiert, können aber auch in spezialisierter Hardware ausgeführt werden.

Die wichtigsten Anwendungen für Künstliche Neuronale Netze bilden Probleme, die zur Lösung eine nichtlineare Modellbildung voraussetzen. Leistungsfähige auf solchen Netzen basierende Lösungsansätze gibt es für eine Reihe von Klassifikations- und Optimierungsproblemen. Darüber hinaus zielt eine Vielzahl der heutigen Entwürfe Neuronaler Netze auf die Lösung konkreter technischer Fragestellungen ab. Zu nennen sind hier in erster Linie die Mustererkennung, deren Anwendungsspektrum sich von der Satellitenaufklärung bis zur Labordiagniostik erstreckt, sowie die adaptive Steuerung und Regelung technischer Systeme, z.B. im Roboterbereich. Anwendung finden KNN zudem bei verschiedenen komplexen Prognoseproblemen, z.B. der Vorhersage wirtschaftlicher Entwicklungen. Generell gilt, dass KNN nicht als universelle Rechner angesehen werden können. Somit gibt es auch nur für bestimmte Informationsverarbeitungsprobleme gute „neuronale" Implementierungen. Ein Beispiel hierfür sind Aufgaben vom Typ der bereits erwähnten Mustererkennung, bei deren Lösung sich Neuronale Netze als besonders effektiv erwiesen haben.

Entwicklungswerkzeuge zur Herstellung von KNN gibt es heute für die meisten Computer. Erhältlich sind sowohl Produkte, die einfache Erweiterungen populärer Datenbanken oder Tabellenkalkulationsprogramme darstellen, als auch speziell auf bestimmte Betriebssysteme oder Rechnerarchitekturen zugeschnittene Software. Das problemspezifische Training eines solchen Netzwerks erfolgt anhand von Beispielen des „richtigen" Verhaltens, ohne dass detaillliertes regelartiges Wissen über die Natur der Aufgabe notwendig ist.

Februar 2004 Roman Kernchen

Information Retrieval

Ein wesentliches Merkmal der heutigen Gesellschaft ist die wachsende Informationsflut, welcher der moderne Mensch in allen Lebensbereichen ausgesetzt ist. Diese Entwicklung hat sich in den letzten Jahren durch die breite Nutzung des Internet noch wesentlich verstärkt. Daher wird es immer wichtiger, über geeignete Möglichkeiten zur Suche und Rückgewinnung von Informationen zu verfügen. Ziel der hierfür erforderlichen Methoden und Techniken, die heute unter dem Oberbegriff Information Retrieval zusammengefasst werden, ist das Auffinden von Dokumenten, wie z.B. Textdokumenten oder Multimediadateien, anhand von Suchkriterien aus einer großen Anzahl von Quellen. In letzter Zeit hat sich dieser Bereich durch die Verwendung von Verfahren aus der Künstlichen Intelligenz (KI) dahingehend weiterentwickelt, dass auch die Bearbeitung von vagen Suchanfragen und unsicherem Wissen ermöglicht wird.

Für die zu verwaltenden Dokumente verwendet ein Retrieval-System eine spezielle Darstellungsform, den so genannten Index. Für ein Textdokument kann als Index z.B. der gesamte Text oder auch nur eine Liste von für diesen Text besonders charakteristischen Begriffen dienen. Durch Methoden der Computerlinguistik, einem KI-Teilbereich, kann man diese Begriffe zusätzlich noch auf ihre grammatikalische Grundform zurückführen, so dass z.B. Wörter wie „Haus“ und „Häuser“ im Index als gleich angesehen werden. Die Verwendung von so genannten Thesauren leistet dasselbe hinsichtlich der Bedeutung von Wörtern, indem Begriffe zu Synonymmengen zusammengefasst werden.

Die klassischen Suchmethoden von Retrieval-Systemen sind die Boolesche Suche und die Gewichtungsverfahren. Die Boolesche Suche liefert als Ergebnis eines Suchvorgangs nur die Dokumente, die eine in der Suchanfrage vom Benutzer formulierte Bedingung erfüllen, wie z.B. das Auftreten einer bestimmten Zeichenkette in einem Textdokument. Gewichtungsverfahren ermöglichen es, Einträge aus dem Index entsprechend ihrer Aussagekraft für das jeweilige Dokument unterschiedlich zu gewichten. Ferner kann man Dokumente auch als Ganzes gewichten. So wird z.B. bei der Suchmaschine „Google“ die Bedeutung von Dokumenten danach eingestuft, wie viele Internet-Verweise auf dieses Dokument existieren.

Zur Verarbeitung von vagen Anfragen und unsicherem Wissen verwenden neuere Ansätze bei Retrieval-Systemen z.B. die so genannte Fuzzy-Logik, die im Unterschied zur klassischen binären Logik auch unscharfe Zustandsbeschreibungen zulässt. Ein weiterer moderner Ansatz ist die Verwendung von Methoden aus dem Data Mining, die sich mit dem Aufspüren von Korrelationen und Regelmäßigkeiten zwischen Datensätzen und Dokumenten befassen. So können z.B. gefundene statistische Abhängigkeiten zwischen Wörtern in Retrieval-Systemen dazu benutzt werden, einem Index oder einer Anfrage weitere Wörter automatisch hinzuzufügen, die üblicherweise zur Charakterisierung eines Begriffs oder Konzepts verwendet werden, im Dokument oder der Anfrage jedoch fehlen.

Eine klassische Anwendung für Retrieval-Systeme sind Literatur-Datenbanken in Bibliotheken. Diese bieten dem Benutzer die Möglichkeit einer Literaturrecherche, indem sie

Angaben über Artikel und Bücher, nicht aber die Artikel und Bücher selbst verwalten. Hierbei wird der Index derzeit hauptsächlich noch durch menschliche Experten erstellt. An Verfahren zur automatischen Indexierung wird jedoch intensiv geforscht.

Das heute wahrscheinlich wichtigste Anwendungfeld für Retrieval-Systeme bilden die Internet-Suchmaschinen. Da es wegen des Zeitaufwands nicht durchführbar wäre, das gesamte Internet erst bei einer Suchanfrage zu durchsuchen, werden stattdessen häufig so genannte Agenten eingesetzt, die bereits im Vorfeld der Suche agieren. Agenten sind Programme, welche autonom, also ohne ständige Überwachung durch einen Menschen, spezifische Aufgaben durchführen. Diese nehmen im Falle von Suchmaschinen eine periodische Indexierung des Internet vor, so dass anschließend nur noch dieser lokale Index bei einer Anfrage betrachtet werden muss. Suchmaschinen sortieren die gefundenen Dokumente oft nach der Relevanz bezüglich einer Suchanfrage.

Zukünftig wird sich die Intelligenz von Suchmaschinen durch die zunehmende Entwicklung des Internet zum so genannten Semantischen Web deutlich vergrößern. Webseiten werden dann nicht mehr nur für den Menschen interpretierbar sein, sondern durch Hinzufügen von maschinenlesbaren und bedeutungstragenden Informationen u.a. auch für die Agenten der Suchmaschinen. Diese sind dadurch z.B. in der Lage, zwischen den verschiedenen Bedeutungen eines Wortes zu unterscheiden (z.B. „Koch“ als Name oder Beruf). Die maschinenlesbaren Informationen werden dabei mit Hilfe von XML (eXtensible Markup Language) formuliert. Hierbei handelt es sich um eine durch den Anwender erweiterbare formale Sprache zur Strukturierung von Dokumenten.

Ein wichtiger Trend ist die Entwicklung von mehrsprachigen Retrieval-Verfahren, welche die Suche in einer Menge von Dokumenten ermöglichen, die in unterschiedlichen Sprachen geschrieben sind. Hierfür verwendet man Wörterbücher, welche die Sprache der Suchanfrage in die Sprachen der zu durchsuchenden Dokumente übersetzen können und umgekehrt. Allerdings existiert nicht für jede Kombination von zwei beliebigen Sprachen auch ein entsprechendes Wörterbuch. Zur Lösung dieses Problems kann man dann eine dritte Sprache als Zwischensprache verwenden, für welche die gesuchten Wörterbücher vorhanden sind. Die Suche nach Audio- und Videodateien ist ein weiteres aktuelles Forschungsgebiet. Hier wird z.B. daran gearbeitet, Bilddokumente nach inhaltlichen Kriterien zu durchsuchen. Dazu ist es notwendig, den Grad der Ähnlichkeit zwischen zwei Bildern zu bestimmen. Zur Analyse der jeweiligen Bildinhalte lassen sich z.B. so genannte Neuronale Netze verwenden, die sich in ihrer Funktionsweise an Nervenzellen lebender Organismen orientieren.

Juni 2003 Klaus Ruhlig

Digitale Sprachverarbeitung

Die Techniken und Verfahren im Zusammenhang mit der rechnergestützten Verarbeitung menschlicher Sprache werden zusammenfassend als Digitale Sprachverarbeitung bezeichnet. Dazu zählen die Bereiche Spracherkennung, Sprachverstehen und Sprachsynthese einschließlich der Übersetzung in eine andere natürliche Sprache. Aus technischer Sicht beinhaltet dies die Aufnahme, Verarbeitung, Interpretation und Generierung akustischer Sprachsignale.

Zur Spracherkennung gehören alle Verfahren zur automatischen Klassifikation von einzeln gesprochenen Wörtern, kurzen Wortfolgen und Sätzen bis hin zu längeren zusammenhängend gesprochenen Mitteilungen. Die Ermittlung der Wortbedeutungen sowie des konkreten Informationsgehaltes der Äußerungen werden dagegen als Aufgabe des Sprachverstehens betrachtet. Dabei kann der zu verarbeitende Text sowohl das Ergebnis einer vorhergehenden Spracherkennung als auch eine geschriebene Vorlage sein.

Bei der Sprachsynthese sind grundsätzlich zwei Methoden zu unterscheiden. Ein Verfahren basiert auf der Zerlegung der aufgezeichneten Sprache in seine sprachlichen bzw. lautlichen Einzelteile, die gespeichert und je nach zu realisierender Äußerung neu zusammengesetzt werden. Bei der anderen Methode wird dagegen versucht, auch die Lautbildung der menschlichen Stimme mit technischen Mitteln wie Rauschgeneratoren und Filtern nachzuahmen. Die Technik der Sprachsynthese gilt als weitgehend beherrscht, solange es nur um die korrekte und verständliche Wiedergabe vorliegender Texte geht. Dagegen ist die Qualität der generierten Sprache noch verbesserungsbedürftig.

Ein wichtiger Bestandteil eines sprachverarbeitenden Systems ist das zugrunde liegende Lexikon, das alle dem System bekannten Wörter und ihre Abwandlungen enthält. Das Grundproblem der Spracherkennung besteht dann darin, zu ermitteln, welche Wörter aus einem solchen Lexikon gesprochen wurden. Die Erkennungsquote hängt außer von den Umfängen der gesprochenen Äußerungen und der Lexika von den Umständen der Sprachsignalerzeugung ab, wie z.B. der Zahl der zugelassenen Sprecher und deren Sprechgewohnheit. Eine Verbesserung ist durch Beschränkung der zugelassenen Äußerungen, der Wissensdomäne, erreichbar. Auch die technischen Aufnahmebedingungen, wie Telefonqualität oder angepasstes Mikrofon, spielen eine große Rolle. Bei kleinen Lexika, einem oder nur wenigen Sprechern sowie isoliert gesprochenen Wörtern werden Worterkennungsquoten bis zu 99,9% erreicht. Vordringliches Problem der Spracherkennung ist die Entwicklung der erforderlichen leistungsfähigen Algorithmen. Hierfür kommen neben den früher verwendeten statistischen zunehmend auch wissensbasierte Methoden zum Einsatz.

Das schwierigste Teilgebiet der Sprachverarbeitung ist das Sprachverstehen. Hierbei handelt es sich um einen wissensbasierten Prozess, der neben Syntax und Semantik noch zusätzliche Wissensquellen nützt. Obwohl die Probleme für gesprochene und geschriebene Sprache prinzipiell gleich sind, besteht in der Anwendung ein wichtiger Unterschied darin, dass durch die Verfahren der Spracherkennung Wortgrenzen nur mit einer gewis-

sen Wahrscheinlichkeit erkannt werden, während sie bei geschriebenen Texten meist zweifelsfrei markiert sind. Das entscheidende Problem ist jedoch die Auflösung von Mehrdeutigkeiten natürlichsprachlicher Äußerungen. Ein wichtiges Ergebnis der KI-Forschung zur Sprachverarbeitung ist, dass dafür kein universeller Algorithmus existiert. Eine eindeutige Interpretation kann daher nur durch die Fusion von Ergebnissen konkurrierender Verarbeitungspfade erreicht werden.

Wichtige Anwendungsgebiete für die Sprachverarbeitung sind sprachgesteuerte Dialogsysteme für Dienste aller Art, wie z.B. Fahrplanauskunft oder Börseninformationssysteme. Auch natürlichsprachliche Zugänge (Sprachportale) zu Informationsanbietern im Internet und zu lokalen Datenbanken gehören dazu. Systeme der neuesten Generation sollen dabei einen Wortschatz von bis zu 20.000 Wörtern selbst über Mobiltelefon verstehen können und damit die derzeit weitverbreiteten kommandobasierten Telefondialogsysteme ablösen. Weitere wichtige Anwendungen sind Diktiersysteme. Diese weisen bei serverbasierten Systemen z.T. einen sehr großen Wortschatz von bis zu 1.000.000 Wortformen auf. Sie sind i.d.R. sprecherabhängig und erreichen nach ausreichender Trainingsphase akzeptable Fehlerraten.

Die derzeit anspruchsvollsten Anwendungen der Sprachverarbeitung sind mobile Übersetzersysteme für spontansprachliche Dialoge, wie z.B. das Ende letzten Jahres als Prototyp realisierte BMBF-Verbundprojekt Verbmobil. Das System erkennt für ausgewählte Themenbereiche (Terminverhandlungen, Reiseplanung) gesprochene Spontansprache in Deutsch, Englisch oder Japanisch und übersetzt in eine der unterstützten Fremdsprachen. Durch die eingesetzte Kombination von statistischen und linguistischen Verfahren arbeitet das System relativ fehlertolerant und robust. Es erreicht in mehr als 80% der Eingaben trotz Versprechern noch eine verständliche Übersetzung.

In einem neuen Ansatz zum Spracherkennen und –verstehen wird die Art und Weise des Sprechenlernens bei Kleinkindern zum Vorbild genommen. Ohne Ausgangsvokabular und ohne Grammatikkenntnisse werden in einer Trainingsphase durch Assoziation syntaktisch korrekte Sätze gebildet und der Wortschatz vergrößert. Dabei wird das gelernte Wissen über die Zusammenhänge zwischen Objekten und Wörtern in Neuronalen Netzen abgelegt.

Eine Weiterentwicklung der reinen Sprachverarbeitung zur multimodalen Kommunikation wird mit der Integration von Sprache, Gestik und Mimik angestrebt. Durch die wechselseitige Ergänzung der Eingabemodalitäten wären multimodale Dialogsysteme erheblich robuster und effizienter als reine Sprachdialogsysteme. Die Kombination von Sprach- und Mimikinformation könnte darüber hinaus erstmals sogar die Erkennung von Ironie und Sarkasmus ermöglichen.

Oktober 2002 Henner Wessel

Fuzzy-Logik

Mit dem Begriff „fuzzy“ (engl.: undeutlich, verschwommen) bezeichnet man im wissenschaftlich-technischen Bereich Eigenschaften, die nur mit einer gewissen Unschärfe definierbar sind. Die so genannte Fuzzy-Logik basiert auf einem vor ca. 40 Jahren formulierten mathematischen Ansatz zur Beschreibung unscharfer Zustände. Im Prinzip handelt es sich hierbei um eine Erweiterung der „klassischen“ (binären) Logik, die ja nur zwei Möglichkeiten zulässt (wie wahr/falsch Ja/Nein, Ein/Aus oder 1/0) und daher z.B. die Information „beinahe wahr“ als „falsch“ einstuft. Fuzzy-Logik ermöglicht es hingegen, ohne aufwendige mathematische Modellierung stufenlose Übergänge zwischen „wahr“ und „falsch“ zu definieren. Dadurch können ungenaue Begriffe, wie z.B. „vielleicht“, „wenig“ oder „etwas“, auf einfache Weise mathematisch verarbeitet werden. Mit Hilfe einer sogenannten Zugehörigkeitsfunktion lässt sich angeben, zu welchem Grad (üblicherweise als Wert zwischen 1 und 0) eine Aussage zutrifft. So bedeutet z.B. ein Wert 0,3, dass ein Zustand zu 30 % als existent eingeschätzt wird und zu 70 % nicht.

Die so genannten Fuzzy-Systeme befassen sich mit der Modellierung von Daten und Regeln, die in unscharfer oder unvollständiger Form vorliegen. Sie bestehen im wesentlichen aus drei Schritten. Bei der Fuzzifizierung werden den numerischen Eingangswerten unscharfe Begriffe zugeordnet. Die Fuzzy-Inferenz ist eine Verarbeitungsvorschrift für die in der Regelbasis festgelegten so genannten linguistischen Regeln, die die Syntax „WENN eine Vorbedingung gilt, DANN ziehe eine Schlussfolgerung“ haben. Dadurch werden aus den fuzzifizierten Eingangsgrößen Fuzzy-Ausgangsgrößen erzeugt, die bei der Defuzzifizierung wieder in numerische Ausgangswerte umgewandelt werden.

Die Fuzzy-Logik wird vor allem dort eingesetzt, wo für die Steuerung und Regelung von komplexen, nichtlinearen Prozessen sowie bei Muster- und Objekterkennungsprozessen Vorwissen notwendig ist, jedoch eine mathematisch exakte Beschreibung der Zustände, Vorgänge und Verfahren nicht oder nur mit großem Aufwand erfolgen kann. Ihr Einsatz ist allerdings nicht auf technische Anwendungen begrenzt. Sie findet ebenfalls bei ökonomischen, juristischen, biologischen oder medizinischen Aufgabenstellungen Anwendung. So hat sie in zahlreichen Produkten, Branchen und Industriezweigen Einzug gehalten. Bei der Einführung von Fuzzy-Systemen im Konsumgüterbereich (Waschmaschinen, Staubsaugern, Autofokuskameras) hat derzeit Japan eine Vorreiterrolle übernommen.

Die so genannten Fuzzy-Controller unterscheiden sich von herkömmlichen Reglersystemen darin, dass sie trotz eindeutiger Zuordnung von Eingangs- zu Ausgangsgrößen, keine explizite mathematische Beschreibung des funktionalen Zusammenhangs zwischen diesen verlangen. Vielmehr entsteht durch die quasi umgangssprachliche Beschreibung der technischen Zusammenhänge ein weitgehend intuitiv nachvollziehbares System, das auch dann sinnvolle Schlussfolgerungen ziehen kann, wenn definierte Vorbedingungen nicht oder nur zum Teil erfüllt sind. Da das Fuzzy-System Eingabeinformationen zueinander in Relation setzt, kommen Fuzzy-Controller oft mit weniger Sensorinformation aus, was billigere und robustere Reglersysteme ermöglicht. Ein eindrucksvolles Beispiel für die Umsetzung eines derartigen Regelungskonzeptes stellt die fuzzygesteuerte U-Bahn im japanischen Sendai dar. Hier regelt eine Kombination aus Software und Spezialchips das

Anfahren, Beschleunigen und Bremsen so sanft, dass sich die Fahrgäste im Prinzip nicht mehr festhalten müssen.

Ein weiteres Anwendungsgebiet der Fuzzy-Logik liegt in der automatisierten Bild- oder Mustererkennung, die vor allem bei industriellen Produktionsprozessen zur Qualitätskontrolle benötigt wird. Hierbei wird, ähnlich wie vom menschlichen Prüfer, das aktuelle Bild des Prüflings mit dem jeweiligen Referenzbild verglichen. Die Zuordnung in Qualitätsklassen erfolgt über eine Referenzskala oder einen individuellen Satz von kundenspezifischen Referenzbildern. Der Vorteil eines Fuzzy-Verfahrens liegt darin, dass das System einfacher als konventionelle Verfahren durch Aufnahme neuer Referenzbilder auf unterschiedliche Analyseaufgaben trainiert werden kann.

Ebenso können mittels Fuzzy-Logik Entscheidungsabläufe z.B. bei der Planung und Steuerung von Produktionsprozessen unterstützt werden. So erfordern z.B. in der Automobilindustrie die Sperrungen und Freigaben von Modellvarianten und Sonderausstattungen eine flexible Reaktionsfähigkeit bei der Fahrzeugmontage, um eine möglichst gleichmäßige Auslastung der Kapazitäten zu gewährleisten. Aufgrund von Daten über die momentane Produktionssituation werden verschiedene Optimierungsmöglichkeiten entwickelt und bezüglich ihrer voraussichtlichen Auswirkung auf die Montagestationen bewertet. Das Ergebnis wird anschließend durch Zugehörigkeitsfunktionen in Fuzzy-Wirkungsgrößen umgerechnet, ausgewertet und in Steuerungsempfehlungen umgesetzt. Anhand dieser Empfehlungen können die Auslastungsziele der einzelnen Montagestationen gewichtet und über die zur Auswahl stehenden Optimierungsalternativen entschieden werden.

Da bei Fuzzy-Systemen alle Regeln zuvor festgelegt werden müssen, werden zukünftige Entwicklungen verstärkt auf eine Kombination von Fuzzy-Logik mit Neuronalen Netzen zielen. Solche Neuronalen Fuzzy-Systeme sind in der Lage, bestehende linguistische Regeln oder Zugehörigkeitsfunktionen sowohl zu verbessern als auch weitgehend selbständig zu erlernen, wodurch sich ein zusätzliches Anwendungsspektrum eröffnet.

April 2002 Claudia Notthoff

Selbstorganisierende Systeme

Als Selbstorganisation bezeichnet man die selbstständige Anordnung einfacher Bausteine zu Einheiten höherer Komplexität, die andere Eigenschaften und einen höheren Informationsgehalt aufweisen als die einzelnen Bausteine. Durch das Zusammenwirken entsteht also etwas qualitativ Neues: „Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile." Jegliche Ordnung in der Natur basiert auf diesem Prinzip. Technologische Bedeutung erhält die Selbstorganisation heute durch die zunehmenden Möglichkeiten der Übertragung ihrer prinzipiellen Funktionsweisen auf die Produktion technischer Systeme.

Das Spektrum selbstorganisierender Systeme in der Natur reicht von der Bildung von Kristallen über die Entstehung von Zellmembranen bis hin zu Ameisenvölkern. Die Art der Anordnung ergibt sich dabei zwangsläufig durch Art, Stärke, Richtung und Verknüpfung der konkurrierenden Wechselwirkungen zwischen den Bausteinen. Diese werden durch die innere Struktur der Bausteine vorgegeben oder durch eine strukturierte Umgebung erzwungen. Dabei findet jedoch keine gezielte Manipulation einzelner Bausteine statt. Ihre Beweglichkeit und die vorgegebenen Wechselwirkungen und Randbedingungen führen gewissermaßen „von selbst" zu der angestrebten Ordnung.

Seine mathematische Grundlage findet dieses Phänomen in der Theorie komplexer Systeme. Die Dynamik (zeitliche Veränderung) solcher Systeme zeichnet sich durch selbstverstärkende Prozesse oder Rückkopplungen aus, die durch nichtlineare Gleichungen dargestellt werden. Ursprünglich stammt dieser Formalismus aus der astronomischen Beschreibung der Bewegungen in einem Planetensystem mit mehr als zwei Himmelkörpern. Mit dieser Theorie lassen sich selbstorganisierende Systeme aller Art erfassen, wie z. B. das Gehirn und die Versuche seiner Nachahmung im Computer oder das Verhalten von Gruppen von Organismen. Sie liefert damit wichtige Beiträge für das Verständnis in so unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen wie Evolutionsbiologie, Ökologie, Soziologie und Ökonomie.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen konservativer und dissipativer Selbstorganisation. Die Erstere wird in geschlossenen Systemen beobachtet, die lediglich Energie-, jedoch keinen Stoffaustausch mit der Umgebung zeigen und sich nahe dem thermischen Gleichgewicht befinden. Erreicht hier ein Parameter (z. B. die Temperatur) einen kritischen Wert, so findet ein Phasenübergang zu einem neuen (selbstorganisiert-geordneten) Aggregatzustand statt. Beispiele für konservative Selbstorganisation sind die Ausbildung einer magnetischen Fernordnung in Ferromagneten, die Kristallisation oder die Bildung von supramolekularen Anordnungen.

Dissipative Selbstorganisation setzt dagegen ein offenes System voraus, das mit seiner Umgebung auch Materie austauscht. Man beobachtet in diesem Falle das Entstehen makroskopischer Ordnungsstrukturen dann, wenn der Stoff- und Energieaustausch mit der Umgebung kritische Werte übersteigt, was einer Situation fern vom thermischen Gleichgewicht entspricht. Wie von lebenden Zellen bekannt, findet ein „Stoffwechsel" statt, durch den die eingenommene Ordnung nach außen stabilisiert wird.

Bei konservativer wie dissipativer Selbstorganisation können weitere ordnende Einflüsse wirksam werden. Das Ausnutzen einer vorstrukturierten Umgebung, um dem selbstorganisierenden System eine bestimmte Ordnung aufzuprägen, wird als Schablonen- oder Templateffekt bezeichnet. Man spricht auch von molekularen Gerüsten. Dieser Effekt ist von zentraler Bedeutung für praktisch alle sehr spezifischen biochemischen Reaktionen bis hin zur Selbstreplikation (Selbstvermehrung) von molekularen Strukturen und damit auch lebender Organismen.

Biologische Systeme zeichnen sich durch ein Zusammenwirken konservativer und dissipativer Selbstorganisation aus. Sie bleiben fern vom Gleichgewicht, weisen aber eine hohe Stabilität gegenüber einer sich verändernden Außenwelt auf. Zusätzlich ist die Selbstorganisation von Organismen genetisch kodiert, d. h. die Baupläne für die biologischen Aggregate sind in Biomolekülen verschlüsselt, die wiederum durch die Möglichkeit zum Einbau von Fehlern (Mutationen) Anpassungs- und Lernprozesse zulassen.

In der Chemie und der Physik sind schon seit langer Zeit viele Phänomene bekannt, bei denen Selbstorganisation eine zentrale Rolle spielt. Heute wird insbesondere in den zwei neueren Technologiegebieten der Supramolekularen Chemie und der Nanotechnik gezielt versucht, ein besseres Verständnis der zugrundeliegenden Mechanismen und Wechselwirkungen zu erhalten und zu nutzen.

Die Supramolekulare Chemie behandelt die Zusammenlagerung von Molekülen zu Molekülverbänden. Solche Anordnungen bilden die biochemischen Grundlagen des Lebens. Beispiele hierfür sind die Paarung von DNS-Strängen des Erbgutes sowie die Faltung und Zusammenlagerung von Proteinen zu Aggregaten, welche sehr komplexe Funktionen mit hoher Selektivität und Genauigkeit ausführen können (Enzyme, Antikörper usw.). Damit werden biologische Funktionalitäten möglich, welche die einzelnen Moleküle nicht erfüllen könnten. Solche der Natur abgeschauten Bauprinzipien lassen sich wiederum zur technischen Synthese supramolekularer Strukturen mit neuen Eigenschaften nutzen. Ein Beispiel sind maßgeschneiderte Wirtsmoleküle, die Wirkstoffmoleküle einhüllen und an ganz bestimmte Stellen des menschlichen Körpers transportieren können.

In der Nanotechnik wird das Selbstorganisationsprinzip zur Erzeugung von kleinsten Strukturen ausgenutzt, die sich bei Maßschneidern der Zutaten, geeigneten äußeren Bedingungen und ggf. Anwesenheit von Schablonenstrukturen (Templaten) in großen Mengen selbst bilden. Man erhält so z.B. neue Werkstoffe, höchstintegrierte Elektronik oder neuartige medizinische Wirkstoffe. Auch regelmäßige Anordnungen von Biomolekülen mit bereits sehr komplexen Funktionen (z. B. Motorproteinen) können in solche Systeme einbezogen werden (Nanobiotechnologie) und eine Mechanik molekularer Größenordnung für den Menschen erschließen.

April 2001 Matthias Grüne

Soft Computing

Als Soft Computing (häufig auch Computational Intelligence genannt) wird ein Arbeitsgebiet der Informatik bezeichet, das die Verarbeitung nicht genau festgelegter oder unscharf definierter Daten ermöglicht. Es umfaßt derzeit als erfolgversprechende Lösungsansätze die Teilbereiche Fuzzy-Systeme, Neuronale Netze und Evolutionäre Algorithmen. Auch Problemfelder, bei denen eine eindeutige Beschreibung von Systemzuständen nicht möglich oder nicht sinnvoll ist und für die daher keine algorithmischen Lösungen sondern eher pragmatisch gewonnene Strategien vorliegen, können mit diesen Ansätzen erfolgreich behandelt werden. Da solche Fälle in vielen praktischen Anwendungen in Wirtschaft und Technik auftreten, gewinnen die Verfahren des Soft Computing zunehmend an Bedeutung. Im Unterschied zur Künstlichen Intelligenz, die auf logischem Schließen basiert, erforscht Soft Computing das Potential intelligenter Maschinen durch die Modellierung des Verhaltens und der Mechanismen biologischer Systeme.

Den bereits länger etablierten Fuzzy-Systemen liegt die Theorie der Unscharfen Mengen (fuzzy sets) zugrunde. Diese ist eine Erweiterung der klassischen Mengentheorie und erlaubt die Modellierung umgangssprachlicher Begriffe. Einem solchen durch eine Unscharfe Menge repräsentierten Begriff werden alle dafür in Betracht kommenden Werte durch einen plausibel gewählten Grad der Zugehörigkeit zugeordnet. Damit läßt sich Alltagserfahrung einfacher modellieren als durch exakte Zahlenangaben mit scharfen Zugehörigkeitsgrenzen. Mit umgangssprachlich formulierbaren Regeln lassen sich dann die aus der Erfahrung bekannten Beziehungen zwischen den betroffenen Begriffen darstellen und verarbeiten. Zur Erzielung eines häufig benötigten scharfen Ergebnisses muß abschließend noch eine geeignete „Defuzzifizierung" vorgenommen werden. Die erfolgreichsten Anwendungen für diese sog. Fuzzy-Logik finden sich in der Steuerungs- und Regelungstechnik (Fuzzy Control). Insbesondere in Japan sind Fuzzy-Systeme bereits in großer Zahl auf dem Markt.

Als Neuronale Netze werden Systeme bezeichnet, deren Struktur und Funktion sich an den Nervensystemen lebender Organismen orientiert. Vorbild ist insbesondere das menschliche Gehirn. Ein Neuronales Netz besteht im wesentlichen aus einfachen Verarbeitungseinheiten (Neuronen) und Verbindungen zwischen ihnen (Synapsen). Diese Verbindungen vermitteln den Zustand (Aktivität) des Ausgangsneurons an das Zielneuron. Der Zustand des Zielneurons hängt dann von den Kopplungsstärken (Gewichten) der Verbindungen ab. Üblicherweise werden die Neuronen nach dem Vorbild des menschlichen Sehsystems in Schichten angeordnet, bei denen die Neuronen einer Schicht nur Informationen von der unmittelbar vorgelagerten Schicht erhalten. Zur Lösung eines speziellen Problems werden in einer sog. Trainings- oder Lernphase nach einem vorgegebenen Lernalgorithmus die Verbindungsgewichte geeignet angepaßt. Anwendungsfelder für Neuronale Netze liegen hauptsächlich im Bereich der Mustererkennung.

Evolutionäre Algorithmen versuchen, den in der Natur ständig ablaufenden Optimierungsprozeß durch die Imitation von Auslese, Vererbung und Mutation nachzubilden. Vorbild ist die natürliche Evolution, welche ständig neue und z.T. verbesserte Organis-

men hervorbringt, die sich in ihrer Umwelt behaupten müssen. Als Lösungsstrategie werden Hypothesen generiert und durch eine sog. Fitnessfunktion bewertet. Die am besten bewerteten Hypothesen werden weiteren Evolutionsschritten zugeführt. Neue Hypothesen entstehen durch Rekombination und Mutation. Evolutionäre Algorithmen werden in verschiedenen Ausprägungen als Genetische Algorithmen (GA), Genetische Programmierung (GP) oder bei direkter ingenieurswissenschaftlicher Umsetzung als Evolutionsstrategien (ES) angewendet. Bei den am weitesten verbreiteten Genetischen Algorithmen werden Bitstrings bzw. Zeichenketten verarbeitet. Anwendungen sind z.B. Planungsoptimierung oder die Ermittlung optimaler Spielstrategien. Eine Weiterentwicklung ist die Genetische Programmierung, mit der für spezielle Problembereiche wie Robotersteuerung Computerprogramme „genetisch" erzeugt und optimiert werden sollen. Verarbeitet werden dabei bestimmte Programmteile, wie z.B. Term- und Funktionsbäume.

Im Zusammenspiel der verschiedenen Teilgebiete des Soft Computing übernehmen die Fuzzy-Systeme hauptsächlich die Behandlung der Ungenauigkeit und des approximativen Schließens. Neuronale Netze und Evolutionäre Algorithmen erlauben dagegen die Realisierung lernfähiger und anpassungsfähiger Systeme. Grob gesehen stellen sich die Teilgebiete eher komplementär als konkurrierend dar. In vielen Fällen ist es daher vorteilhaft, eine geeignete Kombination zur Lösung eines anstehenden Problems zu wählen. Häufig werden Neuronale Netze in Kombination mit Fuzzy-Systemen oder Evolutionären Algorithmen eingesetzt. So kombinieren Neuro-Fuzzy-Systeme die gute Transparenz der Fuzzy-Systeme mit der Lernfähigkeit der neuronalen Netze.

Problemlösung durch Soft Computing setzt häufig im Vergleich zu konventionellen algorithmischen Lösungen eine höhere verfügbare Rechenkapazität voraus, da die Komplexität eines Problems nicht nur durch mathematische Gleichungen modelliert wird, sondern sich in Struktur und Umfang der Systeme widerspiegelt. Mit der enormen Steigerung und wachsenden Verbreitung verfügbarer Rechenleistungen stellt dies jedoch immer weniger ein Problem dar, so daß die schon länger bekannten Verfahren des Soft Computing von dieser Entwicklung profitieren und ein immer weiteres Anwendungsfeld erschließen können. Dieser allgemein zu beobachtende Trend vom „Hard" Computing zum Soft Computing ist auch bei militärischen Anwendungen wie der Nachrichtengewinnung und Aufklärung zu beobachten. Hier ist wegen der ungünstigen Umfeldbedingungen (Gefechtsfeld) oder auf Grund gegnerischer Maßnahmen mit einer schwierigen Datenerfassung zu rechnen, so daß Verfahren zur Behandlung von unvollständig definierten Problemfeldern mit unscharfen und fehlerbehafteten Daten von großer Bedeutung sind.

September 2000 Henner Wessel

Kryptologie

Die Kryptologie befaßt sich mit der Entwicklung und Bewertung von Verschlüsselungsverfahren zum Schutz vertraulicher Daten vor unbefugtem Zugriff. Sie kann als die Wissenschaft der mathematischen und algorithmischen Aspekte der Informationssicherheit definiert werden und hat sich in den vergangenen 30 Jahren von einer fast rein militärischen Domäne zu einem Fachgebiet von zentraler Wichtigkeit in der Informationsgesellschaft entwickelt. Hier hat die durchgehende Digitalisierung der verschiedenen Kommunikationsdienste im Zusammenhang mit der enorm gestiegenen Rechenleistung die Verwendung immer komplexerer mathematischer Algorithmen zur Datenverschlüsselung ermöglicht.

Ein generelles Problem aller Kryptoverfahren ist das Schlüsselmanagement. Bei den sog. symmetrischen Verfahren wird der gleiche Schlüssel sowohl zur Ver- als auch zur Entschlüsselung verwendet. Daher sind sichere Verteilung und Aufbewahrung des geheim zu haltenden Schlüssels (secret key) wesentliche Voraussetzung für die Sicherheit dieses Verfahrens. Dieses Problem entfällt bei den sog. asymmetrischen Verfahren mit unterschiedlichen Schlüsseln für die Ver- und Entschlüsselung. Hier kann der Schlüssel für die Verschlüsselung sogar veröffentlicht werden (public key), ohne die Sicherheit der Kommunikation zu gefährden, solange der Schlüssel für die Entschlüsselung beim autorisierten Empfänger geheim gehalten wird.

Bei den symmetrischen Verfahren ist eine Reihe von Prozeduren im Einsatz, die auf unterschiedlichen Verschlüsselungsprinzipien basieren. Die Masse der im staatlichen und militärischen Bereich eingesetzten Verfahren sind sog. Stromchiffrierungen. Hier wird der Klartext als Bitfolge mit einer aus einem Schlüssel abgeleiteten Folge von Pseudozufallszahlen verrauscht. Ihre Vorzüge liegen vor allem in den hohen erreichbaren Verschlüsselungsgeschwindigkeiten. Nachteilig ist dagegen die notwendige Synchronisation der Chiffrier- und Dechiffrierprozesse. Ein anderes wichtiges Verschlüsselungsprinzip, bei dem mittels geeigneter mathematischer Transformationen Bitmuster einer festen Länge nach Maßgabe des Schlüssels verwürfelt werden, wird bei den sog. Blockchiffrierungen angewandt. Diese sind wegen der hier nicht notwendigen Synchronisation universeller einsetzbar. Bekannte Beispiele für Blockverschlüsselungsverfahren sind das, trotz nachgewiesener Schwächen, vor allem im Bankbereich immer noch weitverbreitete DES-Verfahren (Data Encryption Standard) und das seit 1990 etablierte deutlich sicherere IDEA-Verfahren (International Data Encryption Algorithm).

Bei der asymmetrischen Verschlüsselung wird derzeit überwiegend das RSA-Verfahren (nach Rivest, Shamir und Adleman) eingesetzt. Es gilt als sehr sicher, braucht aber zum Verschlüsseln einer Nachricht erheblich länger als DES oder IDEA. Bei diesem Public-Key-Verfahren beruht die Sicherheit auf der Schwierigkeit, sehr große Zahlen in Faktoren zu zerlegen. Kommerzielle Versionen auf der Basis dieses Public-Key-Verfahrens sind weltweit auf dem Markt und haben auch im Internet als digitale Signaturen zur Bestätigung und Prüfung der Datenintegrität eine weite Verbreitung erreicht.

Die praktisch erreichbare Sicherheit eines Kryptosystems hängt bei bekanntem Verfahren (wie z.B. dem DES) ganz entscheidend von der Länge des Schlüssels und der Häufigkeit seiner Anwendung ab. Da bei symmetrischen Verschlüsselungsverfahren nur sichergestellt sein muß, daß Sender und Empfänger den gleichen Schlüssel verwenden, wird an Schlüsselgenerierungssystemen gearbeitet, die einen Abgleich erlauben, ohne sensitive Informationen wie den Schlüssel selber übertragen zu müssen. In der Forschung diskutierte Vorschläge nutzen dafür gezielt die unvermeidbaren, statistisch auftretenden Fehler im Übertragungskanal, wie z.B. bei Zufallszahlen, die offen über einen Satelliten per Funk verteilt werden. Durch einen ausgeklügelten Austausch von Teilinformationen des Schlüssels über einen offenen Kanal können die Kommunikationspartner ihre Schlüssel abgleichen, ohne daß ein abhörender Dritter daraus verwertbare Informationen über den Schlüssel gewinnen kann. Ein anderer Ansatz basiert auf quantenmechanischen Effekten (Quanten-Kryptographie) und nutzt grundlegende Eigenschaften der Quantenphysik, die sicherstellen, daß ein Abhörversuch beim Schlüsselabgleich immer entdeckt wird.

Grundsätzlich ist bei allen derzeit praktisch einsetzbaren Verschlüsselungssystemen die Nicht-Entschlüsselbarkeit nur aufwandsmäßig zu verstehen, d.h. wieviel Rechenzeit für eine unautorisierte Entschlüsselung (Kryptanalyse) notwendig ist. Hier besteht also ein ständiger Wettbewerb, der auf der Seite der Verschlüsselung eine laufende Anpassung an den mit der Steigerung der Leistungsfähigkeit der Hard- und Software sinkenden Aufwand für die Kryptanalyse notwendig macht. Dieser Wettlauf zwischen wachsender Designkomplexität der Verschlüsselungsverfahren und der höheren Rechenleistung der Analyseseite wird jedoch für letztere immer schwieriger, da z.B. eine Verdoppelung des Schlüsselumfangs von 50 auf 100 Bits den Angreifer mit einem um den Faktor 2^{50} (ca. 10^{15}) exponentiell gesteigerten Analyseaufwand konfrontiert, während für die Designerseite eventuell nur eine Verdoppelung der benötigten Chipfläche oder der Programmlänge notwendig wird. Dieses scheinbare Ende der Kryptanalyse gilt aber nur für den Einsatz klassischer Computersysteme. Neue grundlagenorientierte Entwicklungen auf dem Gebiet der sog. Quantencomputer deuten auf eine vollständige Umkehrung dieser Situation hin, da die inhärente Parallelität der Quantencomputer einseitig die Analyseaufgabe bevorteilt und alle Verfahren, die auf dem mehrfachen Gebrauch eines Schlüssels basieren, gefährdet. Kryptologische Sicherheit ist damit langfristig nur noch durch Verfahren mit einmaligem Schlüsselgebrauch und durch sichere Schlüsselgenerierung zu gewährleisten. Einsatzfähige Quantencomputer sind jedoch trotz weltweiter Forschungsanstrengungen noch nicht in Sicht.

Februar 2000 Henner Wessel

Metacomputer

Unter einem Metacomputer versteht man die Vernetzung einzelner Rechner zu einem virtuellen, nach außen einheitlich wirkenden System. Es handelt sich also im Prinzip um einen Computerverbund, der bestmöglich vernetzt und so ausbalanciert ist, daß er für den Benutzer wie ein einzelner Computer erscheint. Metacomputing stellt also in ähnlicher Weise Rechenkapazität zur Verfügung, wie das gesamte Internet als ein großer Datenspeicher aufgefaßt werden kann.

Der Begriff Metacomputing kam vor ca. 10 Jahren auf, um das Konzept einer zusammenhängenden, kohärenten Rechnerumgebung zu beschreiben. Durch eine Reihe von Initiativen zunächst in den USA aber jetzt auch in Deutschland soll das große Potential dieses Konzeptes nutzbar gemacht werden. Durch Kopplung von leistungsfähigen Supercomputern wird eine Rechenleistung zur Verfügung gestellt werden, die auf einem einzelnen Höchstleistungsrechner allein nicht verfügbar ist. Metacomputing ist daher nicht als Alternative zum Supercomputing aufzufassen, sondern als dessen logische Fortführung. Die Bestandteile eines Metacomputers können lokal konzentriert oder aber weiträumig verbreitet sein. Letztes Jahr konnte in einem Transatlantischen Metacomputing Testbed sogar eine weltweite Vernetzung demonstriert werden. Bei dem Verbund kann es sich um verschiedenartige oder auch gleichartige Rechner handeln. Insbesondere bei einem homogenen Verbund sind die Grenzen zu einem massiv parallelen Superrechner, der ja auch aus einem - wenn auch stark vernetzten - Verbund einzelner Mikroprozessoren besteht, fließend. Ab wann daher ein Verbund Metacomputer genannt werden kann, ist umstritten.

Der Vorteil eines Metacomputers als heterogenes Netz liegt in der optimalen Nutzung der charakteristischen Stärken der verschiedenen beteiligten Rechnertypen zur Lösung einer Aufgabe. So können Superrechner, die für die Bearbeitung großer Datenmengen optimal sind, zusammen mit spezialisierten Grafikrechnern zur Visualisierung der Ergebnisse eingesetzt werden und von einem Arbeitsplatzrechner aus gesteuert werden. Eine gute Konfiguration eines Metacomputers erfordert jedoch für eine gegebene Anwendung eine jeweils speziell optimierte Kombination von Computern. Idealerweise sollte dies automatisch durch eine Standardschnittstelle des Benutzers mit dem Metacomputer geschehen.

Metacomputing stellt sehr hohe Ansprüche an das zugrundeliegende Netzwerk, das für eine möglichst verzugslose Verbindung zwischen den verschiedenen Komponenten des Metacomputers sorgen muß. An solchen schnellen breitbandigen Netzwerken und der entsprechenden Software wird daher intensiv gearbeitet. In einem aktuellen Projekt zur Kopplung von Supercomputern über schnelle Glasfaserleitungen wurde vor kurzem eine Übertragungsleistung von mehr als 2 Gigabit pro Sekunde erreicht und damit die sog. Gigabit-Schallmauer durchbrochen.

Grundsätzlich sind auch Rechnerkopplungen über das Internet und damit globales Metacomputing möglich. Wegen der geringen Übertragungsleistungen sind solche Konfigurationen jedoch nur für schwach parallele Anwendungen geeignet, bei denen wenig Daten

auszutauschen sind. Ein solches Internet-Projekt war Anfang 1997 ein Verbund zum Brechen eines 48-Bit-Kryptocodes, als Reaktion auf einen Wettbewerb, mit dem die Schwäche solcher kurzen Schlüssellängen gezeigt werden sollte. Es nahmen insgesamt zehntausend Rechner teil und die Lösung lag nach nur 13 Tagen vor. In einem derzeit laufenden ähnlichen Internet-Projekt werden in einer zahlentheoretischen Fragestellung sehr große Primzahlen (mehr als eine Million Stellen) bestimmter Bauart gesucht. Die Aufgabe des Metacomputer-Servers beschränkt sich dabei auf die Verwaltung der ausgegebenen Testzahlen und der einlaufenden Ergebnisse. Derzeit sind weltweit fast siebentausend Computer aktiv beteiligt. Sie erreichen zusammen eine Rechenleistung von über 400 Gigaflops und damit die Größenordnung der leistungsfähigsten Supercomputer.

Anwendungen für Metacomputer liegen in allen Problembereichen, die mit sehr großen Datenmengen umgehen müssen und für die bisher nur teure Höchstleistungsrechner geeignet waren, wie z.B. Crash-Simulationen, Strömungen an Tragflächen, Treibstoffverwirbelung in Brennkammern oder die Belastung von Kurbelwellen. Ein aktuelles heterogenes Metacomputing-Projekt in Deutschland ist die Zusammenschaltung der Simulationsmodelle für Atmosphäre, Meer und Eis, die für verschiedene Rechnertypen entwickelt wurden, zu einem einzigen Programm. Hierbei müssen z.B. die Programmteile, wo Atmosphäre und Ozean zusammentreffen, korrekt ineinandergreifen. Solche komplex strukturierten Probleme lassen sich auf heterogenen Metacomputern sehr gut lösen.

Trotz großer Fortschritte in vielen Bereichen sind für einen universell und einfach verfügbaren Metacomputer grundlegende Fragen noch offen. So ist z.B. die automatische Betriebsunterstützung noch weitgehend ungelöst. Dazu kommen noch offene Probleme bei der Fehlerminimierung und der Datensicherheit. Echtes Metacomputing im Routinebetrieb wurde bisher noch nicht demonstriert. Trotzdem werden zukünftig Metacomputer nicht nur die Arbeit von Wissenschaftlern und Ingenieuren verändern, sondern auch Eingang in die allgemeine, normale Rechnerwelt finden. Dann könnte man ähnlich einfach, wie man heute bereits mit sog. Browsern die Informationsfülle des Internets erschließt, von jedem Arbeitsplatzrecher oder sogar von mobilen Laptops oder Notebooks aus Zugang zu nahezu beliebiger Rechnerkapazität haben, die in einem Netz bereitgestellt wird. Wenn die noch bestehenden Probleme mit der Datensicherheit lösbar wären, ergäbe das Konzept des Metacomputing natürlich auch ein großes Potential für alle militärischen Aufgaben mit einem hohen Bedarf an Rechenleistung, die am jeweiligen Einsatzort nicht verfügbar ist.

März 1999 Henner Wessel

Quantencomputer

Durch die fortschreitende Miniaturisierung mikroelektronischer Schaltkreise werden in den nächsten Jahrzehnten Grenzen in der Strukturierung erreicht, bei deren Unterschreitung der Bereich der klassischen Physik verlassen wird und die auf atomarem Niveau bestimmenden Quanteneffekte relevant werden. Dies bedeutet jedoch nicht unbedingt das Ende der Weiterentwickung der Computertechnologie. Es zeichnet sich im Gegenteil ab, daß durch die informationstechnische Nutzung der Quanteneffekte grundsätzlich Neues mit einem weitreichenden Potential zu erwarten ist. Große Bedeutung wird in letzter Zeit vor allem dem Konzept des sog. Quantencomputers beigemessen.

Ein wesentliches Charakteristikum der Quantenwelt ist, daß sich Teilchen (z.B. Elektronen) wie Wellen und umgekehrt Wellen (z.B. Licht) wie Teilchen (Photonen) verhalten können. Welches Verhalten vorliegt, wird erst durch eine entsprechende Messung festgelegt. Die Eigenschaften von Quantenobjekten sind aber nicht genau festlegt sondern nur als Wahrscheinlichkeiten für mögliche Meßergebnisse. Das Teilchen verharrt daher vor einer Messung seiner Eigenschaften (z.B. Ort) in einer Überlagerung aller möglichen erlaubten Zustände zugleich. Solche Überlagerungen und ihre Auswirkungen wie z.B. Interferenzen sind typisch für Quantenobjekte.

Das grundlegend Neue des Quantencomputers basiert nun entscheidend auf diesen quantenmechanischen Effekten. Zunächst müssen geeignete Zustände identifiziert werden, die zwei gut unterscheidbare Eigenschaften haben, denen man die Werte 0 oder 1 zuordnet. Sie werden als Quantenbit oder Qubit bezeichnet. Dazu können z.B. die verschiedenen Polarisationszustände von Photonen, innere Eigenschaften atomarer Teilchen wie der sog. Spin sowie Energieniveaus von Elektronen in Atomen oder geeigneten Halbleiterstrukturen (sog. Quantenpunkten) genutzt werden. Während bei klassischen Computern die durch Transistoren oder Ladungszustände von Kondensatoren gebildeten Bits nur die Wahl zwischen binären Zuständen (0 oder 1) haben, kann ein Qubit bei einem Quantencomputer bis zu einer Messung seines Zustandes in einer komplexen Überlagerung von 0 und 1 verharren. Berechnungen verlaufen dann als quantenmechanische Operationen auf solchen Zustandsüberlagerungen und können wie beim klassischen Computer in kontrollierter Weise schrittweise ausgeführt werden. Ein Quanten-Algorithmus ist also eine Reihe solcher Operationen, gefolgt von einem speziell auf das Verhalten der Überlagerungen abgestimmten Meßprozeß zum Auslesen des Resultates.

Wenn alle Eingabe-Qubits in einen Überlagerungszustand mit gleichen Wahrscheinlichkeiten für 0 oder 1 versetzt werden, befindet sich der Quantencomputer in einer gleichmäßigen Überlagerung aller überhaupt möglichen Eingaben. Nach Durchführung der gewünschten Berechnungen erhält man eine Überlagerung aller sich daraus ergebenden Resultate. Der Quantencomputer hat also alle möglichen Eingaben auf einmal verarbeitet. Diese sog. Quantenparallelität ist eine grundlegend neue Eigenschaft und der wahrscheinlich wichtigste Vorteil dieses Konzeptes.

Theoretische Modelle für Quantencomputer werden von Physikern und Informatikern seit längerem (1982) diskutiert. Es fehlte jedoch in der ersten Zeit an Ideen für Anwen-

dungen, bei denen Quantencomputer entscheidende Vorteile bringen oder Probleme lösen können, die mit klassischen Computern gar nicht oder nur sehr langwierig lösbar sind. Eine solche Anwendung war die Entdeckung (1994) der Eignung des Quantencomputers als schnelle Faktorisierungsmaschine für große Zahlen. Da die Sicherheit wichtiger Verschlüsselungsverfahren (z.B. RSA-Public-Key-Verfahren), die heutiger Standard z.B. bei digitalem Geld und elektronischen Unterschriften sind, auf der Schwierigkeit dieser Aufgabe für klassische Computer beruht, war dies eine Entdeckung mit weitreichender Wirkung. Sie löste einen regelrechten Schub in der weltweiten Quantencomputer-Forschung aus. Inzwischen hat sich ein ganz neues Gebiet, die sog. Quanteninformatik, zwischen Quantenphysik und theoretischer Informatik herausgebildet.

Die erste Realisierung von Qubits als Vorstufe für einen Quantencomputer gelang mit Ionen, die durch elektrische Wechselfelder in einem engen Raumbereich (sog. Ionenfallen) festgehalten und mit Laserpulsen angeregt werden. Als experimentelle Anordnung konnten inzwischen Ionenfallen mit acht eingefangenen Calciumionen, die jeweils ein Qubit darstellen, realisiert werden. Nachgewiesen wurde, daß sie ausreichend lange in einem Überlagerungszustand zu halten sind, um als Quantencomputer arbeiten zu können.

In einem konkurrierenden Forschungsansatz werden als Qubits die gekoppelten Kernspins des Wasserstoffs (H) und eines Kohlenstoff-Isotops (C-13) in Chloroform-Molekülen ($CHCl_3$) in einer Lösung verwendet. Unter Verwendung von Kernspinresonanz-Techniken wurde ein Suchalgorithmus für ein System mit vier Zuständen implementiert, der aus einer ungeordneten Datenbasis nach einem einfachen Suchkriterium eine Eintragung findet (Namen zu einer Telephonnummer im Telephonbuch). Dies lieferte die erste vollständige experimentelle Demonstration für einen Quantencomputer. Eine Weiterführung dieses Ansatzes mit anderen Molekülen bis zu Quantencomputern mit 30 bis 40 Qubits wird für möglich gehalten.

Trotz der großen weltweiten Forschungsanstrengungen und der bereits erreichten Fortschritte wird es aber noch lange dauern, bis es einsatzfähige Quantencomputer gibt. Sie werden klassische Computer nicht verdrängen sondern vor allem da zum Einsatz kommen, wo die inhärente Parallelität des Quantencomputers ausgenutzt werden kann. Dies ist z.B. bei allen Simulationsmodellen hochkomplexer Systeme wie Wetter oder Klima der Fall.

Oktober 1998 Henner Wessel

Neuronale Netze

Als Neuronale Netze werden elektronische Informationsverarbeitungssysteme bezeichnet, deren Struktur und Funktion sich an den Nervensystemen lebender Organismen orientiert. Vorbild ist insbesondere das menschliche Gehirn, dessen Überlegenheit im Erkennen und Verstehen von Strukturen und Zusammenhängen im Vergleich zu konventionellen, sequentiell arbeitenden Rechnern die Begrenztheit der Leistungsfähigkeit dieser Rechnerarchitektur augenfällig macht. Die derzeitige rasche Entwicklung der Neuronalen Netze basiert auf bereits in den 40er Jahren begonnenen Arbeiten. Eine erfolgreiche Weiterentwicklung des theoretischen Unterbaus und die enormen Fortschritte in der Halbleitertechnologie haben den Neuronalen Netzen jedoch immer mehr Anwendungen erschlossen und sie damit seit einiger Zeit wieder stärker in das Blickfeld der Öffentlichkeit gebracht.

Ein Neuronales Netz besteht aus in mehreren Schichten angeordneten einfachen Prozessoren, deren biologisches Vorbild die Nervenzellen (Neuronen) sind. Die Prozessoren sind entsprechend der gewählten Netzarchitektur miteinander verknüpft und erhalten über Eingangsleitungen Signale anderer Prozessoren, die unterschiedlich gewichtet zu einem Ausgabesignal zusammengefaßt und an die Prozessoren der jeweils nächsten Schicht weitergegeben werden. Die einzelnen Gewichte können dabei in einer sog. Lern- oder Trainingsphase an die jeweilige Aufgabe angepaßt werden und sind damit der eigentliche Träger der gespeicherten Information.

Ein wesentlicher Vorteile dieser einfachen Architektur ist die inhärente Parallelität der Arbeitsweise, die eine schnelle Bearbeitung komplexer Aufgaben ermöglicht. Ein anderer wichtiger Vorteil ist die aus der Art der Informationsspeicherung folgende Fähigkeit, auch mit fehlerbehafteten Eingangsdaten und selbst bei Teilausfällen des Netzes noch sinnvoll arbeiten zu können. Dies ermöglicht die wirtschaftliche Fertigung auch großer Chips bis zu Wafergröße, da keine absolute Fehlerfreiheit mehr erforderlich ist. Auch der Einsatz in rauher Umgebung, wie er insbesondere bei militärischen Aufgaben zu erwarten ist, wird durch diese inhärente Ausfallsicherheit erleichtert.

Die konkrete Realisierung von Neuronalen Netzen erfolgt häufig noch als Softwaresimulation auf konventionellen Rechnern, die eventuell durch geeignete Hardwareerweiterungen (Beschleunigerkarten) modifiziert werden. Sie lassen sich aber bei zu erwartender größerer Stückzahl auch in Form spezieller elektronischer Schaltungen aufbauen. Als Entwicklungsziel wurden bereits Neurochips mit bis zu 1 Million Prozessoren angekündigt. Wegen der bei umfangreicheren Netzen notwendigen sehr großen Zahl von Verbindungen würden sich primär optisch arbeitende Schaltungen (photonische Schaltkreise) besonders gut eignen. Solche Opto-Chips sind jedoch noch weitgehend im Forschungsstadium.

Das Anwendungsfeld für neuronale Rechner liegt hauptsächlich im Bereich der Mustererkennung im weitesten Sinne. Diese umfaßt sowohl Bild-, Sprach- und allgemeine Signalverarbeitung als auch Diagnose-, Steuerungs-, Prognose- und Entscheidungshilfeverfahren. Hier kann die eigentliche Stärke dieser Architektur, Ähnlichkeit von verschiede-

nen Eingaben zu erkennen, besonders gut ausgenutzt werden. Konventionelle Rechner geraten speziell bei solchen Aufgaben leicht in Komplexitätsprobleme.

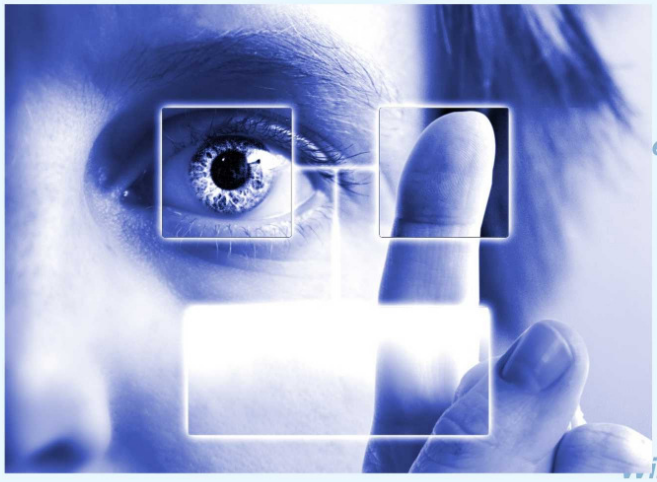
Der Entwicklungsstand und die Breite des Anwendungsspektrums von Neuronalen Netzen läßt sich anhand einiger bereits realisierter Systeme beispielhaft charakterisieren. So wurden im Bereich der Bildverarbeitung z.B. ein System zur Erkennung japanischer Schriftzeichen und ein System zum Lesen handgeschriebener Ziffern realisiert. In der Sprachverarbeitung existieren Neuronale Netze zur Erlernung englischer Aussprache. Als Diagnoseverfahren werden Neuronale Netze z.B. im Rahmen der Sprengstoffdetektion im Reisegepäck auf Flughäfen, der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung sowie der Bearbeitung medizinischer Daten (EKG, EEG) eingesetzt. Im Steuerungsbereich wurden Systeme zur Hinderniserkennung bei bewegtem Fahrzeug und zur Erkennung des Straßenverlaufs entwickelt. Auch für die Gebiete Prognose und Entscheidungshilfe existieren bereits Neuronale Netze. Dabei handelt es sich z.B. um Programme zur Prognose von Aktienkursen bzw. zur Beurteilung von Darlehensrisiken.

Spezielle wehrtechnische Anwendungen ergeben sich vor allem für Systeme zur Klassifikation von Aufklärungsergebnissen (Radar, Infrarot, Sonar). Der Hauptvorteil liegt in dem einfacheren Erlernen von bisher noch nicht bekannten Zielsignaturen, im Vergleich etwa zur aufwendigeren Aufnahme neuer Regeln bei Expertensystemen. Eine interessante Anwendung aus dem Steuerungsbereich ist ein System zur Vibrationsunterdrückung z.B. bei hubschraubergestützten Sichtsystemen. Hier wird das schnelle Reagieren Neuronaler Netze zur Steuerung eines Gerätes verwendet, mit dem kompensierende Kräfte auf die Halterung ausgeübt werden.

Die große Publizität der Neuronalen Netze und die dadurch erweckte hohe Erwartungshaltung beruht auf dem insbesondere von kommerziellen Anbietern häufig genannten Vergleich mit dem menschlichen Gehirn. Da diesem Vorbild auch zukünftig nur in einem sehr begrenzten Umfang entsprochen werden kann, besteht hier die große Gefahr einer Ernüchterungs- und Enttäuschungsphase nach anfänglicher Euphorie. Darüber hinaus gibt es noch eine große Zahl von ungelösten Problemen wie z.B. die Frage nach der optimalen Netzarchitektur bei gegebener Aufgabenstellung und die Überprüfung der Kompetenzgrenzen. Bei realistischer Einschätzung des Leistungspotentials werden Neuronale Netze jedoch einen festen Platz in zukünftigen Rechnerarchitekturen haben. Vielversprechend ist insbesondere eine arbeitsteilige Einbindung in Hybridsysteme mit konventionellen Rechnern, bei der sie den Teil der Aufgaben übernehmen, in dem ihre besonderen Stärken liegen.

Dezember 1997 Henner Wessel

Wissen & Information



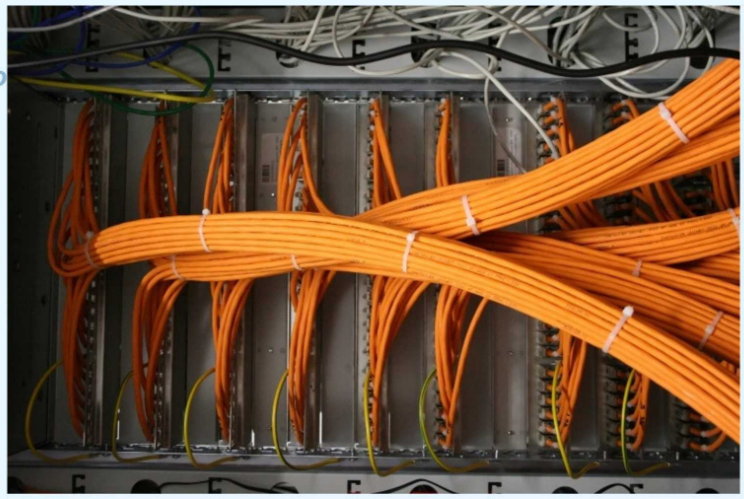
en & Information

issen & Information

Wissen & Information

Wissen & Information

Wissen & Info



Wissen & Information

Informationsverarbeitung: Technologien, Komponenten und Systeme

Zukünftige Mobilfunksysteme	2009	
Cognitive Radio	2008	Netzwerksicherheit
	2007	Intelligente Antennen
	2006	
Supercomputer		
	2005	RFID-Technologie
	2004	
	2003	Authentifizierungs- und Identifizierungstechnologien
Betriebssysteme		
	2002	Programmiersprachen
	2001	
	2000	
Powerline-Kommunikation		
	1999	
	1998	
	1997	
	1996	



Zukünftige Mobilfunksysteme

Seit einiger Zeit werden in vielen Ländern Mobilfunknetze nach dem neuen Standard UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) aufgebaut. Nach den ersten, inzwischen abgeschalteten, analogen Mobilfunksystemen und dem weiterhin genutzten digitalen Mobilfunkstandard GSM (Global System for Mobile Communication) wird UMTS auch als Mobilfunk der dritten Generation bezeichnet. UMTS erlaubt neben einer verbesserten Sprachübertragung auch die Übertragung von Bildern, Musik und Videos, was eine effizientere Übermittlung von Internetseiten ermöglicht. In seinen neuesten Entwicklungsstufen realisiert UMTS maximale Übertragungsraten von rund 14 MBit/s zum Teilnehmer hin (Downlink) und etwa 6 MBit/s vom Teilnehmer weg (Uplink), im Vergleich zu mehreren hundert kBit/s bei GSM.

Die Nachfolgesysteme von UMTS werden jedoch schon unter den Namen LTE (Long Term Evolution) und 4G (Mobilfunk der vierten Generation) geplant. Diese werden die ersten Funksysteme sein, die jeglichen Datenverkehr vollständig über das Internetprotokoll (IP) abwickeln. Ein wesentliches Ziel beider Systeme ist es, dass jeder Teilnehmer nahezu jeden Dienst und jede Anwendung, die er im Internet bisher zu Hause auf seinem PC in Anspruch nehmen konnte, unabhängig von Endgerät und Aufenthaltsort mobil nutzen kann. So sollen beispielsweise auch „Aufenthalte" in virtuellen Welten, wie z.B. Second Life, und darüber hinaus auch Fernsehübertragungen in hochauflösender Qualität möglich sein.

Mit LTE, dessen Einführung in den nächsten fünf Jahren als realistisch angesehen wird, sollen Übertragungsraten von mehr als 100 MBit/s Downlink und rund 50 MBit/s Uplink erzielt werden. Auch sollen die Funknetzabdeckung und die Ausnutzung der verfügbaren Übertragungskapazitäten des Netzes optimiert werden. Als Nachfolger von LTE sollen dann mittel- bis langfristig die 4G-Systeme eingeführt werden, die Übertragungsraten von bis zu 1 GBit/s Downlink bei langsamer Fortbewegung der Teilnehmer anstreben. Bei typischen Fahrzeuggeschwindigkeiten sind immerhin noch Übertragungsraten von rund 100 MBit/s Downlink geplant. Sowohl bei LTE als auch bei 4G sollen insbesondere die netzbedingten Verzögerungszeiten minimiert werden, wodurch angeforderte Dienste, im Gegensatz zur heutigen Situation, nahezu ohne merkliche Verzögerung quasi direkt verfügbar sein werden. Die verringerten Verzögerungszeiten kommen insbesondere anspruchsvollen interaktiven Diensten, wie z.B. der Videotelefonie, zugute.

Ein zentrales technologisches Element sowohl von LTE als auch 4G ist der Einsatz Intelligenter Antennen. Darunter versteht man generell eine sender- und/oder empfängerseitige Anordnung mehrerer Antennen, deren Signale digital derart aufbereitet werden, dass das Ergebnis optimal bestimmten Vorgaben entspricht. Möglich ist bei Intelligenten Antennen z.B. die adaptive Einstellung der Antennencharakteristik. Beim Mobilfunk kann dies in Form des so genannten räumlichen Multiplexings genutzt werden. Dabei werden mehrere extrem schmale, sich nicht überlappende Strahlungskeulen erzeugt, mit denen verschiedene Teilnehmer ohne sich gegenseitig zu stören im selben Frequenzbereich an das Mobilfunknetz angebunden werden können. Insbesondere wird bei zukünftigen Mobilfunksystemen das so genannte MIMO-Verfahren (Multiple Input Multiple Output)

zur Anwendung kommen. Hierbei strahlen verschiedene senderseitig installierte Antennen jeweils eigene Signale ab, wobei alle Antennen denselben Frequenzbereich nutzen. Daher erhalten die einzelnen Antennen beim Empfänger jeweils Überlagerungen aller abgestrahlten Signale. Die jeweiligen Nutzsignale lassen sich dann aufgrund ihrer individuellen charakteristischen Ausbreitungssignaturen, die vorher vermessen werden, separieren. Auf diese Weise können in einem gegebenen Frequenzbereich gleichzeitig mehrere Signale übertragen werden, wodurch grundsätzlich die Übertragungsrate steigt. Die Verwendung von jeweils drei Antennen sowohl beim Sender als auch beim Empfänger kann in etwa zur Verdopplung der Übertragungsrate führen.

Eine weitere Schlüsseltechnologie zukünftiger Mobilfunksysteme ist das OFDM-Übertragungsverfahren (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Bei diesem wird der gesamte verfügbare Frequenzbereich in eine Vielzahl kleinerer Frequenzbereiche, so genannte Subkanäle, unterteilt, wobei jeder Subkanal einen Teil der zu übermittelnden Nachricht überträgt. Dies bietet die Möglichkeit der adaptiven Nutzung der einzelnen Subkanäle. In relativ kurzen Zeitabständen können dem Nutzer situationsabhängig diejenigen Frequenzbänder zugewiesen werden, die dieser aktuell benötigt. Gerade im Mobilfunk treten häufig schmalbandige Störungen auf. Bei Verwendung von OFDM können die betroffenen Subkanäle dann einfach ausgeblendet werden, während die übrigen Subkanäle das Signal übertragen. Ebenso können mehrere Teilnehmer im selben Frequenzbereich operieren, indem sie jeweils unterschiedliche Subkanäle für ihre Übertragungen nutzen. Insgesamt vereinfacht sich mit OFDM die notwendige Signalverarbeitung, was die Entwicklung von Endgeräten günstiger machen kann.

Ein wesentlicher Aspekt bei Mobilfunksystemen ist weiterhin die Größe der einzelnen Funkzellen. Sehr hohe Übertragungsraten können grundsätzlich nur von Zellen mit relativ kleinen Ausdehnungen effizient bereitgestellt werden. Aus diesem Grund werden Mobilfunksysteme langfristig aus Zellen bestehen, die in dicht besiedelten Gebieten Durchmesser von wenigen zehn Metern aufweisen und deren Basisstationen über leistungsfähige Lichtwellenleiter miteinander verbunden sind. Auch könnten zukünftig mit eigenständig betriebenen Funknetzzellen mit Ausdehnungen im Bereich von wenigen Metern bis zu einigen zehn Metern (so genannte Femtozellen) bestimmte räumliche Bereiche, wie z.B. Bürogebäude, an Mobilfunknetze angebunden werden.

Dezember 2008 Thomas Euting

Cognitive Radio

Die Nutzung des elektromagnetischen Spektrums für Funkanwendungen wird grundsätzlich von Behörden (in Deutschland der Bundesnetzagentur) reguliert. Dabei erwerben Netzbetreiber, wie z.B. Mobilfunkfirmen, Lizenzen für bestimmte Frequenzbänder, die sie dann exklusiv nutzen können. Diese Vorgehensweise führt jedoch zu einer ineffizienten Ausnutzung des elektromagnetischen Spektrums. Obwohl die zugewiesenen Frequenzbänder oftmals nur gering ausgelastet sind, dürfen nicht-lizenzierte Nutzer diese Bereiche nicht verwenden. Aufgrund der zukünftig weiter zunehmenden Verbreitung drahtloser Kommunikationsmöglichkeiten werden Verfahren diskutiert, die eine effizientere Nutzung der verfügbaren spektralen Ressourcen ermöglichen. Im Zentrum dieser Überlegungen steht ein Konzept, das Cognitive Radio (CR) genannt wird (entspricht in der deutschen Übersetzung etwa „Erkennendes Funkgerät").

Im ursprünglichen Sinne versteht man hierunter ein Funkgerät, das anhand der Wahrnehmung der elektromagnetischen Umwelt und der Teilnehmerbedürfnisse jeden Nutzer stets optimal mit Ressourcen und Diensten versorgt, wie z.B. Bandbreite, Übertragungsrate oder Internet. Nach heutiger enger gefasster Sichtweise handelt es sich um ein Funkgerät, das seine Übertragungsparameter, wie z.B. Trägerfrequenz, Sendeleistung oder Modulationsverfahren, in Abhängigkeit von den aktuellen physikalischen Randbedingungen verändern kann. Der wesentliche einstellbare Parameter ist dabei der genutzte Frequenzbereich. Ein CR besetzt momentan freie Frequenzbereiche innerhalb lizenzierter Bänder, wobei die Auswahl dieser Bereiche in dynamischer Weise erfolgt. Dies bedeutet, dass ein CR sofort zu anderen aktuell freien Frequenzen wechselt, sobald es in dem momentan besetzten Bereich die Anwesenheit eines lizenzierten Nutzers (Primärnutzer) feststellt.

Die Kernfunktionalität eines Cognitive Radio ist die Erkennung freier Frequenzbereiche. Der effizienteste Weg hierzu ist die Detektion von momentan sendenden Primärnutzern und der anschließende Ausschluss der durch diese derzeit belegten Bereiche. Hierfür kommen generell drei Methoden in Frage.

Bei genauer Kenntnis des zu detektierenden Signals kann ein speziell angepasstes Filter zum Einsatz kommen, welches das jeweilige Signal sowohl im Rauschen als auch unter allen anderen Signalen erkennen kann. Da ein CR grundsätzlich eine Vielzahl derartiger Signale erkennen muss, würde dieser Ansatz eine Menge jeweils separat angepasster Filter erfordern. Dies führt wiederum zu einem sehr hohen, meist inakzeptablem, Realisierungsaufwand.

Sofern keine Kenntnisse über die zu detektierenden Signale vorliegen, kann ein so genannter Energiedetektor verwendet werden. Dieser misst die über einen bestimmten Zeitraum in einem vorgegebenen Frequenzband empfangene Energie und vergleicht sie mit einem geeigneten Schwellenwert, der sich aus dem geschätzten Rauschhintergrund ergibt. Ist diese Schätzung nicht korrekt, sinkt die Detektionswahrscheinlichkeit jedoch drastisch. Aufgrund der relativ leichten Implementierung wird zur Erkennung sendender lizensierter Nutzer vorrangig dieses Konzept verfolgt.

Ein weiterer Ansatz zur Erkennung von Primärnutzern ist die Extraktion bestimmter charakteristischer Signalparameter, wie z.B. Trägerfrequenz oder Symbolrate. Diese Merkmalsextraktion kann unter Zuhilfenahme einer speziellen mathematischen Transformation vorgenommen werden. Im Vergleich zur Energiedetektion hat diese Methode den großen Vorteil, dass sie ein Signal eindeutig vom Rauschen unterscheiden kann. Sie erfordert jedoch einen höheren Realisierungsaufwand. Ein relativ neuer Vorschlag kombiniert den Ansatz der Merkmalsextraktion mit Verfahren der Mustererkennung, die auf künstlichen neuronalen Netzen basieren.

Ein recht neuer und viel diskutierter Vorschlag zum praktischen Einsatz von Cognitive Radios sieht deren Betrieb bei gleichzeitig sendenden Primärnutzern vor. Um Beeinträchtigungen für die Primärnutzer zu minimieren, wird ein Grenzwert für die von einem Empfänger eines Primärnutzers maximal tolerierbare Störleistung festgelegt, der sowohl vom allgegenwärtigen Rauschen als auch von zusätzlichen Signalen anderer Funkgeräte nicht überschritten werden darf. Liegt nun die aktuelle Störleistung unter diesem Grenzwert, kann ein CR mit einer derartigen Leistung senden, dass dieser Grenzwert gerade noch nicht überschritten wird. Derzeit arbeitet man an einer praktischen Umsetzung dieses bisher nur als Konzept existierenden Vorschlags.

Die prinzipielle Architektur eines CR sieht eine breitbandige Empfangseinheit mit einem nachfolgenden Analog/Digital(A/D)-Wandler, der eintreffende Signale in Bitsequenzen überführt, sowie einer digitalen Signalverarbeitungseinheit vor. Die geforderte Breitbandigkeit stellt hohe Anforderungen sowohl an die Antenne als auch an den Eingangsverstärker der Empfangseinheit, die momentan noch nicht hinreichend erfüllt werden können. Zur Erkennung schwacher Signale im gesamten abzudeckenden Frequenzbereich sind weiterhin sehr leistungsfähige A/D-Wandler notwendig, die jedoch auf absehbare Zeit nicht zur Verfügung stehen werden. Eine interessante Zwischenlösung könnte darin bestehen, starke Signale vor der A/D-Wandlung herauszufiltern.

Grundsätzlich ist auf dem Gebiet des Cognitive Radio derzeit eine Vielzahl von Forschungsaktivitäten zu verzeichnen. Weiterhin steht ein erster internationaler CR-basierter Standard vor der Verabschiedung. Dieser sieht die dynamische Nutzung von Frequenzen, die primär durch Fernsehsender belegt sind (54-862 MHz), für regionale Funkanwendungen vor. Sofern die technischen Herausforderungen gemeistert werden können und die Regulierungsbehörden einen Paradigmenwechsel bei der Frequenznutzung unterstützen, können Cognitive Radios die Stützpfeiler zukünftiger adaptiver Kommunikationsnetze werden.

Januar 2008 Thomas Euting

Netzwerksicherheit

Aufgrund der zunehmenden Vernetzung von Computern, z.B. über das Internet oder über interne Netze von Institutionen (Intranets), rückt der Schutz dieser Netze vor unautorisierten Zugriffen und missbräuchlichen Nutzungen immer stärker in den Vordergrund des Interesses. Die wesentlichen Aufgaben dieser so genannten Netzwerksicherheit bestehen in der Blockade von Netzzugängen durch Unbefugte, der Verhinderung von Manipulationen an den einzelnen dem Netzwerk angehörenden Computern sowie in der Unterbindung von unautorisierten Informationsabflüssen.

Die größte Gefahr für Computernetze geht nach wie vor von der so genannten Malicious Software (Malware) aus. Dieser Sammelbegriff steht für alle Programme, die eine schädliche Funktion ausüben können, wie z.B. das Herunterfahren des Systems oder das gezielte Ausspionieren von Daten. Generell unterscheidet man hier zwischen Viren, die sich selbst reproduzieren können, und Würmern, die sich eigenständig über Netzwerke verbreiten können. Ein im Prinzip nützliches Programm, das aber zusätzlich eine schädliche Funktion enthält, wird als Trojanisches Pferd bezeichnet.

Eine weitere große Gefahr für die Netzwerksicherheit bilden die Schwachstellen in den Betriebssystemen (z.B. Windows) oder in den Anwendungsprogrammen (z.B. Word) der Computer des Netzes. Ein Beispiel hierfür sind Programmierfehler, die einen verdeckten Zugang zum Computer ermöglichen. Derartige verdeckte Zugänge kann ein Angreifer dazu nutzen, einen Computer vollständig unter seine Kontrolle zu bringen und fernzusteuern. In Zusammenhang mit solchen Schwachstellen konnte in letzter Zeit eine starke Zunahme der so genannten Zero-Day-Exploits festgestellt werden. Dieser Begriff steht für die Möglichkeiten eines Angreifers, eine Schwachstelle bereits am Tag ihres Bekanntwerdens für Angriffe auszunutzen. Da die Entwicklung von Maßnahmen zum Schließen von Schwachstellen meistens einige Tage in Anspruch nimmt, stehen Nutzer diesen Zero-Day-Exploits oftmals schutzlos gegenüber.

Der bisherige Ansatz bei der Erkennung von Malware oder Angriffen basiert auf der Detektion ihrer bekannten charakteristischen Signaturen. Obwohl dieser Ansatz sehr effektiv ist, hat er den Nachteil, dass nur bekannte schädliche Programme bzw. Angriffe erkannt werden und die Systeme ständig mit den jeweils neuesten Signaturen aktualisiert werden müssen. Zukünftig werden daher auch zunehmend verhaltensbasierte Erkennungsmaßnahmen Verwendung finden. Dabei werden die Systemaktivitäten überwacht und bei einer verdächtigen Häufung sicherheitskritischer Prozesse, wie z.B. dem Öffnen oder Löschen von Dateien, wird auf das Vorhandensein von Malware bzw. eines stattfindenden Angriffes geschlossen. Da der Erkennung keine Signatur zugrunde liegt, sondern diese auf der Analyse allgemein bekannter typischer Verhaltensmuster basiert, kann diese Methode auch bisher unbekannte schädliche Programme bzw. Angriffe detektieren. Insbesondere bietet sie auch Schutz gegen Zero-Day-Exploits. Die Probleme des verhaltensbasierten Ansatzes liegen in der Definition eines normalen Systemverhaltens und in der Festlegung, welche Aktivitäten als sicherheitsgefährdend einzustufen sind.

Zur Absicherung des Internets wurde kürzlich der Aufbau eines in das Netz integrierten Schutznetzes vorgeschlagen, das quasi wie ein Immunsystem wirken soll. Dieses Schutznetz soll aus speziell ausgerüsteten Rechnern (Honeypots) bestehen, die in der Lage sind, gegen sie gerichtete Angriffe und Malware automatisch zu analysieren. Die dabei gewonnenen Informationen, z.B. eine Virensignatur, werden über die einzelnen Honeypots dann sofort dem gesamten Internet zur Verfügung gestellt. Auf diese Weise könnten sich Informationen über Schutzmaßnahmen durchaus schneller verbreiten als die Gefährdung selber.

Den Schutz von Netzen gegen unsichere zugangssuchende Teilnehmer-Endgeräte (z.B. Laptops) hat ein gänzlich neues Sicherheitskonzept zum Ziel. Dieses sieht für jedes Gerät, das Zugang zum Netz sucht, eine explizite Sicherheitsprüfung vor. Eine auf einem Server innerhalb des Netzes hinterlegte Sicherheitsrichtlinie definiert dabei die Sicherheitsstandards, die jedes Teilnehmer-Endgerät zu erfüllen hat. Je nach Ergebnis der Sicherheitsprüfung kann dem Zugang suchenden Gerät der Netzzugang gewährt oder verweigert werden. Ebenfalls denkbar ist ein eingeschränkter Zugriff auf Netzressourcen, wie z.B. Dateien oder Programme. Diskutiert wird darüber hinaus die Verlinkung potenziell unsicherer Teilnehmer-Endgeräte mit speziellen Servern, die Schutzprogramme einspielen, um ein zunächst als unsicher erkanntes Gerät in einen sicheren Zustand zu überführen.

Neben den software-basierten Maßnahmen zum Schutz von Computern gibt es einen rein hardware-basierten Ansatz, der als Trusted Computing bezeichnet wird. Dieser Begriff steht seit einigen Jahren für die Bemühungen mehrerer Computerhersteller, vertrauenswürdige Systeme zu realisieren. Herzstück dieses Konzeptes bildet ein manipulationssicherer Chip, der sich auf der Hauptplatine befindet und geeignete Sicherheitsmechanismen enthält. Dieser Chip kann z.B. in sicherer Weise kryptographische Schlüssel erzeugen und speichern. Ebenso kann er dem Benutzer manipulationssichere Register für die Speicherung von Daten zur Verfügung stellen. Weiterhin kann über bestimmte im Chip implementierte kryptographische Verfahren jedem Benutzer die Integrität der Plattform sicher nachgewiesen werden. Eine denkbare Anwendung dieses hardware-basierten Ansatzes liegt z.B. im E-Commerce, wo die beteiligten Computer vor der eigentlichen Transaktion zunächst gegenseitig ihre Vertrauenswürdigkeit nachweisen können. Ein genereller Kritikpunkt zum Trusted Computing wird allerdings darin gesehen, dass der Nutzer keinerlei Zugriffsmöglichkeit auf den Chip hat und auf dessen Sicherheit vertrauen muss.

Juli 2007 Thomas Euting

Intelligente Antennen

Vorrichtungen zur Aussendung oder zum Empfang elektromagnetischer Wellen bezeichnet man als Antennen. Im Prinzip ähneln sich Sende- und Empfangsantennen im Grundaufbau. Eine Sendeantenne strahlt elektromagnetische Feldenergie ab, die über eine Leitung in Form modulierter hochfrequenter Wechselströme zugeführt wird. Im Falle eines Empfängers wird die Antenne durch ein äußeres elektromagnetisches Feld angeregt und das so erzeugte Signal anschließend elektronisch verstärkt und weiterverarbeitet. Je nach Frequenz oder Wellenlänge sowie Verwendungszweck gibt es die unterschiedlichsten Antennenformgebungen und -anordnungen.

Durch die außerordentlich dynamische Entwicklung der Mobilkommunikation nehmen die Anforderungen hinsichtlich der Kapazitäten (d.h. der maximalen Teilnehmerzahl) und der Übertragungsraten und -qualität von drahtlosen Kommunikationsnetzen ständig zu. Eine wesentliche Leistungssteigerung dieser Netzparameter lässt sich durch den Einsatz von so genannten Intelligenten (häufig auch „Adaptiven" oder „Smarten") Antennen erreichen. Hierunter versteht man Anordnungen aus mehreren Einzelantennen, deren Signale digital so aufbereitet werden, dass das abgestrahlte bzw. das empfangene Ergebnis möglichst optimal an bestimmte Vorgaben angepasst werden kann.

Eine relativ einfache Realisierung Intelligenter Antennen, die von vielen heutigen drahtlosen lokalen Netzen (WLAN, Wireless Local Area Network) bereits genutzt wird, ist die so genannte Antennendiversität (Diversity). Dabei werden empfangsseitig in geeignetem Abstand mehrere Antennen angebracht, wobei die nachgeschaltete Signalverarbeitungseinheit jeweils das Antennensignal mit der besten Qualität an den Empfänger durchschaltet (Switched Diversity). Eine Steigerung der Systemleistung kann darüber hinaus dadurch erreicht werden, dass sämtliche anliegenden Empfangssignale geeignet miteinander kombiniert werden (Diversity Combining). Das auf diese Art entstandene Mischsignal besitzt eine deutlich höhere Qualität als das Signal einer einzelnen Empfangsantenne. Ebenso lässt sich mit mehreren Empfangsantennen und geeigneter Signalverarbeitung die Richtung eines einfallenden Signals bestimmen. Eine wichtige Einsatzmöglichkeit gibt es in bestimmten Riskio- oder Gefahrensituationen. So können neuere Systeme z.B. die Richtung eines kleinen Senders, der in die Einsatzkleidung eines Feuerwehrmannes integriert ist, mit einer Genauigkeit von 1-2 Winkelgrad bestimmen.

Die Verwendung Intelligenter Antennen auf der Senderseite kann zur Senkung der Fehlerrate einer Übertragungsstrecke eingesetzt werden. Dabei strahlen mehrere Sendeantennen ein jeweils individuell aufbereitetes Signal ab. Empfängerseitig kann durch Anwendung einer geeigneten Signalverarbeitung das eigentliche Übertragungssignal mit einer wesentlich besseren Qualität rekonstruiert werden.

Eine weitere wichtige Anwendungsoption Intelligenter Antennen ist die adaptive Einstellung der Antennencharakteristik (Beamforming). Dabei wird das Abstrahl- bzw. Empfangsverhalten der aus mehreren Antennen bestehenden Anordnung gezielt, d.h. situationsgerecht, verändert. Auf diese Weise lässt sich eine stark gerichtete Abstrahlungs- oder Empfangscharakteristik erzeugen. So können z.B. gleichzeitig mehrere Teilnehmer

eines Netzes bei Nutzung der gleichen Frequenz mit extrem schmalen, sich nicht überlappenden Strahlungskeulen mit der Basisstation eines Mobilfunknetzes verbunden werden, ohne sich gegenseitig zu stören. Hierdurch ist eine erhebliche Steigerung der maximalen Teilnehmerzahl möglich. Da bei diesem Verfahren die verfügbare Sendeleistung auf einige schmale Strahlungskeulen konzentriert wird, ergibt sich weiterhin der Vorteil einer größeren Sende- bzw. Empfangsreichweite oder einer Reduktion der Sendeleistung für eine bestimmte Reichweite. Auch eine ständige Anpassung an die Bewegungen der einzelnen Teilnehmer wird möglich. Stellenweise werden derart arbeitende Antennen bereits in Basisstationen von Mobilfunknetzen eingesetzt.

Den derzeitigen Entwicklungsschwerpunkt bei Intelligenten Antennen stellen so genannte MIMO-Systeme (Multiple Input, Multiple Output) dar, bei denen sowohl sender- als auch empfangsseitig mehrere Antennen verwendet werden. Die Besonderheit bei MIMO ist, dass jedes einzelne Antennenelement ein individuelles Nutzsignal abstrahlt, wobei alle Elemente denselben Frequenzbereich verwenden. Somit kommt an jeder Empfangsantenne eine Überlagerung der verschiedenen Nutzsignale an. Zur empfängerseitigen Separierung der einzelnen Signale nutzt man die Tatsache, dass das Signal jeder einzelnen Sendeantenne auf Seiten der Empfängeranordnung eine spezielle Signatur, sozusagen einen charakteristischen Fingerabdruck, hinterlässt. Diese Signatur entsteht dadurch, dass sich ein Signal vom Sender zum Empfänger auf verschiedenen Wegen ausbreitet (z.B. direkt gerichtetes Signal plus an Wänden reflektiertes Signal). Diese so genannte Mehrwegeausbreitung führt in herkömmlichen Ein-Antennensystemen zu Signalstörungen, wird jedoch bei MIMO gezielt zur Identifizierung der Einzelsignale genutzt. Dabei gelingt die empfängerseitige Trennung der Einzelsignale umso besser, je stärker die Mehrwegeausbreitung zwischen Sender und Empfänger ausgeprägt ist, wie z.B. in Gebäuden oder urbanen Gebieten. Anwendungen des MIMO-Prinzips werden primär bei drahtlosen lokalen Netzen (WLAN) und dem neuen Mobilfunkstandard UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) gesehen. In beiden Fällen sind Steigerungen der derzeitigen Übertragungsraten um ein Mehrfaches möglichen.

Generell wird die zukünftige Entwicklung Intelligenter Antennen und hier insbesondere der MIMO-Technologie stark von den weiterhin zu erwartenden Fortschritten bei den Integrierten Schaltungen und der Digitalen Signalverarbeitung profitieren. Insbesondere die sinkenden Kosten digitaler Signalprozessoren werden eine weitere Verbreitung Intelligenter Antennen begünstigen.

September 2006 Thomas Euting

Supercomputer

Für technisch-wissenschaftliche Problemstellungen sind häufig Universalrechner mit sehr hoher Leistungsfähigkeit erforderlich. Die Geschwindigkeit solcher Supercomputer wird üblicherweise in Form von elementaren Rechenoperationen pro Sekunde gemessen (engl. Floating Point Operations per Second = Flops). Zur Bestimmung dieser Größe verwendet man einen standardisierten Satz von Anwendungsprogrammen, eine so genannte Benchmark. Bei der Erstellung der halbjährlich erscheinenden Top500, der Liste der 500 weltweit schnellsten Computer, wird z.B. die so genannte Linpack-Benchmark eingesetzt. Sie misst die Leistungsfähigkeit anhand der Lösung eines Systems von linearen Gleichungen. Der Anfang 2005 nach diesem Maßstab offiziell schnellste Supercomputer, der US-amerikanische Blue Gene/L, besitzt eine Rechenleistung von ca. 70 Teraflops (1 Tera = 1000 Giga = 10^{12}). Damit ist er mehr als zehntausendmal schneller als ein handelsüblicher Personalcomputer. Eine Benchmark weist allerdings immer nur eine begrenzte Aussagekraft im Hinblick auf die Geschwindigkeit eines Computers bei einer realen Anwendung auf.

Supercomputer sind Parallelrechner mit sehr vielen Prozessoren, die parallel an der Lösung eines Problems arbeiten. Die Parallelität kann z.B. durch die Verwendung von mehreren Prozessoren innerhalb eines einzelnen Computersystems realisiert werden. Mittlerweile existieren auch Prozessoren, welche mehrere Komponenten zur Befehlsverarbeitung, so genannte Prozessorkerne, enthalten. Ein spezieller Typ von Prozessoren für Supercomputer verarbeitet nicht einzelne Zahlen, sondern Zahlenkolonnen (Vektoren). Auf diese Weise können sie bei geeigneten Anwendungen eine höhere Geschwindigkeit als herkömmliche Prozessoren erzielen. Aufgrund der höheren Kosten wird diese Technologie heute allerdings eher selten eingesetzt.

Parallelrechner können auch durch die Vernetzung mehrerer einzelner Computer konstruiert werden, so dass deren Rechenleistung in Form eines so genannten Computer-Cluster gebündelt werden kann. Auf diese Weise kann z.B. mit Hilfe einer großen Anzahl handelsüblicher Computer ein vergleichsweise kostengünstiger Supercomputer realisiert werden. In engem Zusammenhang zu den Computer-Clustern steht der vergleichsweise neue Ansatz des so genannten Grid Computing. Er ermöglicht eine effizientere und vereinfachte Nutzung der Rechenleistung von mehreren vernetzten Computern, indem solche Systeme für einen Benutzer oder eine Softwareanwendung als ein einzelner großer Computer erscheinen. Diese Vorgehensweise erlaubt auch eine Bündelung von weltweit verteilten Computerressourcen zu einem virtuellen Supercomputer. Allerdings sind dessen Nutzungsmöglichkeiten aufgrund des langsamen Datenaustausches der einzelnen Computer untereinander entsprechend eingeschränkt.

Bei der Konstruktion von Supercomputern werden häufig die beschriebenen unterschiedlichen Architekturmerkmale miteinander kombiniert. Dadurch können Systeme mit mehreren tausend Prozessoren entstehen. Bei Blue Gene/L gelangen sogar über 30.000 Prozessoren zum Einsatz. Für eine effiziente Ausnutzung der Rechenleistung eines Parallelrechners ist es u.a. erforderlich, dass das zu untersuchende Problem und die eingesetzte Software einen ähnlich hohen Parallelisierungsgrad aufweisen wie die Computer-

hardware. Systeme mit einigen leistungsfähigen Prozessoren erfordern dabei ein geringeres Maß an Parallelität als Systeme mit sehr vielen langsameren Prozessoren. Daher können sie im Vergleich zu diesen bei gewissen Problemstellungen Vorteile aufweisen.

Eine Hauptanwendung von Supercomputern stellen rechenintensive wissenschaftliche Simulationen dar. Aufgrund der ständig steigenden Rechengeschwindigkeit von Computern ergänzen derartige Simulationen in den Wissenschaften zunehmend die etablierten Methoden von Theorie und Experiment im Rahmen der so genannten Computational Science. Eine wichtige Anwendung bildet hier die Simulation des Systems Erde, z.B. im Hinblick auf Wettervorhersagen, Klimaveränderungen, Erdbebenentstehung oder Vulkanismus. Andere Einsatzgebiete liegen in den Materialwissenschaften sowie der Teilchen- und Astrophysik. Neben diesen wissenschaftlichen Anwendungen existieren auch eher kommerziell-orientierte Einsatzgebiete für Supercomputer. Beispiele hierfür sind Crashsimulationen in der Automobilindustrie, die Modellierung von Märkten in der Finanzwelt oder geophysikalische Simulationen in der Erdölexploration.

Es ist zu erwarten, dass sich die Leistungsfähigkeit von Supercomputern auch in Zukunft weiter erhöhen wird. Hierdurch werden sowohl Simulationen von immer komplexeren Prozessen und Systemen als auch zunehmend genauere und detailliertere Simulationen ermöglicht. Den nächsten Meilenstein im Hinblick auf die Rechengeschwindigkeit von Supercomputern werden die so genannten Petaflops-Systeme bilden (1 Peta = 1000 Tera = 10^{15}). Eine wissenschaftliche Anwendung, welche u.a. von dieser hohen Leistung profitieren würde, ist die Berechnung der so genannten Proteinfaltung. Hierbei wird untersucht, auf welche Weise die komplexe dreidimensionale Struktur eines Proteins durch dessen chemische Zusammensetzung bestimmt wird. Weitere Einsatzgebiete umfassen z.B. die Berücksichtigung von quantenmechanischen Effekten bei Simulationen im Bereich der Nanotechnologie oder Arbeiten auf dem Gebiet der kontrollierten Kernfusion.

Zur Zeit gibt es mehrere Entwicklungsansätze, mit deren Hilfe in Zukunft eine deutliche Zunahme der Rechenleistung von Supercomputern erreicht werden soll. Eine Möglichkeit besteht in der weiteren Erhöhung der Parallelität der Hardwarearchitektur durch eine erhebliche Steigerung der Anzahl der Prozessoren bzw. Prozessorkerne. Ein anderes Konzept sieht den Einsatz einer geringeren Anzahl von wesentlich schnelleren Prozessoren vor. Hierzu sollen supraleitende Prozessoren verwendet werden, die höhere Arbeitsgeschwindigkeiten als herkömmliche Prozessoren erlauben. Ein weiterer Ansatz zur Steigerung der Rechengeschwindigkeit liegt in der Verringerung der Zeitspannen, in denen Prozessoren auf Daten aus dem Arbeitsspeicher warten müssen. Eine mögliche Lösung hierfür ist die gemeinsame Integration von Prozessorlogik und Speicher auf demselben Chip (Processor in Memory). Langfristig könnten Supercomputer auf der Basis von Quantencomputern entstehen, um deren hohen Grad an Parallelität auszunutzen.

Juli 2005 Klaus Ruhlig

RFID-Technologie

Als RFID-Systeme (RFID = Radio Frequency Identification) bezeichnet man mit Mikrochips ausgestattete Etiketten (engl.: Tags), die auf Gegenstände aufgebracht werden. Ihr Speicherinhalt, der den entsprechenden Gegenstand eindeutig zu identifizieren vermag, lässt sich berührungsfrei über Funk auslesen und unter Umständen auch verändern. In der letzten Zeit hat die RFID-Technologie durch die Möglichkeiten zur kostengünstigen Fertigung solcher Etiketten in großen Stückzahlen einen starken Aufschwung erfahren. Ein großes Anwendungsgebiet für RFID-Systeme liegt in der Logistik, wo sie zur Detektion und eindeutigen Identifikation einzelner Artikel eingesetzt werden können. Mit ihrer Hilfe lassen sich z.B. Lagerbestände überwachen, Warenflüsse verfolgen oder sogar das berührungsfreie Scannen und Bezahlen in einem Supermarkt realisieren. Ebenso können aber auch mit diesen Funketiketten ausgestattete Personen authentifiziert werden, z.B. zum Zweck der Zugangskontrolle.

Im Prinzip handelt es sich bei einem RFID-Etikett um einen Transponder (Sender/Antwortgeber), der aus einem auf die genutzte Funkfrequenz abgestimmten Schwingkreis mit Antenne besteht. Der Schwingkreis wird aus einem Kondensator, dessen Funktion der Mikrochip übernimmt, und einer Spule, die in vielen Fällen gleichzeitig als Antenne dient, gebildet. Über ein externes Lese-/Schreibgerät wird das System über Funk angesprochen und zur Aussendung der gespeicherten Daten veranlasst bzw. mit neuen Daten beschrieben. Die erforderliche Sendeenergie entnimmt der Transponder in den meisten Fällen dem vom Lese-/Schreibgerät erzeugten elektromagnetischen Feld, so dass keine eigene Stromversorgung benötigt wird. Nur für einige energieintensive Anwendungen, z.B. zur Überbrückung hoher Reichweiten, werden aktive Transponder mit eigener Stromversorgung realisiert, bei denen das externe Feld nur der Abfrage dient.

Bei der Systemauslegung lassen sich generell drei Typen von RFID-Systemen unterscheiden. Die einfachste Variante dient nur der Übermittlung festgelegter und nicht änderbarer Nummern. Die dort verwendeten Chips verfügen lediglich über einen auslesbaren Speicher (ROM = Read Only Memory), der bei der Herstellung beschrieben wird. Hauptanwendungen dieser Systeme sind die Erfassung von Artikelnummern sowie die Identifizierung von Tieren, denen zu diesem Zweck in Glaskapseln eingebettete Transponder unter die Haut injiziert werden. Zur Übertragung sich ändernder Daten eignet sich der zweite Typ von RFID-Systemen, die neben dem ROM einen wiederbeschreibbaren Speicher, meistens einen EEPROM (Electrically Erasable Programmable ROM), enthalten. Die letzte Kategorie beinhaltet Chips, die zusätzlich zum Speicherbereich über einen Mikroprozessor verfügen, der die Implementierung und Verarbeitung verschiedener Anwendungsprogramme ermöglicht. Im Prinzip handelt es sich um einen kleinen Computer. Dieser Typ von Funketiketten deckt prinzipiell das gesamte Anwendungsfeld der kontaktbehafteten Smart Cards ab und tritt daher in direkte Konkurrenz zu diesen. Auf RFID-Basis lassen sich somit auch kontaktlose Smart Cards realisieren. Zu den potenziellen Anwendungsfällen zählen u.a. die wiederaufladbare elektronische Geldbörse sowie komplexe Authentifizierungsverfahren unter Nutzung kryptographischer Protokolle. Dar-

über hinaus werden RFID-Systeme entwickelt, die bei Kopplung mit einer geeigneten Sensorik einige mit der Nutzung von Werkzeugen und Bauteilen zusammenhängende interessante Daten wie z.B. die Häufigkeit des Gebrauchs oder die Belastung speichern und auf Anfrage drahtlos übermitteln.

Viele RFID-Systeme arbeiten in einem Frequenzbereich um 10 MHz. Dieser besitzt den Vorteil, dass sich die notwendige Spule kostengünstig auf eine Folie drucken lässt, da sie nur wenige Windungen benötigt. Mit solchen Transpondern lassen sich aufgrund der begrenzten Sendeleistung sowie der in diesem Frequenzbereich herrschenden Ausbreitungsbedingungen Reichweiten bis etwa 1 m erzielen. Höhere Reichweiten, bis zu einigen Metern, lassen sich im Frequenzbereich um 130 kHz erreichen, der bei Verfahren der einfachen Zugangskontrolle und der Tieridentifikation genutzt wird. Jedoch erfordern diese Systeme aufwendigere und kostenintensivere Aufbauten. Die in beiden Frequenzbereichen arbeitenden Funketiketten machen sich das Prinzip der induktiven Kopplung zu Nutze, bei dem sie dem abfragenden Feld die notwendige Sendeenergie entnehmen. In beiden Fällen wirkt die aufgebrachte Spule auch als Antenne.

Für Anwendungen, die eine Reichweite von einigen Metern bei hoher Lesegeschwindigkeit benötigen, wie sie in der Logistik oftmals erforderlich sind, werden Frequenzen im UHF-Bereich (300 MHz–3 GHz) erwogen, in dem das so genannte Backscatter-Verfahren zur Anwendung kommt. Hierbei reflektiert der Transponder einen Teil der vom Lesegerät abgestrahlten Energie und überträgt auf diesem Wege die Daten. Die kurzen Wellenlängen dieses Frequenzbereiches erlauben die Verwendung eines Dipols mit kleinen Abmessungen, welcher anstelle der nach wie vor vorhandenen Spule als Antenne dient. In den USA, in Europa und in Japan werden für passive RFID-Systeme innerhalb des UHF-Bereiches unterschiedliche Frequenzbänder diskutiert. Hier wäre eine internationale Standardisierung wünschenswert, die derzeit jedoch nicht in Sicht ist. Realisierte aktive Transponder arbeiten ebenso im UHF-Bereich, wobei sie Reichweiten bis zu 15 m erzielen.

Da sich RFID-Chips unbemerkt auslesen lassen, selbst wenn keine direkte Sichtverbindung zum Lesegerät besteht, weckt ihr Gebrauch datenschutzrechtliche Bedenken. Speziell wird hier die Gefahr der eindeutigen Zuordnung einzelner Artikel zu bestimmten Personen gesehen. Diesen Bedenken stehen jedoch die Vorteile in der Logistik, die erwähnten nutzerfreundlichen Anwendungen sowie weitere nützliche Einsatzgebiete wie z.B. das Markieren von Medikamenten oder die Identifizierung problematischer und insbesondere schadstoffenthaltender Güter gegenüber. Diskutiert wird weiterhin die Speicherung biometrischer Daten auf RFID-Chips in Reisepässen. Stark profitieren dürfte die RFID-Technologie in Zukunft von in Entwicklung befindlichen Herstellungsverfahren, mit denen sich kostengünstig Polymerschaltungen direkt auf eine Substratfolie drucken oder stempeln lassen.

Juli 2004 Thomas Euting

Authentifizierungs- und Identifizierungsverfahren

Der hinreichende Schutz von Informationen vor unberechtigtem Zugriff sowie der Nachweis ihrer Echtheit aber auch die Sicherung des Zugangs zu bestimmten Räumlichkeiten spielen in allen Bereichen von Staat und Wirtschaft eine immer größere Rolle. Daher werden auch die hierfür erforderlichen Verfahren immer wichtiger. Sie umfassen einerseits alle Prozesse zur Authentifizierung und Identifizierung von Personen sowie andererseits die Überprüfung von (in der Regel elektronisch gespeicherten) Informationen, deren Urheberschaft und Unverletztheit (Integrität) sicherzustellen ist.

Eine weit verbreitete Form der Personenauthentifizierung basiert auf dem Einsatz von Passwörtern. Diese sind entweder, wie bei der Anmeldung an ein Informationsystem, an eine Benutzerkennung oder, wie im Falle der PIN beim Geldautomaten, zusätzlich an den Besitz einer Chipkarte gekoppelt. Passwörter können grundsätzlich vom Benutzer selbst gewählt oder von einem System ohne Einfluß des Benutzers generiert werden. Benutzergewählte Passwörter zeichnen sich in der Regel durch eine leichte Merkbarkeit aus, was sich jedoch oftmals nachteilig auf deren Sicherheit auswirkt. Dagegen besitzen systemgenerierte Passwörter eine höhere Sicherheit, sind jedoch in der Regel schlechter merkbar. Der generellen Gefahr des Bekanntwerdens kann durch den Einsatz von Einmal-Passwörtern, die jeweils nur für eine einzige Authentifizierung gültig sind, begegnet werden.

Eine Verallgemeinerung von Passwortverfahren stellen die sogenannten Challenge-Response-Verfahren dar, bei denen es sich um eine Art Frage-Antwort-Spiel handelt. Dabei generiert die Prüfinstanz eine in mathematischer Form vorgelegte Frage (Challenge), auf welche die zu authentifizierende Person die korrekte Antwort (Response) erbringen muss. Realisieren lassen sich Challenge-Response-Verfahren auf kryptographischem Wege. Die Prüfinstanz erzeugt eine Zufallszahl, die durch die zu authentifizierende Person unter Zuhilfenahme eines nur beiden Seiten bekannten Schlüssels zu kodieren ist.

Eine spezielle Form von Challenge-Response-Verfahren sind die Zero-Knowledge-Verfahren, die ein recht junges und intensives Forschungsgebiet darstellen. Hierbei hat die zu authentifizierende Person nach Aufforderung die Kenntnis eines Geheimnisses (z.B eines oder mehrerer kryptographischer Schlüssel) nachzuweisen, ohne dieses selber preiszugeben. Die Prüfinstanz gelangt somit während des Authentifizierungsprozesses nicht in den Besitz dieses Geheimnisses, dass dadurch eine hohe Sicherheit geniesst. Die Zero-Knowledge-Verfahren eignen sich wie alle Challenge-Response-Verfahren für eine chipkartenbasierte Abwicklung, wobei einerseits die Chipkarte die entsprechende geheimen Informationen in sicherer Form gespeichert bereithält und die notwendigen Berechnungen ausführt sowie andererseits die Authentifizierung zusätzlich an den Besitz der Chipkarte gekoppelt ist.

Den Biometrischen Verfahren wird mittel- und langfristig eine große Bedeutung zugemessen. Sie basieren auf der Identifizierung einer Person anhand gewisser nahezu unverwechselbarer körpereigener Merkmale. Eine Vielzahl von Biometrischen Verfahren befinden sich in der Entwicklung bzw. sind teilweise bereits im Einsatz. Hierzu gehören

Fingerabdrucksysteme, Iris- und Retinaerkennung im Augenbereich, Gesichts- und Handgeometrieerkennung, Stimmerkennung sowie die Analyse von Lippenbewegung oder Handschrift. Weiterhin diskutiert wird eine Identifizierung anhand der DNA, was jedoch rechtliche und ethische Fragestellungen aufwirft. Die meisten Biometrischen Verfahren müssen durch zusätzliche Maßnahmen sicherstellen, dass das untersuchte Merkmal wirklich von einer lebenden Person stammt. Insbesondere im multimodalen Einsatz, bei welchem mehrere Merkmale einer Person unabhängig voneinander gemessen und zu einem Gesamtergebnis ausgewertet werden, lassen sich hohe Sicherheitsstandards erzielen.

Die Authentifizierung von elektronisch verfügbaren Dokumenten erfolgt grundsätzlich mit Hilfe von Signaturverfahren, bei denen dem Dokument eine aus seinem Inhalt abgeleitete und mit diesem eindeutig assoziierbare Signatur beigefügt wird. Jegliche Änderung an dem Dokument verändert diese Signatur und ist damit feststellbar. Darüber hinaus können mit einer so genannten Digitalen Signatur sowohl die Integrität als auch die Urheberschaft eines Dokuments geprüft werden. Diese wird unter Zuhilfenahme eines geheimen kryptographischen Schlüssels nur von dessen Inhaber erzeugt und ist damit dieser Person eindeutig zugeordnet. Nachteilig bei der Verwendung Digitaler Signaturen ist die Notwendigkeit zur Realisierung einer umfangreichen Infrastruktur zur Erzeugung, Verteilung, Verwaltung und Zertifizierung von Schlüsseln. Inzwischen hat die Digitale Signatur in Deutschland nach Inkrafttreten des so genannten Signaturgesetzes den gleichen juristischen Stellenwert wie eine eigenhändige Unterschrift.

Im Zusammenhang mit ausführbaren Programmcodes tritt oftmals die Frage auf, ob darin Funktionalitäten enthalten sind, die der Sicherheit des Informationssystems abträglich sind, auf dem sie installiert werden sollen, oder diesem sogar explizit schaden sollen. Einen Lösungsansatz hierfür bietet das relativ neue Konzept des Proof-Carrying-Codes (PCC). Hierbei handelt es sich um eine formale Darstellung einer im Informationssystem niedergelegten und interaktiv zugänglichen Sicherheitsstrategie. Nach Laden des Programms muss von diesem vor seiner Ausführung mit Hilfe der PCC der Beweis erbracht werden, dass es die Sicherheitsstrategie des Systems nicht verletzt. Kann dieser Beweis nicht erbracht werden, wird das Programm nicht ausgeführt. Dieses Konzept befindet sich derzeit im Entwicklungsstadium und kann auf eine allgemeine Benutzerauthentifizierung erweitert werden.

Februar 2003 Thomas Euting

Betriebssysteme

Als Betriebssystem wird eine Gruppe von Programmen bezeichnet, die als fester Bestandteil einer Rechneranlage für deren Betrieb und für die Ausführung der Anwenderprogramme erforderlich ist. Es bereitet u.a. die vom Benutzer eingegebenen Daten auf, steuert den Prozessoreinsatz, verwaltet die gespeicherten Dateien, gewährleistet die Datensicherung und kontrolliert angeschlossene periphere Geräte, wie z.B. Drucker, Scanner und Festplatten. Das Spektrum der heute verfügbaren Betriebssysteme reicht von Systemen für Großrechner (Mainframes) über Mini- und Mikrorechner (Arbeitsplatzrechner, Workstations) bis hin zu tragbaren Computern (Notebook, Laptop, Handheld Computer).

Eine wichtige Klassifizierung von Betriebssystemen erfolgt nach der Anzahl der gleichzeitig laufenden Programme. Man unterscheidet zwischen Einzelprogramm- (singletasking) und Mehrprogrammbetrieb (multitasking). Singletasking bedeutet, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt nur ein einziges Programm abläuft und mehrere Programme nacheinander ausgeführt werden. Ein Multitasking-System kann mehrere Programme gleichzeitig unabhängig voneinander ausführen. Über diese Fähigkeit verfügen alle modernen Betriebssysteme.

Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit von Betriebssystemen bildet die Anzahl der Nutzer. Im so genannten Single-User-Mode steht der Rechner nur einem Benutzer zur Verfügung, während sich im Multi-User-Mode mehrere über Terminals oder Netzwerkverbindungen mit dem System verbundene Benutzer die Computerleistung teilen.

Betriebssysteme sind schichtartig aufgebaut. Jede Schicht kann als virtuelle Maschine angesehen werden, die mit benachbarten Schichten über streng definierte Schnittstellen kommuniziert. Sie kann Funktionen für die nächsthöhere Schicht zur Verfügung stellen, aber auch Funktionen der nächstniedrigeren Schicht aufrufen. Die Gesamtheit der von einer Schicht angebotenen Funktionen wird auch als Dienste dieser Schicht bezeichnet. Ihre Nutzung wird durch Protokolle geregelt. Die unterste Schicht eines Betriebssystems wird Systemkern (Kernel) genannt. Sie greift direkt auf die Hardware zu und steuert die Grundfunktionen (Prozessorverwaltung, Speicherverwaltung usw.) des Systems. Die äußere Schicht des Betriebssystems bilden anwendungsnahe Programme, wie z.B. Kommunikations- und Netzwerkdienste oder auch Dateiverwaltungssysteme.

Moderne Rechnersysteme können sich vielfältig in Bezug auf ihre Hardwareausstattung unterscheiden, wie z.B. Speicherkomponenten, Prozessorleistung sowie Art und Umfang der angeschlossenen Geräte. Damit nicht für jede beliebige Hardwarezusammenstellung ein eigenes Betriebssystem programmiert werden muss, sind die heutigen Betriebssysteme modular aufgebaut. Sie enthalten austauschbare Programmmodule und lassen sich damit an die jeweilige Hardwarekonfiguration anpassen.

Die am weitesten verbreiteten Betriebssysteme sind MS DOS, MS WINDOWS sowie UNIX und UNIX-Derivate. Im Spektrum der WINDOWS-Programme der Firma MICROSOFT kann allerdings erst ab dem Programm WINDOWS 95 von einem vollwertigen Betriebssystem

gesprochen werden, da es sich bei früheren Versionen um grafische Benutzeroberflächen auf Basis des Systems DOS handelte.

Eines der ältesten Betriebssysteme, das bis heute als Vorbild für die Entwicklung in diesem Bereich angesehen werden kann, ist das 1971 entstandene relativ universelle System UNIX. Es ist multitasking- und multiuserfähig und inzwischen für jede Hardwareplattform verfügbar. Als weitere Version von UNIX wurde Mitte der 90er Jahre das System LINUX initiiert und wird seitdem von einer sehr großen Gruppe von Programmierern als so genanntes Open-Source-Betriebssystem ständig weiterentwickelt.

Der Begriff Open Source bedeutet hierbei, dass der Quellcode der Software für die Benutzer öffentlich zugänglich ist. Darüber hinaus hat der Anwender sogar die Möglichkeit, den Quellcode zu verändern, sofern er dies kenntlich macht. Open-Source-Systeme bieten ein höheres Sicherheitsniveau, da der frei verfügbare Quellcode auf Sicherheitslücken untersucht werden kann. Im Notfall können eventuelle Schwachstellen schneller abgesichert werden. Bei unbekanntem Code können dagegen nur Tests auf vermutete Schwächen ausgeführt werden.

Die derzeit weiteste Verbreitung im Mini- und Mikrorechnerbereich haben die Betriebssysteme der Produktionsreihe MS WINDOWS, für die gerade im Bereich der Büro- und Homecomputer von einer anhaltend hohen Bedeutung ausgegangen werden kann. In den nächsten zehn Jahren dürfte ihre Bedeutung jedoch zugunsten von Open-Source-Produkten wie LINUX zurückgehen. Insbesondere für Homecomputer wird LINUX stark an Bedeutung gewinnen und mit WINDOWS gleichziehen. So kann prognostiziert werden, dass sich LINUX im Bereich der Minirechner zum wichtigsten Betriebssystem entwickeln wird. Bei Großrechnern hat UNIX einen anhaltend hohen Anteil und vorerst sind auch keine Verschiebungen in Richtung LINUX in Sicht. Der Grund liegt im hohem Entwicklungs- und Kostenaufwand in diesem Bereich, so dass hier erst Neuentwicklungen der Anbieter von Großrechner-Software abzuwarten sind.

August 2002 Denise Köppen

Programmiersprachen

Zur Formulierung der von einem Computer zu bearbeitenden Aufgabenstellung benutzt man Programmiersprachen. Grundsätzlich wird zwischen den stark systemabhängigen maschinennahen Sprachen und den weitgehend systemunabhängigen höheren Sprachen, die sich im wesentlichen an den zu lösenden Problemen orientieren, unterschieden. Aufgrund der großen Bandbreite der in Frage kommenden Anwendungsbereiche hat sich hier in den letzten Jahrzehnten eine enorme Sprachenvielfalt entwickelt.

Charakteristisches Merkmal der frühesten höheren Programmiersprachen ist ihre Befehlsorientierung, d.h. das Programm besteht aus einer Folge von Befehlen. Zu diesen so genannten imperativen Sprachen gehören vor allem FORTRAN und ALGOL 60 für wissenschaftlich-technische sowie COBOL für kommerzielle Anwendungen. Für die Entwicklung weiterer wichtiger imperativer Sprachen, wie z.B. PASCAL und C sowie die im militärischen Bereich in den USA und in Deutschland weit verbreitete Sprache ADA, war ALGOL 60 von entscheidender Bedeutung.

Parallel zu den imperativen Sprachen entwickelten sich die so genannten funktionalen (z.B. LISP oder MIRANDA) und logischen Sprachen (wie PROLOG). Im Konzept der funktionalen Programmierung werden die elementaren Module eines Programms als Funktionen im mathematischen Sinne repräsentiert. Die logischen Sprachen dienen zur Darstellung aussagenlogischer Zusammenhänge. Ihr wichtigster Anwendungsbereich ist die Künstliche Intelligenz.

Seit einiger Zeit hat das Prinzip der so genannten Objektorientierten Programmierung (OOP) zunehmend an Bedeutung gewonnen. Hier werden Programme in Sinneinheiten (Objekte) aufgeteilt, in denen die zugehörigen Operationen mit den benötigten Daten zusammengeführt werden. Durch diese so genannte Kapselung wird die Modularisierung von Programmen verbessert, was die Wiederverwendung und Erweiterung von Software erleichtert und die Entwicklungszeit für neue Produkte drastisch verkürzt.

Viele konventionelle imperative Sprachen wurden nachträglich um OOP-Konzepte erweitert. So entstanden z.B. das sehr weit verbreitete C++ sowie ADA 95. Die wohl bekannteste rein objektorientierte Sprache ist JAVA, deren Syntax sich sehr stark an die von C++ anlehnt. Ursprünglich für das interaktive Fernsehen entwickelt, fand JAVA wegen der fehlenden Akzeptanz dieses Mediums zunächst keinen Markt. Aufgrund der anwenderseitigen Prozessorunabhängigkeit und der Vorteile der OOP erfuhr diese Sprache jedoch inzwischen eine weite Verbreitung im Hypertextbereich des Internet. Als Konkurrenzprodukt zu JAVA ist vor kurzem C# („sharp“) als neuer Vertreter der C-Familie auf dem Markt erschienen. Allerdings scheint diese Sprache entsprechend der kommerziellen Zielsetzung mehr Gemeinsamkeiten mit JAVA als mit C++ zu haben.

In den letzten Jahren wurden mehrere so genannte Skriptsprachen entwickelt, welche die Automatisierung von wiederkehrenden, zumeist systembezogenen Arbeiten ermöglichen. Ein wichtiger Einsatzbereich ist die Gestaltung interaktiver Webseiten. Beispiele hierfür sind JAVAScript und VBScript. Der Hauptunterschied zu herkömmlichen Programmiersprachen liegt darin, dass hier Syntax und Regeln weniger starr und komplex

sind. Generell gewinnen Skriptsprachen an Akzeptanz, da sie aufgrund ihres hohen Abstraktionsgrades vergleichsweise leicht erlernbar sind und ein schnelles Entwickeln von Software-Prototypen, das so genannte Rapid Application Development, erlauben.

Für die Zukunft ist nicht davon auszugehen, dass sämtliche durch Computer zu bearbeitende Problemstellungen sinnvoll durch eine einzige universelle Programmiersprache abgedeckt werden können. Auch sieht es derzeit nicht so aus, als wären wirklich neue sprachliche Entwicklungen zu erwarten. Ein großes Hemmnis ist hierbei die Tatsache, dass heute die Tätigkeit des Programmierens zum größten Teil aus der Anpassung vorhandener Programmsysteme besteht, die auf gut etablierten Sprachen basieren. So sind z.B. FORTRAN und COBOL noch weit verbreitet. In erster Linie ist daher damit zu rechnen, dass ältere Sprachen ergänzt anstatt durch Neuentwicklungen ersetzt werden, d.h. es gibt einen Trend zur ständigen Verbesserung der Programmierwerkzeuge vorhandener Sprachen. In diesem Zusammenhang ist seit kurzem ein als Aspektorientierte Programmierung (AOP) bezeichnetes Konzept im Gespräch, das die Wartbarkeit und Wiederverwertbarkeit objektorientierter Software weiter verbessern soll. Hierzu werden technische Anforderungen wie z. B. Plausibilitätskontrollen oder Fehlerbehandlung in so genannte Aspekte gekapselt. AOP-Unterstützung wird für JAVA und jüngst auch für C++ angeboten.

Einen ganz neuen Ansatz verfolgt das zur Zeit in der Entwicklung befindliche Konzept des Intentional Programming. Dieses hat zum Ziel, Programmierer von der Festlegung auf eine konkrete Programmiersprache zu entbinden. Hierzu werden in einer Datenbank Abstraktionen (z. B. bedingte Anweisungen, Schleifen) verwaltet, für die mehrere Implementierungen unterschiedlicher Programmiersprachen vorliegen können. So ist es möglich, Quellcodes mehrerer Programmiersprachen ineinander einzubetten. Sollte sich das Intentional Programming durchsetzen, wird es die Softwareentwicklung entscheidend verändern. Künftig wird dann aus einem sprachunabhängigen Angebot die am besten geeignete Abstraktion ausgewählt werden können. Dies führt dazu, dass nicht Programmiersprachen sondern Abstraktionen eine maßgebliche Weiterentwicklung erfahren werden.

Januar 2002 Frank Pfeil

Powerline-Kommunikation

Unter Powerline-Kommunikation versteht man die Übertragung von Daten über die Leitungen des Energieversorgungsnetzes, des sogenannten Stromnetzes. Ihr großer Vorteil liegt darin begründet, daß sie ein bereits existierendes und dabei feinverzweigtes Netz, welches fast jedes Zimmer erreicht, zur Übertragung nutzen könnte. Insbesondere ließe sich mit Hilfe der Powerline-Kommunikation nahezu jedes Gebäude, unabhängig von der vorhandenen Telekommunikationsinfrastruktur, ohne großen Aufwand nachträglich vernetzen.

Bei der zukünftigen Entwicklung der Powerline-Kommunikation sind einerseits der räumliche Anwendungsbereich und andererseits das zu erwartende Dienstespektrum zu betrachten. Beim räumlichen Anwendungsbereich konzentrieren sich die derzeitigen Anstrengungen auf die sogenannte Ortsnetzzelle, die von der Ortsnetztrafostation bis zum Endkunden reicht. Dieses Gebiet, welches beim Telefonnetz der Telekom dem Bereich zwischen Ortsvermittlungsstelle und Endkunden (der sog. „letzten Meile") entspricht, umfaßt in der Regel etwa einige zehn bis maximal 200 Hausanschlüsse und erstreckt sich über eine Entfernung von einigen hundert Metern. Die Kommunikation außerhalb der Ortsnetzzelle soll dann über ein sog. Backbonenetz erfolgen. Hierbei bieten sich die von den Energieversorgungsunternehmen parallel zur Stromleitung verlegten Lichtwellenleiterverbindungen an. Es gibt jedoch Überlegungen, auch diese Kommunikation über das Stromnetz abzuwickeln, was jedoch aufgrund der hierarchischen Struktur des Stromnetzes (Hoch-, Mittel- und Niederspannungsbereich) und der damit verbundenen Netzübergänge und unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen mit Schwierigkeiten verbunden ist.

Beim zukünftigen Dienstespektrum haben sich bisher drei Kategorien herauskristallisiert, nämlich die energienahen Dienste, die Dienste der Gebäudeautomatisierung und die Telekommunikationsdienste. Energienahe Dienste stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit der Stromversorgung, wie z.B. Zählerstandsfernabfrage, Laststeuerung oder Übermittlung kundenspezifischer Daten. Bei der Gebäudeautomatisierung wird an die Steuerung und Überwachung hausinterner Vorgänge („smart home") gedacht, wie z.B. Ein- und Ausschalten von Verbrauchern, Raumklimaüberwachung, Steuerung von Alarmanlagen etc. Die Telekommunikationsdienste umfassen letztendlich die gesamte Palette der Übertragung multimedialer Daten wie die Übermittlung von Telegrammen, Telefaxen und E-Mails sowie die Sprachübertragung und den Internetzugang.

Für die Realisierung der Powerline-Kommunikation ist in Europa das sogenannte CENELEC-Band freigegeben, welches von 9 kHz bis 148,5 kHz reicht und in vier Teilbänder untergliedert ist. Wie sich gezeigt hat, lassen sich innerhalb dieses recht schmalen Frequenzbereiches, welcher derzeit Übertragungsraten von maximal 27 kbit/s ermöglicht, die energienahen Dienste und die Dienste der Gebäudeautomatisierung zufriedenstellend realisieren. Insbesondere im Bereich der Gebäudeautomatisierung konnte mit der Entwicklung des „European Home System" (EHS) ein leistungsfähiges System auf dem Markt etabliert werden. In den USA ist dagegen über das CENELEC-Band hinausgehend der Frequenzbereich bis 500 kHz für die Powerline-Kommunikation freigegeben. Genutzt

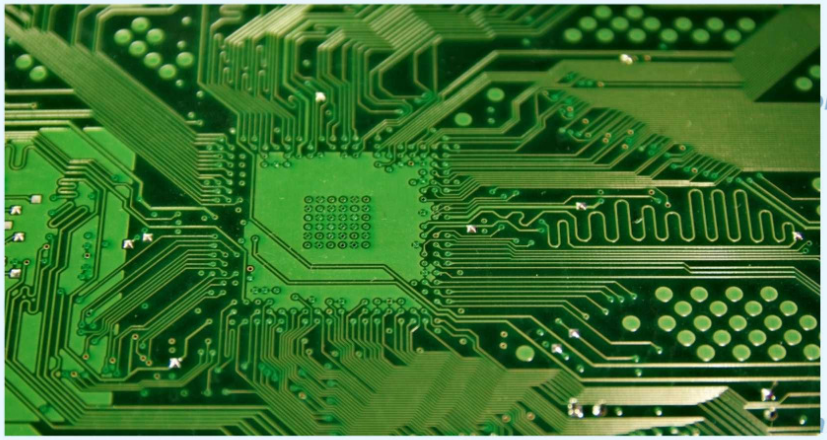
wird dieser Frequenzbereich ausschließlich von energienahen Diensten und Diensten der Gebäudeautomatisierung.

Die innerhalb des CENELEC-Bandes erreichbaren Übertragungsraten erlauben jedoch keine Telekommunikationsdienste. Zur Abwicklung von Telekommunikationsdiensten mit Hilfe der Powerline-Kommunikation werden höhere Frequenzbereiche benötigt, deren Erschließung den Schwerpunkt der derzeitigen Untersuchungen darstellt. Die Schwierigkeit bei der Nutzung höherer Frequenzen liegt darin, daß das Stromnetz nicht für diese Frequenzen konzipiert wurde und es deshalb an einer hochfrequenztechnischen Konditionierung fehlt. Aus diesem Grund lassen sich Frequenzen bis maximal etwa 20 MHz nutzen. Unter Nutzung dieses Frequenzbereiches ließen sich bisher im Versuchsstadium Übertragungsraten von etwa 2 Mbit/s erreichen, was für Telekommunikationsanwendungen ausreichen würde. Bisher mußte dabei jedoch das Datensignal beim Endkunden (am sog. Hausanschlußpunkt) aus der Stromleitung ausgekoppelt und über eine separate Datenleitung zum Endgerät geführt werden. Eine Nutzung der hausinternen Stromleitung erscheint nur mit Hilfe hochfrequenztechnischer Signalaufbereitung am Hausanschlußpunkt möglich; diese Variante wird derzeit ebenfalls untersucht.

Das größte Hindernis bei der Nutzung über das CENELEC-Band hinausgehender Frequenzbereiche ist jedoch die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), da aufgrund der fehlenden hochfrequenztechnischen Konditionierung des Stromnetzes mit einem umfangreichen Störszenario zu rechnen ist. Hierbei wirken einerseits verschiedene Störgrößen auf die Powerline-Kommunikation ein, andererseits tritt diese selber als Störer anderer Systeme in Erscheinung. Aus diesem Grund sind bisher in Europa keine weiteren Frequenzbereiche als diejenigen des CENELEC-Bandes für die Powerline-Kommunikation freigegeben. Zur Nutzbarmachung höherer Frequenzbereiche wird derzeit intensiv an den Problemen der EMV gearbeitet.

Dezember 1999 Thomas Euting

Wissen & Information

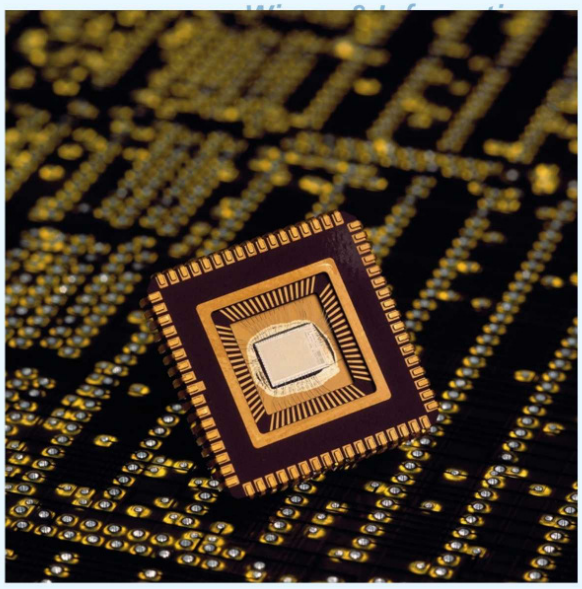


rmation

nformation

Wissen & Information

Wissen & Information



Wissen & Information

Elektronik

2009

Spintronik

2008

2007

Neue Halbleiter

2006

Polytronik

2005

2004

2003

Bioelektronik

2002

Magnetoelektronik

2001

Halbleiter-Leistungselektronik

Molekularelektronik

2000

1999

1998

ASICs

Galliumarsenid-Technologie

Speicherbausteine

1997

Werkstoffe der Mikroelektronik

Mikroelektronik

Chipfertigung

1996

Mikroprozessoren



Spintronik

Die wichtigste Eigenschaft von Elektronen als Träger des elektrischen Stromes ist ihre Ladung, auf deren Steuerung und Messung die herkömmliche Mikroelektronik basiert. Neben der charakteristischen Größe der Elementarladung verfügt ein Elektron über eine weitere grundlegende Eigenschaft, die als Spin (Drall) bezeichnet wird. In der klassischen Vorstellung des Elektrons wird der Spin häufig als Drehimpuls eines rotierenden Kreisels interpretiert. Letztlich handelt es sich aber um einen so genannten Quantenzustand mit den Eigenschaften eines Drehimpulses. Quantenzustände stellen ein in unserer makroskopischen Welt anschaulich nur schwer vermittelbares Konzept der Quantenmechanik dar, deren Gesetze das Verhalten von Materie im atomaren und subatomaren Bereich beschreiben. Aufgrund des Spins verhält sich ein Elektron wie ein Miniaturmagnet und kann in einem Magnetfeld nur parallel oder antiparallel ausgerichtet sein. Auf der Nutzung dieser Eigenschaft für die Speicherung und Verarbeitung von Informationen basiert die so genannte Spintronik (Kurzfassung für Spinelektronik).

Im Prinzip handelt es sich bei der Spintronik um eine Weiterentwicklung der Magnetoelektronik, die sich mit den elektrischen Eigenschaften von (ferromagnetischen) Schichten in Magnetfeldern befasst. Auch hier lassen sich die wesentlichen beobachteten Effekte nur quantenmechanisch durch spinabhängige Phänomene erklären. Die herausragende Bedeutung von Magnetoelektronik und Spintronik wurde im vergangenen Jahr durch die Verleihung des Physik-Nobelpreises an Peter Grünberg vom Forschungszentrum Jülich und Albert Fert von der Université Paris-Sud gewürdigt. Beide Forscher entdeckten unabhängig voneinander, dass es in ferromagnetischen Schichtsystemen durch Variationen des äußeren Magnetfeldes zu großen Änderungen des elektrischen Widerstandes kommen kann.

Dieser so genannte Riesenmagnetowiderstand (GMR = Giant Magneto Resistance) und weitere ähnliche Effekte ermöglichen die Entwicklung von immer empfindlicheren und kleineren Magnetsensoren, die u.a. als Leseköpfe für Computerfestplatten eingesetzt werden. So könnte in absehbarer Zeit die Datendichte bei Festplatten von derzeit 200 auf bis zu 1000 Gigabit pro Quadratzoll gesteigert werden. Auch spintronische Speicherbausteine (MRAM = Magnetic Random Access Memory) wurden entwickelt, die Informationen permanent und schnell ansprechbar speichern können. Als Universalspeicher könnten sie zukünftig sowohl die Funktion der Festplatte als auch die des Arbeitsspeichers übernehmen. Sie erlauben so die Entwicklung von Computern, die auf den zeitaufwändigen Bootvorgang nach jedem Neustart verzichten können, da durch die permanente Speicherung aller Daten alle Programme genau da weiterlaufen können, wo sie abgebrochen wurden.

Von der zukünftigen Spintronik werden Lösungen für die Weiterentwicklung der Mikroelektronik erwartet, die bei einer fortschreitenden Verkleinerung kritischer Strukturgrößen mit immer störenderen Quanteneffekten und wachsenden Wärmeabfuhr-Problemen zu kämpfen hat. Für diese zukünftigen Bauelemente ist der Spin als Informationsträger prinzipiell besser als Ladungen geeignet. So kann auch die Wärmeentwicklung bei spintronischen Bauelementen deutlich reduziert werden, da die Energie, die für das

Umschalten der Spinausrichtung benötigt wird, erheblich kleiner ist als die Energie für Ladungsänderungen herkömmlicher Art. Intensiv geforscht wird auch an so genannten reinen Spinströmen, bei denen nur ein resultierender Spintransport, jedoch kein Ladungsfluss stattfindet. Dadurch würde auch die mit dem Ladungstransport verbundene Erwärmung wegfallen. Ein weiterer Vorteil der Spintronik ist, dass darüber hinaus bei Bauelementen, die nur den Spin schalten, höhere Geschwindigkeiten zu erwarten sind. Als Materialien kommen in der Spintronik neben den bereits o.g. ferromagnetischen Werkstoffen zunehmend auch Halbleiter zum Einsatz. Dabei finden inbesondere magnetische Halbleiter großes Interesse.

Für die Bereitstellung von Elektronen mit definierter Spinausrichtung in spintronischen Bauelementen (die so genannte Spininjektion) stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Die einfachste basiert auf der optischen Anregung mit polarisiertem Licht und ist in der Grundlagenforschung seit langem etabliert. Verfügbar sind auch elektrische Methoden wie ferromagnetische Metallkontakte. Ziel der Forschung sind jedoch reine Halbleiterlösungen, die prinzipiell besser in elektronische Schaltungen integrierbar sind.

Eine weitere wichtige Funktion logischer Spintronik-Bauelemente ist die gezielte Beeinflussung der Spins. Neben der magnetischen ist dabei eine rein elektrische Steuerung in elektronischen Schaltungen wünschenswert. Dazu werden spezielle Effekte (Spin-Bahn-Kopplung) untersucht, die aber auch eine Ursache für den Verlust der definierten Spinausrichtung beim Transport sind. Wichtiges Forschungsziel ist daher ein verbessertes Verständnis dieser Prozesse. Die Machbarkeit eines spintronischen Feldeffekttransistors (spinFET) auf Basis einer nanostrukturierten Ferromagnet/Halbleiter-Hybridstruktur wurde im Laborversuch bereits nachgewiesen.

Ein sehr weit gestecktes Ziel der Spintronik sind Spin-Quantenbauelemente für Quantencomputer. Diese arbeiten nicht wie konventionelle Computer auf der Basis von zweiwertigen Bits, sondern mit so genannten Quantenbits (Qubits), die mehrere Werte annehmen können und so eine hohe Parallelität in der Problemlösung ermöglichen. Die größte Schwierigkeit bei der Realisierung dieses theoretischen Konzeptes liegt darin, geeignete Quantensysteme zu finden. Hierfür sind spintronische Quantenbauelemente eine gute Option, da der Elektronenspin relativ stabil und trotzdem gezielt beeinflussbar ist. Ein Spin-Quantencomputer ist daher ein sehr schwieriges aber (vielleicht) erreichbares und damit besonders herausforderndes Ziel der Spintronik.

April 2008 Henner Wessel

Neue Halbleiter

Die moderne Informationstechnologie basiert in wesentlichem Maße auf der Nutzung von so genannten Halbleitern. Hierbei handelt es sich um Festkörper, deren elektrische Leitfähigkeit üblicherweise zwischen der von Isolatoren und der von Metallen liegt. Ihre Bedeutung für technische Anwendungen liegt darin, dass gewisse Eigenschaften gezielt manipuliert werden können. So kann z.B. ihre elektrische Leitfähigkeit durch Hinzufügen geeigneter Fremdatome verändert werden (Dotierung). Ein wichtiges Merkmal von Halbleitern stellt die Bandlücke dar. Sie bezeichnet den Abstand, der die nichtleitfähigen Elektronenzustände im Halbleiter von den leitfähigen Zuständen energetisch trennt. Die Größe der Bandlücke entscheidet z.B. darüber, welche Wellenlängen elektromagnetischer Strahlung durch einen Halbleiter absorbiert und in ein elektrisches Signal umgewandelt werden können. Neben Elementhalbleitern wie Silizium (Si) oder Germanium (Ge) existieren auch noch die so genannten Verbindungshalbleiter, die aus mehreren chemischen Elementen zusammengesetzt sind. Die derzeit technologisch bedeutsamsten Verbindungshalbleiter basieren auf Elementen der III. und V. Gruppe des Periodensystems. Hierzu zählen u.a. Galliumarsenid (GaAs) und Indiumphosphid (InP).

Eine Klasse dieser so genannten III-V-Verbindungshalbleiter, die in Zukunft vermehrt technologische Bedeutung erlangen könnte, ist aus Elementen der III. Gruppe des Periodensystems und Stickstoff (N) aufgebaut. Hierzu gehören Aluminium-, Gallium- und Indiumnitrid (AlN, GaN, InN). Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie im Gegensatz zu Silizium Licht geeigneter Wellenlänge effizient emittieren. Deshalb sind sie auch optoelektronisch einsetzbar, z.B. für Leuchtdioden oder Laser. Darüber hinaus besitzen GaN und AlN im Vergleich zu Silizium eine große Bandlücke. Bauteile, die auf diesen Materialien basieren, sind deswegen auch bei höheren Umgebungstemperaturen, elektromagnetischer Störstrahlung und höheren Betriebsspannungen verwendbar.

Eine weitere interessante Klasse von Halbleitern setzt sich aus Elementen der III. Gruppe und Arsen (As) bzw. Antimon (Sb) zusammen. Hierzu zählen Indiumarsenid (InAs) sowie Gallium-, Aluminium- und Indiumantimonid (GaSb, AlSb, InSb). Diese Verbindungen und deren Legierungen gestatten ein breites Spektrum an möglichen Bandlückenenergien. Zusätzlich erlauben sie bei aufeinandergeschichteten, unterschiedlichen Halbleitermaterialien (so genannten Heterostrukturen) eine Vielzahl von verschiedenen Bandanordnungen an den Materialgrenzflächen.

Sowohl für die Nitride als auch für die o.g. Arsenide und Antimonide der III. Gruppe gibt es vielfältige mögliche Anwendungen in der Elektronik und Optoelektronik. So liegt z.B. ein mögliches Einsatzgebiet von GaN bzw. der Legierung AlGaN im Mobilfunkbereich. Auf der Grundlage dieser Technologie können hier Leistungstransistoren für Verstärker in Basisstationen entstehen. Die hohen möglichen Betriebsspannungen dieser Bauelemente gestatten letztendlich eine sehr große Signalbandbreite. Dies erlaubt die flexible Nutzung des gleichen Verstärkers für die unterschiedlichen Frequenzbänder der einzelnen Mobilfunkstandards, wodurch sich die Anzahl der erforderlichen Verstärker in Basisstationen entsprechend verringern lässt. Die Sende- und Empfangsmodule bei aktiven Phased-Array-Radarsystemen basieren derzeit noch auf der Verwendung von GaAs. Zukünftig

könnten derartige Systeme im Frequenzbereich um 10 GHz auch auf der Grundlage des Materialsystems AlGaN/GaN realisiert werden. Durch die damit möglichen höheren Betriebsspannungen kann der Kühlaufwand für die elektrische Leistungserzeugung und -verteilung deutlich reduziert werden, was zu einem geringeren Gewicht des Radarsystems führt.

Auf der Basis von AlGaN/GaN können auch Photodetektoren für den UV-Bereich verwirklicht werden. Herkömmliche UV-Detektoren, die z.B. GaAs als Detektormaterial nutzen können, besitzen den Nachteil, dass sie auch bei Wellenlängen unterhalb des UV-Bereichs ansprechen. Hierdurch ergibt sich ein störender Hintergrund, der durch den Einsatz von optischen Filtern unterdrückt werden muss. Aufgrund der Bandlücken von GaN und AlGaN liegen deren Ansprechschwellen im UV-Bereich, weshalb in diesem Fall keine zusätzlichen Filter mehr erforderlich sind.

Von allen bekannten Halbleitern besitzt InSb die höchste Elektronenbeweglichkeit, was die Realisierung von Transistoren mit sehr hohen Schaltgeschwindigkeiten oder sehr geringem Stromverbrauch erlaubt. In dieser Hinsicht übertrifft InSb daher auch GaAs, das lange Zeit als ein aussichtsreicher Nachfolger von Silizium in der Computertechnik angesehen wurde. Teilweise wird deshalb darüber nachgedacht, ob die Verwendung von InSb zukünftig weitere Leistungssteigerungen erlauben könnte, sobald die derzeitige Computerelektronik ihre physikalischen Grenzen erreicht hat.

Basierend auf InAs und GaSb konnten mittlerweile erste Geräte eines neuen Detektortyps für den Infrarotbereich verwirklicht werden. Dieser nutzt eine spezielle Heterostruktur in der Form eines so genannten Übergitters, bei dem dünne Schichten der beiden Halbleitermaterialien periodisch aufeinanderfolgen. An den Grenzflächen dieser Schichten ergibt sich dabei eine spezielle Bandanordnung. Diese Technologie gestattet die Herstellung von Sensoren, die z.B. eine hohe Effizienz bei der gleichzeitigen Detektion von unterschiedlichen Frequenzbändern aufweisen.

Die hier beschriebenen Halbleitermaterialien finden in zunehmenden Maße Verwendung. So werden z.B. die Gruppe-III-Nitride bereits als Basis für Leuchtdioden genutzt. Im Hinblick auf manche Anwendungen, wie z.B. bei GaN-basierten Transistoren für die Hochtemperatur-Hochleistungselektronik, sind teilweise allerdings noch Forschungsanstrengungen erforderlich. Diese betreffen u.a. die Langzeitstabilität der Halbleitermaterialien bzw. die daraus resultierende Zuverlässigkeit der Bauelemente.

Oktober 2006 Klaus Ruhlig

Polytronik

Seit der Entdeckung elektrisch leitfähiger Kunststoffe vor fast 30 Jahren beschäftigt sich das Forschungsgebiet der Polymerelektronik mit der Herstellung von elektronischen Bauelementen und integrierten Schaltungen aus Kunststoff. Darüber hinaus sind in den letzten Jahren Lichtquellen und Displays, Batterien und Solarzellen sowie Sensoren und Aktoren aus organischen Polymeren hergestellt worden. Im deutschen Sprachraum werden alle diese Gebiete, die sich mit technischen Anwendungen elektrisch und optisch aktiver Polymere befassen, seit kurzem zusammenfassend als „Polytronik" bezeichnet. Möglich wurden sie durch die Entwicklung von Funktionspolymeren mit vielfältigen elektronischen und optischen Eigenschaften, wie etwa elektrisch leitenden oder halbleitenden, elektrolumineszierenden sowie piezoelektrischen Polymeren. Dabei tritt die Polytronik im Allgemeinen nicht in Konkurrenz zu den herkömmlichen siliziumbasierten elektronischen oder photonischen Bauteilen, sondern ergänzt diese. Wegen der geringeren Ladungsträgerbeweglichkeit und der größeren Strukturabmessungen sind die mit polytronischen Bauteilen realisierbaren Taktfrequenzen wesentlich geringer. Diesem Nachteil stehen Vorteile wie Transparenz, geringe Dicke, mechanische Flexibilität sowie insbesondere die Möglichkeit zu sehr kostengünstiger Massenproduktion gegenüber.

Bei den hierfür erforderlichen Hochdurchsatz-Herstellungsverfahren wird insbesondere ausgenutzt, dass sich die meisten Polymere leicht in Lösung bringen lassen. Dadurch ist es möglich, eine Vielzahl von Druckverfahren einzusetzen, die keine speziellen Reinraumbedingungen benötigen. Die Genauigkeit des Drucks muss dabei mindestens im Mikrometerbereich liegen. Derzeit wird beispielsweise an Offset-, Sieb- und Tintenstrahldruckverfahren sowie an Stempeln und lithographischen Verfahren gearbeitet. Als flexibler Träger für die aufgedruckten Strukturen kommt neben Folien auch Papier in Frage. Für viele Anwendungen sind darüber hinaus Konzepte interessant, bei denen Polytronik und herkömmliche Mikroelektronik kombiniert werden.

Am weitesten in der Realisierung sind selbstleuchtende Displays aus organischen Leuchtdioden (OLEDs), die bereits seit einigen Jahren serienmäßig in Autoradios, Handys und Digitalkameras eingesetzt werden. Ihre Bildqualität ist noch nicht optimal, aber sie sind dünn, leicht, kostengünstig herstellbar und verbrauchen wenig Energie, weshalb sie sich besonders für mobile Anwendungen eignen. Dabei werden zwei Entwicklungswege verfolgt. In so genannten Small-Molecule-OLEDs werden niedermolekulare organische Farbstoffe zur Lichtemission angeregt. Es handelt sich hier eigentlich nicht um Polymere, sondern um kleinere Moleküle, die zur Herstellung der OLEDs im Vakuum aufgedampft werden. In Polymer-LEDs werden dagegen lichtemittierende Polymere (LEPs) verwendet, die sich durch nasschemische Beschichtungsverfahren auf dem Glassubstrat aufbringen lassen. Bisher werden die OLED-Bildpunkte einzeln mit Siliziumtransistoren angesteuert. Für die Zukunft wird aber angestrebt, organische Displays und organische Ansteuerelektronik aufeinander zu drucken, so dass flexible Displayfolien entstehen. Das Problem der Erzeugung von weißem Licht lässt sich mit OLEDs leicht durch Verwendung von Polymermischungen lösen.

Im Bereich der rein elektronischen organischen Bauelemente ist noch weitere Forschung nötig. Hier werden Feldeffekttransistoren, Dioden, Kondensatoren, Widerstände und Antennen sowie integrierte Schaltungen aus diesen Bauteilen (IPCs = Integrated Plastic Circuits) aufgebaut. Dabei richten sich die Hauptanstrengungen auf eine Verbesserung der Materialeigenschaften sowie die Entwicklung neuer Polymerarten (z.B. geeignet orientierte Flüssigkristalle oder polymere n-Halbleiter). Weiterhin wird eine Verkleinerung der Strukturen angestrebt. Polymerelektronisch aufgebaute Transponder können insbesondere als so genannte RFID (Radio Frequency Identification)- Etiketten Verwendung finden, die aufgrund ihrer Flexibilität und geringen Dicke in nahezu jedes Produkt eingearbeitet werden könnten. Hier existieren bereits Prototypen.

Ein generelles Problem aller polytronischen Bauteile ist die wegen ihrer Empfindlichkeit gegen Luftsauerstoff und Feuchtigkeit begrenzte Haltbarkeit. Daher müssen sie mit Barriereschichten umschlossen werden, die den Zutritt von Sauerstoff und Wasserdampf verhindern. Hier kommen beispielsweise Lacke auf Basis organisch modifizierter Keramiken zur Anwendung. Durch ein besseres Verständnis der Alterungsprozesse könnten auch haltbare Funktionspolymere möglich werden, die keine Schutzschicht mehr benötigen.

Zur Energieversorgung polytronischer Schaltungen sind in Folien integrierte dünne Polymer-Akkus und -Primärbatterien in Entwicklung, die auch eine neue Batteriemanagement-Elektronik benötigen. Der geringe Elektrodenabstand stellt hier besonders hohe Anforderungen, um Überhitzung oder Kurzschlüsse zu vermeiden. Polymer-Solarzellen lassen sich beispielsweise im Siebdruck auf Folien aufbringen. Auch hier gilt, dass ihre Effizienz und Haltbarkeit deutlich geringer ist als die anderer Solarzellentypen, dass aber durch ihre mechanische Flexibilität und kostengünstige Herstellung neue Einsatzmöglichkeiten erschlossen werden. Die Vielfalt der neuen Funktionspolymere ermöglicht auch die Entwicklung verschiedener Typen von Polymersensoren. Hier konnten bereits Temperatur-, Feuchtigkeits-, Druck-, Kraft-, Chemo- und Biosensoren sowie organische Photodioden demonstriert werden. Elektroaktive Polymere (EAPs) bieten vielfältige Einsatzmöglichkeiten als Aktoren.

Insgesamt steht die Polytronik erst am Anfang ihrer Möglichkeiten. Zukünftige Produkte können sehr preisgünstige multifunktionale Folien sein, die selber kleben und Chip, Antenne, Sensoren, Display sowie Batterie in einer Folie enthalten. Damit ließen sich neben intelligenten Etiketten z.B. neuartige Gruß- oder Chipkarten mit Display verwirklichen. Weitere Anwendungsvorstellungen reichen von intelligente Messstreifen und Pflastern bis zu elektronischen Zeitungen und aufrollbaren Foliencomputern. Die dünnen, leichten und flexiblen Schaltungen könnten sogar in die Kleidung integrierte so genannte Wearable Computers ermöglichen. Noch im Bereich der Grundlagenforschung befinden sich die Gebiete der organischen Laser, Magnete und Magnetoelektronik, von denen weitere innovative Produkte erhofft werden.

Mai 2005 Matthias Grüne

Bioelektronik

Als Bioelektronik bezeichnet man ein neues interdisziplinäres Forschungs- und Entwicklungsgebiet, das sich mit der Integration und dem Informationsaustausch von biologischen und elektronischen Systemen befasst. Hierbei kann die Signalübertragung zwischen der biologischen Komponente und dem jeweiligen elektronischen Bauelement, bei dem es sich z.B. um Elektroden, Feldeffekttransistoren oder piezoelektrische Kristalle handeln kann, in beide Richtungen erfolgen. So können einerseits biologische Prozesse durch geeignete Wandler elektronische Signale auslösen. Dies geschieht z.B. bei elektronischen Biosensoren, bei denen biomolekulare Erkennungsvorgänge in detektierbare Signale umwandelt werden. Zum anderen können elektrische Signale biologische Funktionen aktivieren. Ein Beispiel hierfür ist die Biokatalyse, bei der hier elektrisch gesteuerte biologische Prozesse ermöglicht werden. Die derzeit erkennbaren Hauptanwendungen der Bioelektronik liegen in der Sensorik, der Katalytik, der Prothetik sowie der Informationstechnik.

Je nach Art der verwendeten biologischen Komponenten lassen sich zwei weitgehend selbstständige bioelektronische Arbeitsrichtungen unterscheiden. Kennzeichen der so genannten zellulären Bioelektronik ist die Signalübertragung zwischen biologischen Zellen bzw. Zellgeweben und einer technischen Vorrichtung. Im Unterschied hierzu basiert die molekulare Bioelektronik, auch Biomolekularelektronik genannt, auf der Verwendung molekularer biologischer Komponenten, vor allem bestimmter Funktionsproteine, Enzyme oder DNA-Moleküle.

Von besonderer Bedeutung in der zellulären Bioelektronik ist die Schnittstelle zwischen Nervenzellen und Elektronik. Bereits heute gibt es neuroprothetische Anwendungen zur Behebung von gewissen Fehlfunktionen, die durch Schädigung des Nervensystems hervorgerufen wurden. Zur Signalumwandlung werden hier implantierbare Elektroden verwendet, mit denen sowohl Muskeln und Nervenzellen stimuliert als auch neuronale Signale aufgenommen werden können. Darüber hinaus finden solche Implantate in der biologischen Grundlagenforschung Anwendung, um durch Analyse neuronaler Informationsverarbeitungsprozesse Erkenntnisse über die Funktionsweise des Gehirns zu gewinnen.

Ein weiteres Anwendungsgebiet der zellulären Bioelektronik ist die Sensorik. Auf der Grundlage von zwei- oder dreidimensionalen Zellkulturen, die auf planaren Mikroelektroden-Arrays wachsen, werden moderne Detektions- und Analyseverfahren entwickelt. Derartige Sensorsysteme bieten die Möglichkeit, physiologische Zustände eines Modellorganismus in Antwort auf verschiedene Stimuli zu überwachen und funktionell zu charakterisieren. Verwendung finden dabei sowohl Kulturen aus erregbaren Zellen (Nerven, Herzmuskel) als auch nicht erregbaren Zellen (Leber, Tumore). Eingesetzt werden zellbasierte Biosensoren insbesondere beim Wirkstoff-Screening sowie in der Umwelt- und Schadstoffanalytik. Noch weitgehend im Anfangsstadium befinden sich hingegen auf einer Kopplung von Nervenzellnetzen und Mikroelektronik basierende Entwicklungsansätze, die den Entwurf von nasschemischen Neurocomputern zum Ziel haben. Hier ist ein Durchbruch derzeit nicht absehbar. Allerdings profitiert die biologische Grundlagenfor-

schung sowie die Entwicklung leistungsstarker Neuroprothetik in hohem Maße von den gegenwärtigen Aktivitäten auf diesem Gebiet.

In der Biomolekularelektronik kommen insbesondere chemische und nanotechnologische Methoden zum Einsatz, um eine effektive elektronische Kopplung der jeweils verwendeten biologischen und technischen Bauelemente zu erreichen. Eine zentrale Rolle spielen hier die Redoxproteine, welche sowohl im Organismus als auch im technischen Umfeld eine Vielzahl von Schlüsselreaktionen ausführen. Der grundlegende Prozess, auf dem diese Reaktionen beruhen, ist der proteinvermittelte Elektronentransfer, der z.B. die zelluläre Atmung und Photosynthese reguliert. Die großen Fortschritte, die in der letzten Zeit in der molekularen Bioelektronik erzielt wurden, wären deshalb ohne die weitgehende Aufklärung der theoretischen Grundlagen des biologischen Elektronentransfers sowie der Struktur-Funktions-Beziehung von Redoxproteinen und Enzymen nicht möglich gewesen.

Zur Verbindung von molekularem Biomaterial mit elektronischen Bauelementen werden derzeit verschiedene Strategien angewendet. So kann z.B. eine rein mechanische Verbindung durch Aufnahme der biologischen Komponente in ein Polymersubstrat erfolgen, welches mit der Elektrode verbunden ist. Die Signalübertragung erfolgt dann zumeist über einen Diffusionsmechanismus. Möglich ist auch die Erzeugung von physikalischen Mischkompositen zwischen dem Biomaterial und dem elektronischen Bauelement. Ein weiterer Entwicklungsansatz zur Integration von molekularbiologischen und mikroelektronischen Systemen, der gegenwärtig besonders intensiv verfolgt wird, besteht in der Einbettung von Biomolekülen in einer Membranschicht, die auf der Elektronikkomponente aufgebracht ist und teilweise selbst Signalleitungsfunktionen wahrnimmt.

Eine Reihe von Ansätzen der Biomolekularelektronik wird zukünftig die Realisierung von kostengünstigen, schnellen und einfach bedienbaren Analysegeräten ermöglichen. So bieten z.B. elektrochemische und piezoelektrische Biosensoren gegenüber der derzeit in der Bioanalytik häufig eingesetzten optischen Signalauslesung u.a. den Vorteil wesentlich geringeren apparativen Aufwands und einer hohen Miniaturisierbarkeit. Weitere Anwendungsbereiche sind die Biokatalytik sowie die Informationstechnik als Alternative zur halbleiterbasierten Mikroelektronik. Generell gilt, dass weitere Fortschritte auf dem Gebiet der Biomolekularelektronik insbesondere von der Verfügbarkeit effizienter, spezifisch zugeschnittener molekularer Signalleiter abhängen.

November 2002 Roman Kernchen

Magnetoelektronik

Die so genannte Magnetoelektronik befasst sich mit der Anwendung und Nutzung aller durch Magnetfelder beeinflussten und verursachten Funktionen in elektronischen Bauelementen. Ausgenutzt werden vor allem solche Effekte, bei denen der elektrische Widerstand von den magnetischen Randbedingungen abhängt. Insbesondere für die Bereiche Sensorik und Informationstechnik bietet die Magnetoelektronik eine Reihe von zukunftsträchtigen Entwicklungslinien.

Seit längerem ist bekannt, dass bei bestimmten Materialien der elektrische Widerstand für Ströme parallel und senkrecht zur Magnetisierungsrichtung eines Leiters verschieden ist (AMR = Anisotropic Magneto-Resistance). Eine technische Einsetzbarkeit dieses Effektes konnte aber erst durch die Verfügbarkeit mikroelektronischer Systeme erreicht werden. Die Beherrschung der Herstellung dünner magnetischer Materialien im Nanometerbereich hat dann Ende der 80er Jahre zur Entdeckung einer neuen Klasse von Magnetowiderstandseffekten geführt, die wegen ihrer Größe als Riesenmagnetowiderstände (GMR = Giant Magneto-Resistance) bezeichnet werden. Sie treten in Systemen auf, die in der einfachsten Form aus zwei ferromagnetischen Schichten wie Eisen oder Kobalt und einer nichtmagnetischen, oft nur wenige Atomlagen dicken Zwischenschicht aus einem nichtmagnetischen Material wie Kupfer bestehen. Die durch ein äußeres Magnetfeld ausgelöste relative Widerstandsänderung einer solchen Anordnung erreicht 6-8 % und damit das doppelte des AMR-Effektes. In Vielschichtsystemen sind Werte von über 100 % realisierbar. Der GMR-Effekt basiert auf Streuung an inneren Grenzschichten des Systems, die vom magnetischen Moment der Elektronen abhängt. Damit wird im Unterschied zur konventionellen Halbleiterelektronik, die auf der Ladung des Elektrons aufbaut, eine andere Eigenschaft genutzt, nämlich sein interner Drehsinn bzw. Spin, mit dem das magnetische Moment unmittelbar zusammenhängt.

Ein weiterer wichtiger magnetoelektronischer Effekt ist der TMR-Effekt (TMR = Tunneling Magneto-Resistance). Dabei tritt als Zwischenschicht an die Stelle des nichtmagnetischen Metalls der GMR-Anordnung eine dünne Isolatorschicht. Ist diese genügend dünn (< 5 nm), so können Elektronen sie aufgrund des quantenmechanischen Tunneleffektes überwinden. Der resultierende Tunnelstrom hängt dabei von der relativen Magnetisierung der magnetischen Schichten ab. Der TMR-Effekt ist zwar mit dem GMR-Effekt verwandt, basiert jedoch auf spinabhängigem Tunneln statt auf spinabhängiger Streuung. Nachgewiesen wurden bereits Raumtemperatur-TMR-Effekte mit einer relativen Widerstandsänderung von ca. 20 %.

Ein neuer Magnetowiderstandseffekt wurde Anfang der 90er Jahre im Zusammenhang mit der Untersuchung hochtemperatursupraleitender Materialien entdeckt. Hierbei verändert ein äußeres Magnetfeld die Charakteristik des Stoffes vom elektrischen Leiter zu einem Isolator. Wegen der enormen Größe dieses Effektes (mehrere 100 %) wird er als Kolossaler Magnetowiderstand (CMR = Colossal Magneto-Resistance) bezeichnet. Er ist allerdings stark temperaturabhängig. Rekordwerte der relativen Widerstandsänderung bei tiefen Temperaturen reichen bis zu einem Faktor von einer Million.

Technische Einsatzgebiete für diese zusammenfassend als XMR bezeichneten Effekte sind vor allem Magnetfeldsensoren wegen ihrer starken Abhängigkeit vom angelegten magnetischen Feld, Datenspeicher aufgrund der Beständigkeit der Magnetisierung sowie Logikbausteine wegen der schnellen und nichtflüchtigen Ummagnetisierungsmöglichkeit. Dabei ist die Sensorik das am weitesten fortgeschrittene Anwendungsfeld. Festplattenleseköpfe in GMR-Technologie werden bereits kommerziell eingesetzt und haben eine unerwartet hohe Steigerung der Informationsdichte moderner Computerfestplatten bis auf Werte von derzeit 35 Gbit/in^2 erlaubt. Ein weiteres wichtiges Masseneinsatzgebiet für GMR-Sensoren ist der Kraftfahrzeugbereich (z.B. ABS). Die größere Empfindlichkeit der GMR-Sensoren kann auch zum stromsparenden Betrieb portabler Geräte genutzt werden. Als Sensoren zur Messung extrem kleiner Magnetfelder konkurrieren GMR-Sensoren vor allem mit SQUIDs, die jedoch immer eine Kühlung erfordern. Hingegen sind mit großflächigen Sensoren in GMR-Technologie bereits bei Raumtemperatur konkurrenzfähige Nachweisgrenzen erreichbar. Damit sind sie neben Anwendungen in der Medizintechnik besonders für mobile Anwendungen wie z.B. Magnetfeldsensoren in Aufklärungssystemen oder Suchköpfen geeignet.

Magnetische Schreib-Lese-Speicher (MRAM = Magnetic Random Access Memory) erlauben die Nutzung der hohen Speicherdichte magnetischer Materialien bei gleichzeitiger schneller Zugriffsmöglichkeit im Nanosekundenbereich, die bisher nur mit Halbleiterbauelementen realisierbar war. Weitere Vorteile von MRAMs im Vergleich zu DRAM-Halbleiterspeichern sind, dass die Information nichtflüchtig gespeichert und zerstörungsfrei ausgelesen werden kann. Dieses eigentlich schon ältere, zunächst auf Hall-Sensoren basierende Speicherverfahren erhielt durch die Entdeckung der GMR- und TMR-Effekte neuen Auftrieb. Heutige MRAMs bestehen aus einer großen Zahl matrixartig angeordneter TMR-Elemente, in denen binäre Information durch die relative Magnetisierung der magnetischen Schichten gespeichert wird, sowie Leiterbahnen zum Auslesen und Schreiben der Bits. Kurz vor der Markteinführung steht ein 256 Kbit MRAM.

Noch weit in der Zukunft liegen dagegen Anwendungen magnetischer Effekte für Logikbauelemente. Basis dieser Untersuchungen ist ein so genannter Spintransistor, der eine magnetische und damit spinabhängige Steuerung des Stroms zwischen zwei ferromagnetischen Kontakten erlaubt. Mit einem Demonstrator wurde die Realisierbarkeit des Prinzips bereits nachgewiesen. Spintransistoren funktionieren um so besser, je kleiner sie sind und erlauben daher kleinere und schnellere Bauelemente. Darüber hinaus würden sie die Realisierung nichtflüchtiger, mehrfach programmierbarer Logikbausteine erlauben.

Juni 2001 Henner Wessel

Halbleiter-Leistungselektronik

Als Halbleiter-Leistungselektronik definiert man im allgemeinen denjenigen Zweig der elektrischen Energietechnik, der sich mit der Nutzung von Halbleiterbauelementen zur Steuerung, Schaltung und Umformung des elektrischen Energieflusses zwischen Erzeuger und Verbraucher befaßt. Der hierfür in Betracht kommende Bereich an elektrischer Leistung reicht von einigen Watt bis zu Hunderten von Megawatt.

Parallel zur spektakulären auf der Siliziumtechnologie basierenden Entwicklung der Mikroelektronik hat sich in der Halbleiter-Leistungselektronik in den letzten 10 bis 15 Jahren eine sog. zweite „stille" Revolution vollzogen. Bis heute spielt auch hier das Halbleitermaterial Silizium die herausragende Rolle, da es in der Bearbeitung sehr gut beherrscht wird und auch noch Betriebstemperaturen bis über 200° C aushält. Aufgrund ihrer insbesondere für Leistungsanwendungen günstigen Eigenschaften gibt es jedoch Bestrebungen, zukünftig verstärkt die sog. Wide-band-gap-Halbleiter wie Siliziumkarbid (SiC) oder Galliumnitrid (GaN) einzusetzen.

Praktisch alle heutigen leistungselektronischen Bauelemente bauen auf etablierten Schaltungsprinzipien der Elektronik auf. Dabei ragen vor allem zwei sich teilweise ergänzende und überlappende Entwicklungslinien heraus. Auf dem klassischen Transistorprinzip, d.h. der Steuerung eines Stromflusses durch einen Halbleiter über eine Steuerelektrode, basieren die sog. Leistungstransistoren. Eine im Vergleich hierzu komplexere Struktur haben die sog. Thyristoren. Der Grundtyp dieses Halbleiter-Leistungsschalters besteht aus einer Vierschichtstruktur, d.h. er verfügt über drei pn-Übergänge. Durch eine an einer inneren Steuerelektrode angelegte Spannung wird das Bauelement für eine Stromflußrichtung vom sperrenden in den leitenden Zustand geschaltet (gezündet).

Eine wesentliche Rolle für die Entwicklungsdynamik der Leistungselektronik in der jüngsten Vergangenheit spielt die große Bandbreite ihrer Anwendungsfelder. So gibt es im sog. Niederleistungsbereich (< 10 kW) einen enormen Bedarf an leistungselektronischen Bauelementen für die Energieversorgung bei Bürokommunikationsgeräten. Weitere Anwendungen für Niederleistungselemente mit großen Zuwachsraten bilden die Haus- und Gebäudetechnik, kleine elektrische Antriebsaggregate sowie die Automobilelektronik.

Herausragendes Bauelement in diesem Leistungsbereich ist der sog. MOSFET (Metall Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), der die lange Zeit dominierenden bipolaren Leistungstransistoren weitgehend verdrängt hat. Sowohl hinsichtlich Strom (0,1 A bis über 100 A) als auch Spannung (bis über 1000 V) decken die Leistungs-MOSFETs inzwischen einen großen Bereich ab. Darüber hinaus gibt es noch eine Vielzahl von Spezialentwicklungen für bestimmte Anwendungsfelder, wie z.B. die sog. S-FET-Bauelemente im Niedervoltbereich (< 100 V) oder die sog. Cool-MOS-Technologie im Hochvoltbereich (> 400 V).

Ein weiterer Trend im Bereich niedriger Leistung sind die sog. Smart-Power-ICs, bei denen verschiedene Funktionen, wie Digital-, Analog-, Schutz- und Leistungsschaltungen monolithisch auf einem Baustein integriert sind. Auch hier gibt es bereits ein großes

Spektrum an kommerziell verfügbaren Bauelementen, die jeweils für ein bestimmtes Anwendungsgebiet optimiert sind. Hiermit lassen sich Ströme von mehr als 50 A und Spannungen von bis zu 1200 V steuern.

Die Nutzung der Leistungselektronik im Bereich mittlerer Leistungen zwischen 10 kW und 1 MW wird wesentlich durch die Stromversorgung für elektrische Antriebe in der industriellen Fertigung sowie im Verkehr bestimmt. So bildet die optimale elektronische Steuerung und Versorgung dieser Aggregate eine wesentliche Voraussetzung für den weiteren Fortschritt bei der Fabrikautomatisierung. Bei den derzeit noch auf Spezialanwendungen beschränkten elektrisch angetriebenen Straßenfahrzeugen erwartet man in Zukunft im Zusammenhang mit der Einführung von Brennstoffzellen einen enormen Bedarf an elektronischen Steuerungselementen.

Der mittlere Leistungsbereich war bis Anfang der achtziger Jahre noch weitgehend eine Domäne der Thyristorbauelemente, vor allem des sog. Gate-Turn-off-Thyristors (GTO). Der entscheidende Entwicklungsschritt war hier das Konzept des sog. IGBT (Integrated Gate Bipolar Transistor). Dieses Bauelement vereinigt in sich die Vorteile des MOSFET (u.a. kurze Schaltzeiten, hoher Eingangswiderstand) mit den Vorteilen des Bipolartransistors (u.a. niedriger Verlust, hohe Stromdichte). Die Familie der IGBT-Bausteine deckt inzwischen den Spannungsbereich von 600 - 6500 V bei Stromwerten von 2 - 2000 A ab und hat den GTO-Thyristor weitgehend verdrängt. Sie verfügt noch über ein großes Entwicklungspotential sowohl zu höheren und niedrigeren Strömen und Spannungen als auch zu niedrigen Schaltzeiten und Verlusten.

Das kommerzielle Anwendungsspektrum für elektronische Bauelemente hoher und höchster Leistungen (> 1 MW) reicht von Antrieben für Schienenfahrzeuge bis zu Systemen zur Energieübertragung und -verteilung. Auch für zukünftig mögliche militärische Hochleistungssysteme, wie z.B. Kampffahrzeug-Hybridantriebe oder Strahlwaffen, gewinnt dieser Leistungsbereich zunehmend an Interesse. Bis heute bietet sich nur die Familie der Thyristoren als gut im Megawattbereich arbeitende Halbleiterbauelemente an. Hier reicht das vielfältige Angebot von schnellschaltenden GTO-Thyristoren für Traktionsanwendungen (z.B. zur Regelung von ICE-Drehstrommotoren) bis zu lichtzündbaren Thyristoren zur elektrischen Kopplung unterschiedlicher Netze (bis zu 1 GW). In den letzten Jahren setzt sich hier als Ersatz für das bisher dominierende GTO-Prinzip zunehmend der sog. Integrated Gate Commutated Thyristor (IGCT) durch, dem aus jetziger Sicht vielversprechendsten Bauelement im Hochleistungsbereich.

November 2000 Thomas Kretschmer

Molekularelektronik

Die sog. Molekularelektronik umfaßt die Methoden der Datenspeicherung und –verarbeitung mittels organischer Makromoleküle. Diese übernehmen die Funktion von Schaltern, die in der herkömmlichen Elektronik durch Transistoren oder Dioden verwirklicht werden.

Die durch die Molekularelektronik erreichbare Miniaturisierung führt zu einer bisher ungeahnten Packungsdichte der Funktionselemente. Während der Platzbedarf eines funktionsfähigen Transistors in der heute vorherrschenden Siliziumtechnologie in der Größenordnung von einem µm2 liegt, haben molekularelektronische Bauelemente generell Abmessungen im Nanometerbereich. Dadurch und durch dreidimensionale Anordnung, die in Siliziumtechnologie nur sehr aufwendig zu realisieren ist, potenzieren sich die Möglichkeiten zur Erhöhung der Elementdichte. Allerdings resultieren daraus auch Probleme, die herkömmliche Schaltungen nicht aufwerfen, und zu deren Lösung völlig neue Schaltungsarchitekturen mit automatischer Fehlerkorrektur erforderlich sind. So führt die extreme Miniaturisierung zu Störungen durch Quanteneffekte und infolge der hohen Packungsdichte steigt die Wahrscheinlichkeit von Baufehlern auf der molekularen Ebene. Ein weiterer Nachteil, die im Vergleich zu Metallen und Halbleitern deutlich langsamere Elektronenleitung in komplexen molekularen Verbindungen, wird aber durch die sehr geringen zu überbrückenden Entfernungen mehr als kompensiert.

Die Grundbausteine molekularelektronischer Schaltungen sind Moleküle mit besonderen Eigenschaften, die als Schaltelemente genutzt werden, und molekulare Drähte zur Signalübertragung, wie z.B. Kohlenstoffröhrchen (nanotubes) oder Polymere. Die jeweils in Betracht kommenden Träger zur Signalübertragung (z.B. Elektronen, Photonen, Phononen) werden durch die Reaktionsweise der verwendeten Moleküle bestimmt. Die dabei umgesetzte Energie ist um Größenordnungen geringer als bei herkömmlicher Elektronik. Während dort 105 bis 106 Elektronen einen Schaltvorgang realisieren, sind es in der Molekularelektronik nur einzelne Signalträger.

Bei der Realisierung von molekularelektronischen Schaltungen ist die Synthetisierung der Moleküle nicht das schwierigste Problem. Kompliziert ist es, diese als Einzelfunktionselemente wirksam werden zu lassen, d. h. sie zu ordnen und die geeigneten Signalverbindungen zwischen ihnen herzustellen. Hier hat die Möglichkeit, Rastersondenmikroskope für die gezielte Anordnung und Verknüpfung einzusetzen, für Forschung und Entwicklung neue Perspektiven eröffnet. Mit diesen Werkzeugen war es erstmals möglich, Grundelemente logischer Schaltungen auf molekularer Ebene zu verwirklichen. Allerdings muß die Massenproduktion von molekularelektronischen Chips sehr wahrscheinlich andere Wege gehen, da eine serielle Herstellungsweise bei der gewaltigen Zahl der Einzelelemente nicht praktikabel ist. Deshalb konzentriert sich ein großer Teil der aktuellen Forschung in der Molekularelektronik auf die Verwendung von Proteinen als Grundbausteine für molekulare Funktionselemente.

Proteine sind in ihrer Funktion sehr variabel und stabil in ihrer Struktur. Man hofft, die Möglichkeiten zur Reproduktion, Selbstorganisation und Evolution, die von der Natur

vorexerziert werden, für den Aufbau komplexer Systeme auf molekularer Ebene nutzen zu können. Hauptsächliche Forschungsaktivitäten zur Anwendung von Proteinen in der Molekularelektronik konzentrieren sich gegenwärtig auf die Untersuchung der Schaltmechanismen bei Logikoperationen und die Nutzung ihrer Struktureigenschaften zum Aufbau von molekularen Schaltkreisen.

Ein Beispiel für die Nutzung eines Moleküls als Schaltelement ist das Protein Bakteriorhodopsin, das in der Membran eines in extrem salzhaltiger Umgebung lebenden Bakteriums vorkommt. Untersucht wird seine Eignung zur Verwendung in der optischen Informationsverarbeitung. Bakteriorhodopsin ändert seine Geometrie und seine Farbe, wenn es von Licht im grün–roten Spektralbereich getroffen wird. Der ursprüngliche Zustand wird durch thermischen Zerfall oder die Anregung mit blauem Licht wiederhergestellt. Mittels gentechnologischer Methoden ist es bereits gelungen, eine Variante dieses Proteins herzustellen, die eine ausreichende Lebensdauer des angeregten Zustandes besitzt. Die praktische Anwendung setzt jedoch voraus, daß die Moleküle eng gepackt in definierten Abständen angeordnet sind. Möglich wäre dies z.B. durch den Einbau in eine durch ein Protein eines anderen Bakteriums gebildete, sich selbst organisierende Matrix mit entsprechenden Löchern zur Aufnahme der Bakteriorhodopsin-Moleküle. Arbeiten zu dieser Problematik gibt es bereits.

Eine weit in die Zukunft reichende Vision der Molekularelektronik besteht darin, nach Vorgabe der gewünschten Leistungskriterien am Computer einen Konstruktionsplan zu entwickeln, entsprechend dieses Planes Genome herzustellen und mittels lebender Zellen sowohl die Funktionselemente als auch die Strukturen (Schaltkreise) zu produzieren. Wann solche Visionen Realität werden könnten, ist gegenwärtig nicht vorauszusagen. Der derzeitige Entwicklungsstand der Molekularelektronik ist hiervon noch weit entfernt. So sind zwar verschiedene Moleküle auf ihre Schalteigenschaften hin theoretisch und teilweise experimentell untersucht. Auch die Realisierbarkeit der Kontaktierung mit molekularen Drähten wurde exemplarisch gezeigt. Hingegen befindet sich die Ausbildung von Schaltungsstrukturen noch im Anfangsstadium.

Generell haben sich Prognosen von Anfang der neunziger Jahre, daß zur Jahrtausendwende bereits Speicher-Hybridsysteme mit molekularelektronischen Komponenten für Rechnersysteme verfügbar sein sollten, als zu optimistisch herausgestellt. Die Anstrengungen, die Molekularelektronik bis zur Einsatzreife zu entwickeln, werden aber sicherlich mit dem Näherrücken der längst sichtbaren Grenzen der Halbleiterelektronik wesentlich forciert.

Juli 2000 Hans-Georg Zach

Anwendungsspezifische Integrierte Schaltungen (ASICs)

Unter dem Begriff Anwendungsspezifische Integrierte Schaltungen bzw. ASICs (Application Specific Integrated Circuits) werden integrierte Schaltkreise zusammengefaßt, die eine Mittelstellung zwischen den in Massenfertigung produzierten Standardschaltkreisen wie Mikroprozessoren und Speicherbausteinen und den nur in Kleinserien herstellbaren gering integrierten oder sogar noch diskret aufgebauten Spezialschaltungen einnehmen. Bei ASICs werden möglichst viele Verarbeitungsschritte der normalen Halbleiterfertigung genutzt und die eigentliche Funktion erst möglichst spät im Herstellungsprozeß durch die Spezifikation des jeweiligen Anwenders festgelegt.

ASICs erschließen die Vorteile der Integrationstechnologie wie Reduzierung der Komponentenzahl und Wegfall fehleranfälliger Verbindungsstellen auch für Anwendungen, für die eine volle Integration wirtschaftlich nicht tragbar ist. Bis zum Jahr 2000 wird für ASICs ein Anteil von ca. 50% am gesamten Halbleitermarkt erwartet. Dieser Trend zu ASICs resultiert aus einer Entwicklung, bei der Bedarf und Auslegung neuer Schaltkreise nicht mehr nur vom Hersteller, sondern auch vom Kunden bzw. Anwender mitbestimmt wird.

ASICs werden in verschiedenen Typen angeboten, die sich vor allem in den Parametern Komplexität, Designaufwand, Designflexibilität und Wirtschaftlichkeit als Funktion der Stückzahl unterscheiden. Es gibt im wesentlichen die vier ASIC-Typen PLD (Programmable Logic Device), Gate-Array, Standardzellen-IC und Vollkundenschaltung.

PLDs decken den unteren Komplexitätsbereich ab. Zu ihnen zählen vor allem vom Anwender frei programmierbare Gatteranordnungen. Innerhalb der ASICs nehmen sie eine Sonderstellung ein, da ihre anwendungsspezifische Anpassung sehr schnell mit Hilfe von Programmiergeräten erfolgen kann.

Gate-Arrays bestehen meist aus einer matrixförmigen Anordnung von Transistorpaaren (Gattern) auf einem Chip, die bis auf die letzten Metallisierungsebenen vorgefertigt werden. Dieser ASIC-Typ kann in Waferform in großen Stückzahlen entsprechend preiswert gefertigt werden. Kundenspezifisch werden durch die letzten Verarbeitungsschritte lediglich die leitenden Verbindungen der fest angeordneten Funktionselemente erstellt. Neben Gate-Arrays, die für die Realisierung von Digitalschaltungen optimiert sind, werden auch sog. Analog-Arrays hergestellt. Auch Gate-Arrays, die eine gemischt digital/analoge Schaltungsrealisierung erlauben, stehen zur Verfügung.

Standardzellen-ICs stellen den Versuch dar, die wirtschaftlichen Vorteile von Gate-Arrays mit den Vorzügen der für ganz spezielle Anwendungen vorgesehenen sog. Vollkundenschaltungen zu kombinieren. Für den Entwurf stehen fertig entwickelte logische Grundelemente wie Flip-Flops, Frequenzteiler, Addierer und Treiberstufen in einer Zellenbibliothek zur Verfügung. Da intensiv an der Weiterentwicklung der Zellen bis hin zu kompletten Prozessoren und ähnlich komplexen, hochintegrierten Schaltungen gearbeitet wird, verwischen sich die Grenzen zwischen Standardzellen-ICs und Vollkundenschaltungen zusehends.

Der Entwurf von Vollkundenschaltungen erfolgt weitgehend auf der Ebene einzelner Transistoren, wodurch eine optimale Packungsdichte erreichbar ist. Da in der Dimensionierung und Gestaltung der einzelnen Transistoren Freiheit besteht, können auch Analog- und Leistungsschaltkreise realisiert werden. Vollkundenschaltungen können in kleinen Stückzahlen relativ kostengünstig hergestellt werden, wenn auf die aufwendige und teure Maskenherstellung verzichtet werden kann und die ASICs unter Verwendung des maskenlosen Elektronenstrahl-Direktschreibens hergestellt werden.

Im Vergleich der verschiedenen ASIC-Typen ergibt sich für Vollkundenschaltungen die beste und für Gate-Arrays die schlechteste Ausnutzung der Chipfläche, wenn man von den programmierbaren Logikschaltungen einmal absieht. Auch bei der Designflexibilität und der Komplexität führen die vollkundenspezifischen ICs, gefolgt von den Standardzellen-ICs. Allerdings holen bei diesem Punkt die Gate-Arrays durch zunehmende Möglichkeiten, Analog- und Speicherbereiche zu realisieren, auf. Hinsichtlich des Designaufwandes ergibt sich jedoch ein klarer Vorteil für Gate-Arrays. Während für diese eine Entwicklungszeit von wenigen Wochen typisch ist, liegt der entsprechende Wert für Vollkundenschaltungen bei ca. einem Jahr.

Die technologische Entwicklung der ASICs in den nächsten Jahren ist gekennzeichnet durch ein weiteres Anwachsen der Integrationsdichte und verbesserte Leistungsparameter insbesondere hinsichtlich Geschwindigkeit und Verlustleistung. Beim ASIC-Entwurf gewinnen zunehmend auch Hardware-Definitionssprachen, wie z.B. VHDL (VHSIC Hardware Description Language), große Bedeutung. VHDL war zunächst für militärische Projekte in den USA vorgeschrieben, hat sich aber als Quasistandard für computerunterstützte Schaltungsentwicklung auch bei zivilen Projekten weitgehend durchgesetzt. In Entwicklung sind derzeit auch Hardware-Beschreibungssprachen zur Entwicklung analoger ASICs. Diese werden vor allem für die Entwicklung von komplexen gemischt digital/analogen Schaltungen benötigt, die insbesondere in militärischen Systemen häufig verwendet werden.

Anwendung ergeben sich für ASICs in nahezu allen Bereichen der Konsum- und Kommunikationselektronik, in verschiedenen Computersystemen und Peripheriegeräten, bei Werkzeugmaschinen- und Robotersteuerungen sowie in der Kraftfahrzeug-Elektronik. ASICs, die gleichzeitig digitale und analoge Signale bearbeiten, sind insbesondere für alle Signalverarbeitungsaufgaben geeignet, wie sie vor allem in militärischen Aufklärungssystemen (z.B. Radar oder Sonar) auftreten.

September 1997 Henner Wessel

Galliumarsenid-Technologie

Galliumarsenid (GaAs) ist der bekannteste Vertreter der Gruppe der sog. III-V-Verbindungshalbleiter, die aus Elementen der III. und V. Gruppe des Periodensystems gebildet werden. Es galt noch vor wenigen Jahren als reichlich exotisches Halbleitermaterial, das wegen seiner herausragenden Eigenschaften vor allem im Mikrowellenbereich speziell für militärische Anwendungen wie z.B. Radar-, EloKa- und Satellitenkommunikationssysteme eingesetzt wird. Nicht zuletzt durch Forschungsprogramme wie das im vergangenen Jahr erfolgreich abgeschlossene deutsche Verbundprojekt „III-V-Elektronik" konnte jedoch inzwischen auch die Basis für zivile Großanwendungen geschaffen werden, so daß wie in der Siliziumtechnologie ein entsprechender Technologieschub zu erwarten ist.

Für Anwendungen in der Mikroelektronik ist der entscheidende Vorteil von GaAs gegenüber Silizium die wesentlich höhere Elektronenbeweglichkeit, aus der wahlweise eine entsprechend höhere Schaltgeschwindigkeit oder - bei gleicher Geschwindigkeit - eine geringere Leistungsaufnahme resultieren. Damit ist eine Basis für Höchstfrequenz- und Hochgeschwindigkeitsbauteile gegeben. Einen weiteren Vorteil bietet die semiisolierende Eigenschaft von undotiertem GaAs, die spezielle Isolationsmaßnahmen zwischen den einzelnen Bestandteilen einer Schaltung überflüssig macht und den Aufbau höher integrierter Schaltungen erleichtert.

Ein für die Optoelektronik wichtiger Materialaspekt von GaAs ist, daß es als sog. direkter Halbleiter Licht (nahes Infrarot) mit einem hohen Wirkungsgrad emittieren und absorbieren kann, während Silizium dies als indirekter Halbleiter nicht kann. Daher ist bei GaAs-Bauelementen die Umwandlung und Weiterverarbeitung elektrischer und optischer Signale auf demselben Chip möglich. Dieses Material ist damit insbesondere für integrierte optoelektronische Bauelemente geeignet.

Weitere materialspezifische Vorteile ergeben sich für GaAs aus seinem im Vergleich zum Silizium größeren Bandabstand. Dies hat zur Folge, daß GaAs-Bauelemente noch bei Temperaturen und Strahlenbelastungen (z.B. nukleares Gefechtsfeld, Weltraum) eingesetzt werden können, wo Silizium-Bausteine versagen.

GaAs wird durch Direktsynthese aus den in hochreiner Form eingesetzten Elementen Gallium und Arsen hergestellt. Gallium fällt als Nebenprodukt der Bauxitverhüttung zur Aluminiumgewinnung an und steht in ausreichender Menge zur Verfügung. Bei der Herstellung von GaAs-Wafern ergeben sich aus dem Verbindungscharakter und den chemischen und physikalischen Eigenschaften der beiden Komponenten im Vergleich zu Silizium größere Schwierigkeiten, die einer breiteren Einführung von GaAs zunächst im Wege standen, aber jetzt technisch gut beherrscht werden. Am Markt verfügbar sind derzeit GaAs-Einkristalle bzw. daraus gefertigte Wafer mit Durchmessern von bis zu 6 Zoll.

Der wichtigste in der GaAs-Technologie eingesetzte Transistor ist derzeit der sog. MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor). Er weist große Ähnlichkeit mit den entsprechenden Transistoren der Silizium-FET-Technologie auf. Schaltzeiten von nur 20 ps und damit Taktraten von 50 GHz sind mit dieser Technologie erreichbar.

Ein weiterer insbesondere für Höchstfrequenzanwendungen wichtiger GaAs-Transistortyp ist der HEMT (High Electron Mobility Transistor). Im Prinzip ist dies ein MESFET auf einer Heterostruktur-Schichtfolge. Es wird eine zusätzliche AlGaAs-Heteroschicht dotiert, die auf einer hochreinen, undotierten GaAs-Schicht aufgebracht ist. Hier bildet sich ein Elektronenfilm, auch zweidimensionales Elektronengas genannt, in dem die Elektronen wesentlich beweglicher sind, weil sie nicht an störende Dotieratome stoßen. An Verbesserungen des HEMTs in Richtung höherer Frequenzen bis hin zu 400 GHz durch Einbau weiterer Schichten (InGaAs) wird gearbeitet.

GaAs-Bausteine haben bisher vor allem als analoge Schaltungen Anwendung gefunden. MESFETs und HEMTs eignen sich wegen ihrer hohen Verstärkung bei vergleichsweise geringem Eigenrauschen vor allem für Verstärker und Oszillatoren. Als Einzelbausteine sind sie bereits seit längerem verfügbar. Große Fortschritte wurden in den letzten Jahren jedoch auch bei monolithisch integrierten Schaltungen im Mikrowellenbereich gemacht. Bei diesen sog. MMICs (Monolithic Microwave Integrated Circuits) werden aktive Elemente wie MESFETs oder HEMTs mit passiven Elementen wie Widerständen, Kondensatoren und Induktivitäten auf einem Chip integriert. Insbesondere in Anwendungen mit einer großen Zahl gleichartiger Teile wie z.B. bei Phased Array Radaren ergibt sich daraus ein konstruktiver Gewinn. MMICs werden auch die Integration ganzer Subsysteme (einschließlich Sender/Empfänger) ermöglichen. Von generellem Nutzen ist die bessere Reproduzierbarkeit und die höhere Zuverlässigkeit. Für Anwendungen in Suchköpfen oder in der Gefechtsfeldkommunikation sind vor allem ihr geringeres Gewicht und Volumen die entscheidenden Vorteile.

Digitalschaltungen auf der Basis von GaAs kommen entweder nur in Spezialbereichen zum Einsatz, in denen besonders schnelle oder strahlungsharte Schaltungen unabdingbar sind, oder müssen mit der ständig verbesserten Siliziumtechnologie konkurrieren. Mit der Verfügbarkeit auch höher integrierter und preiswerter gewordener GaAs-Schaltkreise ergeben sich jedoch zunehmend Einsatzfelder auch in Bereichen, wo Silizium zu langsam oder zu stromintensiv ist. Ein Gebiet mit schnell wachsender Bedeutung ist dabei vor allem die Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung.

Das Materialsystem GaAs/AlGaAs ist auch eine wichtige Basis für die Weiterentwicklung der Mikroelektronik hin zur Nanoelektronik, die bis in atomare Dimensionen vorstößt und auf den dort herrschenden Quantenphänomenen beruht. Auf Basis sog. Quantenpunkte sind z.B. Einzelelektronen-Transistoren realisierbar, bei denen bereits einzelne Elektronen Schaltfunktionen ausüben. Diese Entwicklungen befinden sich jedoch noch im frühen Forschungsstadium.

März 1997 Henner Wessel

Werkstoffe der Mikrolektronik

Die Werkstoffe der Mikroelektronik lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Die erste umfaßt alle Stoffe, die unmittelbar das elektronische Bauteil ausmachen und daher bestimmend für deren Leistungsfähigkeit sind, wie z.B. Halbleiter. Die zweite Gruppe beinhaltet alle Hilfsstoffe, die zur Fertigung der Bauteile und zur Steuerung des Produktionsprozesses benötigt werden, wie z.B. Photolacke und Säuren. Alle in der Fertigung eingesetzten Materialien müssen eine extrem hohe Reinheit aufweisen, um bei der großen Zahl von Prozeßschritten eine wirtschaftlich akzeptable Ausbeute zu erzielen. Neben diesen die Prozeßkosten wesentlich bestimmenden immer höheren Reinheitsanforderungen folgen für manche Hilfsstoffe aus der wachsenden Integrationsdichte auch höhere fertigungstechnische Anforderungen. So müssen z.B. die verwendeten Photolacke die geforderten geringeren Strukturbreiten ermöglichen sowie auf die verschiedenen Lithographieverfahren reagieren können. Ein generelles Ziel bei allen Hilfsstoffen ist die Rückgewinnung im Prozeß.

Die bei weitem wichtigsten Mikroelektronik-Werkstoffe sind die Halbleiter. Dies sind Materialien, deren elektrische Leitfähigkeit bei tiefen Temperaturen im Gegensatz zu den Metallen verschwindet und bei technisch interessanten Temperaturen (etwa 300 K) zwischen den Werten von Metallen und Isolatoren liegt. Die für Bauelemente der Mikroelektronik eingesetzten Halbleitermaterialien müssen in der Regel in Form hochreiner Einkristalle hergestellt werden. Die wichtigste Eigenschaft der Halbleiter für die Anwendungen in der Mikroelektronik ist die einstellbare Leitfähigkeit, die sich durch Zusätze (Dotierung) um viele Größenordnungen erhöhen läßt.

Aus der großen Vielfalt halbleitender Materialien haben sich in der Praxis für die Mikroelektronik vor allem Silizium und für die Mikro- und Optoelektronik die sog. III-V-Verbindungshalbleiter Galliumarsenid (GaAs) und Indiumphosphid (InP) fast ausschließlich durchgesetzt. Silizium stellt derzeit das am weitesten verbreitete Halbleitermaterial dar, insbesondere für Massenfertigung und Hochintegration. Produkte auf der Basis von Silizium nehmen über 90 % des Halbleitermarktes ein. Die Hauptvorteile von Silizium im Vergleich zu anderen Halbleitermaterialien sind die sichere Beherrschung der Herstellung reiner Silizium-Einkristalle und die Tatsache, daß Silizium über ein chemisch und elektrisch stabiles Oxid verfügt, das bei hohen Temperaturen als dichte isolierende Schicht auf dem Kristall aufwächst und daher eine große Bedeutung bei der Realisierung integrierter Schaltkreise hat.

Der derzeit wichtigste und am gründlichsten untersuchte Vertreter der III-V-Verbindungshalbleiter ist Galliumarsenid. Sein entscheidender Vorteil gegenüber Silizium ist die bis zu sechsmal höhere Elektronenbeweglichkeit. Damit ist eine Basis für Höchstfrequenz- und Hochgeschwindigkeitsbauteile gegeben.

Neben Galliumarsenid sind noch viele andere Verbindungshalbleiter seit längerem bekannt, die zwar vorrangig wegen ihrer elektrooptischen Eigenschaften untersucht werden, aber zunehmend auch wegen ihrer elektrischen Materialeigenschaften an Interesse gewinnen. Insbesondere die Kombination beider Eigenschaften eröffnet die Mög-

lichkeit zur Integration von optischer und elektrischer Signalverarbeitung auf einem Chip. Hier dürfte in Zukunft auch noch Indiumphosphid (InP) eine größere Bedeutung erlangen. Es besitzt wie Galliumarsenid eine herausragende Elektronenbeweglichkeit, erfordert jedoch besonderen Aufwand bei der Einkristallherstellung.

Ein weiterer wichtiger Verbindungshalbleiter ist Aluminium-Gallium-Arsenid (AlxGa1-xAs), das aus Galliumarsenid durch Ersetzen eines bestimmten Prozentsatzes (x) der Galliumatome durch Aluminiumatome hervorgeht. In Verbindung mit Galliumarsenid ermöglicht diese äußerst bedeutende und nahezu einmalige Materialkombination am einfachsten die Herstellung sog. Heterostrukturen, bei denen zwei verschiedene Halbleiterschichten im Abstand von Nanometern geeignet miteinander kombiniert werden. Die so entstandenen Materialien werden als Heterostruktur-Kristalle bzw. -Übergitter bezeichnet. Diese auch mit Begriffen wie Material Tailoring oder Band Gap Engineering bezeichnete Technologie ist die wichtigste und interessanteste Neuerung der Halbleitertechnologie seit Beginn der 80er Jahre. Ermöglicht wird dadurch die Realisierung von sog. Ballistischen Transistoren und anderen Quantenstrukturen.

Um den Einsatzbereich insbesondere hinsichtlich Wärme- und Strahlungsbelastbarkeit von elektronischen Schaltkreisen zu erweitern, wird in letzter Zeit verstärkt die Verwendbarkeit von Halbleitermaterialien mit größerem Bandabstand als Silizium oder auch Galliumarsenid untersucht. Zu diesen sog. Large-Bandgap-Materialien gehören vor allem einkristallines Siliziumkarbid (SiC) und Diamant, für die bereits im Labormaßstab einzelne elektronische Bauelemente realisiert wurden. Weitere Kandidaten sind die sog. III-V-Nitride, wie Bor- (BN), Aluminium- (AlN) oder Galliumnitrid (GaN), die sich aber noch im frühen Forschungsstadium befinden.

August 1996 Henner Wessel

Speicherbausteine

Als Informationsspeicher werden Vorrichtungen bezeichnet, die dazu dienen, Informationen (Daten oder Signale) so aufzubewahren, daß sie zu beliebigen Zeitpunkten wiedergefunden und abgerufen werden können. Hier gewinnen digitale Speicher gegenüber analogen Speichern immer mehr an Bedeutung. Eingesetzt werden vor allem Magnet- und Halbleiterspeicher und für große Informationsmengen vor allem im Multimediabereich auch optische Nur-Lese-Speicher (CD-ROM). Trotz großer Fortschritte bei den vor allem als Massenspeicher eingesetzten magnetischen und optischen bzw. magnetooptischen Speichertechnologien haben Halbleiterspeicher auf Basis mikroelektronischer Speicherschaltkreise die größte Bedeutung und das bei weitem größte Entwicklungs- und Marktpotential.

Mikroelektronische Speicherschaltkreise sind Bauelemente, in denen eine große Zahl von Speicherzellen zusammen mit den nötigen Auswahl- und Ansteuerschaltungen integriert ist. Die wichtigsten, die allgemeine Entwicklung bestimmenden Forderungen an Speicherbausteine betreffen ihre Speicherkapazität, die Zugriffsgeschwindigkeit, die erforderliche Leistungsaufnahme und die Herstellungskosten. Dabei soll die Speicherkapazität eines einzelnen Speichers möglichst hoch sein, damit zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit mit wenig Bausteinen Speicher mit hoher Gesamtkapazität aufgebaut werden können.

Weitere wichtige Charakterisierungen der Speicherbausteine sind Zugriffsart und Organisationsform der Speicherschaltkreise. Die Mehrzahl der heutigen mikroelektronischen Speicher sind adressenbestimmt, d.h. jede Information wird in den Speicher an Hand einer Adresse, die die räumliche Lage im Speicher definiert, eingeschrieben und kann mittels derselben Adresse wieder ausgelesen werden. Nicht-adressenorientierte Speicher sind die sog. Stackregister und die inhaltsadressierten Speicher. Dabei werden Stackregister meist nur als interne Zwischenspeicher in Prozessorschaltkreisen eingesetzt, während die inhaltsadressierten Speicher oder Assoziativspeicher, bei denen die abgespeicherte Information an Hand der Übereinstimmung mit bestimmten Suchkriterien aufgefunden wird, wegen des erhöhten Aufwandes nur in Sonderfällen eingesetzt werden.

Zur Speicherung der Information in Halbleiter-Bauelementen kommt eine Reihe von physikalischen Prinzipien zur Anwendung. So nutzt man bei den sog. statischen Speichern mit wahlfreiem Zugriff (SRAM = Static Random Access Memory) bistabile Flipflop-Schaltungen als Speicherelemente. Als aktive Elemente können dabei sowohl MOS-Transistoren als auch bipolare Transistoren zum Einsatz kommen. Die sog. dynamischen RAMs (DRAMs) nutzen dagegen die Ladungsspeicherung in einem Kondensator aus, der über einen Transistor angesteuert wird. Da durch unvermeidliche Leckströme die gespeicherte Ladung allmählich abfließt, müssen die Speicher in festgelegten Zeitabständen gelesen und neu eingeschrieben werden. Völlig andere Speicherpinzipien werden dagegen bei sog. Nur-Lese-Speichern (ROM = Read Only Memory) angewendet, deren Informationsgehalt selten oder gar nicht geändert werden soll.

Die Leistungsfähigkeit der Speicherschaltkreise wurde seit ihrer Serienreife bisher ständig gesteigert. So konnten der Integrationsgrad (Speicherkapazität) in den letzten 15 Jahren um etwa drei Größenordnungen und die Geschwindigkeit um eine Größenordnung erhöht werden, bei gleichzeitiger Senkung der Herstellungskosten pro Bit um etwa zwei Größenordnungen. Die zeitliche Entwicklung des Integrationsgrades erfolgt für die einzelnen Speichertypen etwas versetzt, wobei die DRAMs aufgrund ihres einfachen Aufbaus stets die Vorreiter sind und den Stand der Technik bezüglich der Beherrschung kleinster Strukturen repräsentieren. Die Wachstumsrate entspricht relativ gleichbleibend einer Vervierfachung der Speicherkapazität pro Schaltkreis in jeweils drei Jahren. Mit dem Generationswechsel vom 1-MBit- zum 4-MBit-Speicher wurde bereits der Einstieg in den dreidimensionalen Aufbau der Speicherzellen vollzogen. Schon beim 4-MBit-Speicherchip liegen die kritischen Abmessungen der Bauelemente-Strukturen bei 0,7 µm und damit in der Größenordnung der Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Durch den Übergang zu kürzeren Wellenlängen bis hin zum UV-Bereich ist jedoch auch noch für 64-MBit- und sogar für 256-MBit-DRAM der Einsatz lichtoptischer Verfahren zur Strukturierung möglich. Während der 64-MBit-DRAM bereits in die Produktion geht, liegen für den 256-MBit-DRAM erst Prototypen vor. Die Folgegeneration mit einer Speicherkapazität von 1 GBit befindet sich noch im Forschungstadium.

Eine Speichervariante, die derzeit für die Anwendung als Massenspeicher (Flash-Card) stark an Bedeutung gewinnt, ist der sog. Flash-Speicher, der seinen Namen von der Eigenschaft des schnellen Löschens und Umprogrammierens erhielt. Flash-Speicher sind nichtflüchtige Speicher und kombinieren die zuverlässige Schreib-Lese-Technologie des UV-löschbaren, programmierbaren Festwertspeichers (EPROM) mit einer elektrischen Löschbarkeit. Flash-Speicher können segmentweise oder global elektrisch gelöscht werden. Hinsichtlich des Integrationsgrades entsprechen sie weitgehend den DRAM-Speichern.

Mit den bereits jetzt verfügbaren DRAM-Typen hoher Speicherkapazitäten (4-, 16- bzw. demnächst 64-MBit) sind als neue Anwendung mikroelektronischer Speicherschaltkreise sog. Solid State Recorder oder Silicon Disks ausreichender Speicherkapazität realisierbar, die magnetische Massenspeicher ersetzen können. Wegen des Wegfalls bewegter Teile sind solche Speichermodule insbesondere für einen Einsatz in rauherer Umgebung geeignet.

August 1996 Henner Wessel

Mikroprozessoren

Die Zentraleinheit von digitalen Rechnern wird von Prozessoren als steuernde und verarbeitende Einheiten gebildet. Diese können diskret aufgebaut sein, d.h. physikalisch aus einer Vielzahl von miteinander verbundenen Elementen bestehen. Durch die hohe Integrationsdichte von Halbleiterbausteinen wurde jedoch die Bereitstellung aller logischen Funktionen eines Prozessors auf einem einzigen hochintegrierten Baustein ermöglicht. Diese sog. Mikroprozessoren gehören neben den Speicherbausteinen zu den wichtigsten integrierten Bauelementen. Sie sind softwaremäßig programmierbare hochintegrierte Standardschaltkreise zur Ausführung logischer und arithmetischer Operationen und bilden den leistungsbestimmenden Teil vieler Rechner und Steuerungssysteme. Der ständig wachsende Bedarf nach höherer Rechnerleistung hat daher die Entwicklung immer leistungsfähigerer Mikroprozessoren ausgelöst.

Die bisher erreichten Leistungssteigerungen in der Verarbeitungsgeschwindigkeit der Mikroprozessoren beruhten im wesentlichen auf Fortschritten in der Halbleitertechnik, die mit immer kleineren Strukturabmessungen auch kürzere Schalt- und Signallaufzeiten ermöglichte. Der Fortschritt in der Integrationstechnik läßt sich durch die Zahl der in einem Baustein integrierten Transistoren illustrieren. Diese steigt pro Jahr um ca. 40 % (also in zehn Jahren ungefähr um einen Faktor 30) und liegt derzeit bei ca. 10 Millionen integrierten Transistoren.

Durch die Verkleinerung der Strukturen und die Vergrößerung der Chips steht immer mehr Fläche für das Schaltungsdesign zur Verfügung. Als allgemeiner Trend bei der Entwicklung der Standard-Mikroprozessoren ist zu beobachten, daß diese Fläche neben einer Verbreiterung der Wort- und Adreßbreite vor allem zu einer immer weitergehenden Integration von Komponenten genutzt wird, für die sonst neben der eigentlichen CPU getrennte Bauteile verwendet wurden. Das mittelfristige Ziel dieser Entwicklungslinie ist dabei ein kompletter Rechner auf einem Chip.

Die Leistungssteigerungen durch Architekturverbesserungen wie große Registersätze, Spezialrechenwerke, Pufferspeicher und Integration weiterer Rechnerkomponenten sind im Vergleich zu den durch die Hardware erreichten Leistungssteigerungen geringer. Als Architekturprinzip wurde im wesentlichen die Von-Neumann-Architektur beibehalten und evolutionär weiterentwickelt. Neue Rechnerarchitekturen, wie z.B. Pipeline-, Dataflow-, Transputer-, Vektor- und Systolischer-Array-Rechner werden für spezielle Anwendungsfelder wie digitale Signalverarbeitung und Fouriertransformation sowie Sprach- und Bildverarbeitung entwickelt.

Eine mehr auf einem anderen Designprinzip und weniger einem neuen Architekturprinzip basierende Entwicklung ist die RISC-Architektur (Reduced Instruction Set Computer). Damit wird eine Rechnerentwicklung bezeichnet, bei der man im Gegensatz zur bisherigen Entwicklung bei den sog. CISC-Rechnern (Complex Instruction Set Computer) höhere Prozessorleistung durch die Beschränkung auf elementare Grundfunktionen und deren optimale Hardware-Implementierung zu erreichen sucht. Die in der Vergangenheit

auseinanderlaufende Entwicklung von RISC und CISC wird bei neueren Entwicklungen durch Teilübernahmen der jeweils anderen Designprinzipien abgemildert.

Unter dem Begriff Anwendungsspezifische Integrierte Schaltungen bzw. ASICs (Application Specific Integrated Circuits) werden integrierte Schaltkreise zusammengefaßt, deren Funktion im Gegensatz zu Standardmikroprozessoren erst durch die Spezifikation des jeweiligen Anwenders festgelegt wird. Begünstigt durch die Fortschritte auf dem Gebiet der Halbleitertechnologie und der rechnergestützten Entwurfsverfahren nimmt die Verbreitung dieser auf spezielle Einsatzgebiete und Anwender maßgeschneiderten Chips immer mehr zu.

Durch den Einsatz von ASICs werden auch für Anwendungen mit nur kleineren Stückzahlen, bei denen die Entwicklung von Spezialschaltkreisen zu teuer ist und eine Realisierung durch Mikroprozessoren eine zu geringe Verarbeitungsgeschwindigkeit ergibt, die Vorteile der Integrationstechnologie erschlossen. Darüber hinaus hat ein Einsatz von ASICs noch weitere nichttechnische Vorteile zur Folge wie mögliche Kostensenkungen, erhöhte Nachbausicherheit und vereinfachte Lagerhaltung und Logistik, da weniger Bauteile verfügbar gehalten werden müssen.

ASICs werden in verschiedenen Typen angeboten, die sich vor allem in den Parametern Chipkomplexität, Designaufwand, Designflexibilität und Wirtschaftlichkeit als Funktion der Stückzahl unterscheiden. Die Entwicklung der ASICs in den nächsten Jahren ist aus Sicht der Halbleiterhersteller technologisch gekennzeichnet durch ein weiteres Anwachsen der Integrationsdichte sowie durch verbesserte Leistungsparameter insbesondere hinsichtlich Geschwindigkeit und Verlustleistung. Bis zum Jahr 2000 wird ein Anteil von 50 % am gesamten Halbleitermarkt erwartet.

August 1996 Henner Wessel

Chipfertigung

Für die Herstellung integrierter Schaltkreise wurden in den letzten beiden Jahrzehnten sehr leistungsfähige technologische Verfahren entwickelt, die im wesentlichen alle auf der sog. Planartechnologie basieren. Bei dieser Fertigungsmethode werden fast alle Teilprozesse auf der Oberfläche einer Halbleiterscheibe (Wafer) gleichzeitig für eine Vielzahl von Einzelschaltungen durchgeführt. Da der Fertigungsaufwand bei einer solchen Technologie nicht wesentlich steigt, wenn die Waferoberfläche feiner strukturiert wird, ergibt sich ein starker wirtschaftlicher Anreiz hin zu höher integrierten Schaltkreisen, um die Kosten pro Einzelschaltung bzw. Einzelfunktion zu senken.

Der Schwerpunkt der Fertigung liegt bei der Strukturierung der Wafer durch verschiedene Einzelprozeßschritte. Dieser sog. Scheibenprozeß repräsentiert im wesentlichen den technologischen Leistungsstand. Die mit Abstand wichtigsten Teilprozesse sind dabei die Lithographie- und Ätzprozesse, deren Beherrschung die Voraussetzung für die Weiterentwicklung hin zu höher integrierten Bauelementen ist.

Dem Herstellungsprozeß vorgelagert ist neben der Herstellung der Wafer ausgehend vom Rohmaterial auch der immer stärker rechnerunterstützte Entwurf (CAD) der Chips. Mit zunehmender Komplexität der Schaltungen gewinnen auch die abschließenden Prüf- und Testverfahren erheblich an Bedeutung. Ein allgemeiner Trend in diesem Bereich ist, daß die Prüfprozesse bereits beim Design durch entsprechend prüffreundliche Entwürfe berücksichtigt oder sogar geeignete Testprozeduren mit in die Schaltung integriert werden.

Mit der Verkleinerung der Strukturbreite und Erhöhung der Komplexität der integrierten Schaltkreise ist im gesamten Scheibenprozeß ein allgemeiner Trend zu weniger aggressiven Verfahrensschritten zu beobachten. Dies bedeutet insbesondere eine möglichst vollständige Eliminierung aller Hochtemperaturprozesse, um die damit verbundenen Strukturbelastungen bereits fertiger Schaltungsteile zu reduzieren. Ein weiterer allgemeiner Trend ist die Ersetzung aller naßchemischen durch präziser zu steuernde trockene Prozesse. So werden bei den Beschichtungs- und Dotierprozessen anstelle der epitaktischen Abscheidung aus der Gasphase zunehmend Ionenstrahlen eingesetzt, mit denen gezielter die gewünschten Veränderungen am Substrat vorgenommen werden können. Auch bei den Ätzprozessen werden zunehmend die naßchemischen Ätzbäder durch Trockenätzverfahren wie das Plasma- oder das Ionenätzen ersetzt.

Mit diesem Trend zu trockeneren und kälteren Prozessen verbunden ist auf der Seite der Gerätetechnik eine Tendenz zur Bearbeitung einzelner Wafer statt der bisher üblichen größeren Chargen zu erkennen. Diese Einzelbearbeitung bietet bessere Möglichkeiten zur Prozeßüberwachung und -steuerung, wie z.B. die Endpunktskontrolle beim Tiefenätzen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß mit immer höher integrierten Bauteilen und größer werdenden Waferdurchmessern die Zahl der Bauteile pro Wafer bereits so hoch ist, daß einerseits ihre Einzelfertigung wirtschaftlich gerechtfertigt ist und andererseits der Verlust ganzer Lose bei Prozeßfehlern zu teuer wäre. Inwieweit sich dieser Trend all-

gemein durchsetzt, ist allein durch Wirtschaftlichkeitsüberlegungen bestimmt, deren Ergebnis derzeit noch offen ist.

Das Grundproblem einer wirtschaftlichen Halbleiterfertigung ist die Ausbeute, d.h. die Zahl der brauchbaren Chips pro fertig prozessiertem Wafer. Eine Verschärfung hinsichtlich der tolerierbaren Zahl von Fehlern pro Flächeneinheit (Fehlerdichte) tritt bei jedem Übergang zu einer neuen, höher integrierten Schaltkreisgeneration ein. Eine zusätzliche Verschärfung des Ausbeuteproblems entsteht aufgrund der wachsenden Zahl der benötigten Prozeßschritte. Sie beträgt bei der Herstellung des 4-MBit-Speichers (DRAM) etwa 300 Schritte und nimmt mit jeder neuen Generation zu.

Die Lithographie ist der am meisten die Fertigungstechnologie bestimmende Einzelprozeß, da er einerseits in gleicher Form am häufigsten im Fertigungsablauf eines integrierten Schaltkreises durchlaufen wird und andererseits in seiner Gesamtheit, d.h. einschließlich Maskentechnik, den Kostenaufwand einer Halbleiterlinie als teuerster Einzelprozeß entscheidend mitbestimmt. Im Lithographieprozeß werden die vom Design vorgesehenen Strukturen auf den Wafer übertragen. Dazu können grundsätzlich sämtliche Strahlungsarten, wie Licht-, Röntgen- und Teilchenstrahlen (Elektronen, Ionen) benutzt werden. Das wichtigste Lithographieverfahren, das auch heute noch nahezu ausschließlich eingesetzt wird, ist nach wie vor die Lichtlithographie. Die damit erreichbaren Strukturabmessungen sind beugungsbedingt durch die Wellenlänge des verwendeten Lichtes nach unten begrenzt. Durch immer kurzwelligeres Licht bis hin zum UV mit ca. 0,2 µm Wellenlänge und Verbesserungen im Lithographieverfahren wurden immer kleinere Strukturen erschlossen. Sogar für den 1-GBit-DRAM (0,18 µm) wird die Lichtlithographie nicht mehr für ausgeschlossen gehalten, so daß der Übergang zu anderen Lithographietechnologien wie der Röntgenstrahllithographie, der mit erheblichen Umstellungen im gesamten Fertigungsprozeß verknüpft ist, vermutlich noch weit ins nächste Jahrzehnt verschoben werden kann.

Ein unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht unerheblicher Teilprozeß in der Bauelementefertigung mit einem Kostenanteil in der Größenordnung von 50 % ist die abschließende Montage des vereinzelten Chips in ein Gehäuse, das Verbinden der Anschlußfelder auf dem Chip mit den Gehäuseanschlüssen (Bonden) und der Gehäuseverschluß (Verkappung). Der hohe Kostenanteil entsteht vor allem, weil mit diesem Teilprozeß die kostensparende parallele Behandlung der Chips auf einem Wafer aufgegeben werden muß.

August 1996 Henner Wessel

Mikroelektronik

Die Nutzung elektronischer Komponenten für alle Arten von Produkten spielt schon seit vielen Jahren eine Schlüsselrolle in den nationalen Volkswirtschaften. Hier hat sich insbesondere die Mikroelektronik zur entscheidenden Antriebskraft für den Fortschritt in praktisch allen Produktions- und Dienstleistungsindustrien entwickelt. Sie bestimmt wesentlich die Leistungsfähigkeit nicht nur der Elektronikindustrie, sondern ist mitentscheidend für die Fortschritte in anderen Branchen wie Automobilbau, Maschinen- und Anlagenbau sowie vor allem Informations- und Kommunikationsindustrie. Ein indirekter Einfluß auf viele industrielle Bereiche wird darüber hinaus durch die ständig steigenden Anforderungen an die Fertigungstechnik und deren Umfeld, wie z.B. die Bereitstellung hochreiner Materialien oder von Reinsträumen, ausgeübt.

Aufgrund der einzigartigen elektronischen Eigenschaften des Materialsystems Silizium-Siliziumdioxid, welches u.a. die Realisierung von MOS-Feldeffekttransistoren ermöglicht, ist Silizium seit langem das dominierende Basismaterial der Mikroelektronik. Hinzu kommt die Möglichkeit zur monolithischen Integration mehrerer Bauelemente und damit Funktionen auf einem Kristallstück (Chip) und die Erfindung der Planartechnik, die eine parallele schichtartige Fertigung aller Bauelemente an der Kristalloberfläche ermöglicht. Neben einer drastischen Miniaturisierung und einer damit verbundenen Erhöhung der Zuverlässigkeit bringen diese Schaltkreise als entscheidenden Vorteil eine starke Reduktion der Kosten pro (logischer) Funktion.

Herausragender Trend der Mikroelektronik ist eine fast naturgesetzmäßig eingehaltene Zunahme der Komplexität, die - ausgedrückt in Zahl der Bauelemente pro Chip - innerhalb von jeweils drei Jahren um das Vierfache zunimmt. Allerdings dürfte diese bisher seit vielen Jahren ungebrochene Entwicklungsdynamik in absehbarer Zeit an technologische Grenzen stoßen, die bei Strukturbreiten im Nanometerbereich erwartet werden. Noch höher integrierte Bausteine sind durch die Entwicklung dreidimensionaler Chip-Strukturen (3-D-Chip) möglich.

Auch wird die Anwendung neuer Architekturprinzipien (Parallelverarbeitung, Vernetzung) bereits auf der Prozessorebene zu weiteren Leistungssteigerungen bei den Bausteinen der Mikroelektronik führen. Neben hochintegrierten Standardbausteinen wie Mikroprozessoren und optimierten Schaltkreisen für Spezialanwendungen werden zunehmend sog. Anwendungsspezifische Integrierte Schaltungen (ASICs = Application Specific Integrated Circuits) verfügbar, die einerseits als weitgehend vorfabrizierte standardisierte Logikbausteine die Vorteile der Hochintegration nutzen können und andererseits durch die Festlegung der endgültigen Spezifikation erst beim Anwender ausreichend Flexibilität für ein breites Anwendungsspektrum bieten. Ein weiterer wichtiger Trend der Siliziumtechnik ist die sog. Wafer Scale Integration, d.h. die Implementierung unterschiedlicher höchstintegrierter Systeme auf einer Siliziumscheibe (Wafer). Diese Methode konkurriert mit der sog. Multichip-Modul-Technologie (MCM), bei der mehrere ausgetestete Chips auf geeignete Träger montiert werden, die bereits alle Verbindungen und passiven Schaltkreise enthalten.

Elektronische Bauelemente aus III-V-Halbleitern, und hier insbesondere Galliumarsenid, mußten sich bisher gegenüber der Silizium-Mikroelektronik mit Nischenanwendungen begnügen. Ihre Bedeutung wird in Zukunft jedoch zunehmen, da die materialbedingten Vorteile im Bereich hoher Frequenzen sie zu Schlüsselbauelementen für die mobile Kommunikation und die Radartechnik machen. Allerdings müssen sie sich zunehmend auch in diesem Bereich der Konkurrenz durch verbesserte Silizium-Bipolar-Schaltkreise stellen, bei denen insbesondere durch die Verwendung von sog. Hetero-Bipolartransistoren (HBT) eine Verbesserung der Operationsgeschwindigkeit erwartet wird.

Für viele potentielle Anwendungen der Mikroelektronik werden erheblich höhere Umgebungstemperaturen unumgänglich. Da weder Silizium noch Verbindungshalbleiter diesen Anforderungen entsprechen, werden für Hochtemperaturanwendungen zunehmend neue Halbleiterwerkstoffe wie Diamant und Siliziumkarbid interessant.

Zur Erzielung von noch wesentlich höheren Integrationsdichten, als sie mit Halbleitern erreichbar sind, erscheint sehr langfristig die Verwendung von Molekülen als Grundbausteine für elektronische Schaltkreise denkbar. Zum jetzigen Zeitpunkt ist das Entwicklungspotential dieser sog. Molekularen Elektronik jedoch noch völlig offen. Auch muß zukünftig mit der Möglichkeit einer Realisierung ultraschneller hochtemperatursupraleitender Josephson-Chips mit geringster Verlustleistung gerechnet werden.

Eine vor allem für Spezialanwendungen z.B. in der Raumfahrttechnik interessante Entwicklung der Mikroelektronik sind neuartige Vakuumröhren in Mikrotechnik, die hinsichtlich ihrer Hochfrequenz- und Hochleistungseigenschaften Transistorbausteine in herkömmlicher Halbleitertechnologie bei weitem übertreffen. Dieses Gebiet, das durch die Anwendung mikrosystemtechnischer Methoden auf die Miniaturisierung der Vakuumelektronik gekennzeichnet ist, wird als Vakuum-Mikroelektronik bezeichnet.

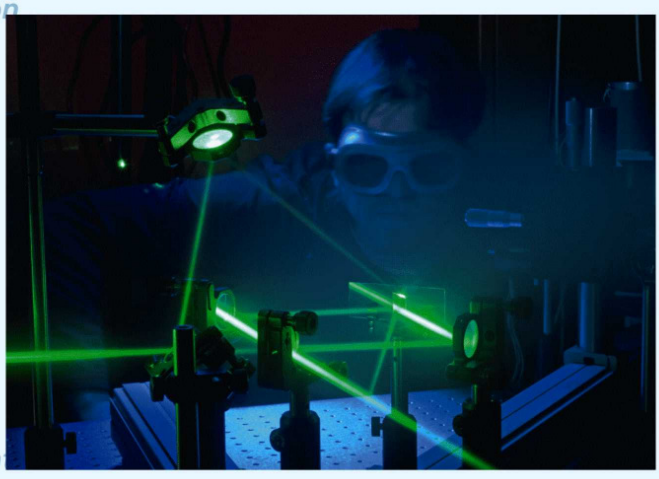
Generell hat die Innovationsgeschwindigkeit der Mikroelektronik wesentlichen Einfluß auf die Generationenfolge bei elektronischen Geräten und Systemen, was in der Regel mit Leistungssteigerungen sowie mit Reduzierungen von Volumen, Gewicht und Preis verbunden ist. Ermöglicht werden aber auch neuartige Systeme, die ohne Mikroelektronik nicht realisierbar wären. Während die Dynamik der Elektronik in früheren Jahren sehr stark durch den militärischen Bereich geprägt wurde, kommen seit Mitte der achtziger Jahre die wesentlichen Antriebskräfte der Elektronik bzw. Mikroelektronik aus dem zivilen Markt.

August 1996 Thomas Kretschmer

Wissen & Information



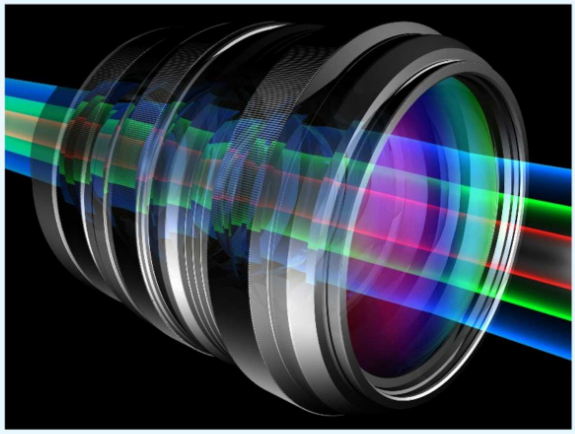
& Information
en & Information
Wissen & Information
Wissen & Information
Wissen & Information



Wissen & Informa

Optische Technologien

Tailored Light	2009	
	2008	
Flachbildschirme	2007	
	2006	Lithographieverfahren
Integrierte Optik	2005	Optische Materialien
Adaptive Optik	2004	
	2003	
Nichtlineare Optik		
Holographie	2002	
	2001	
	2000	
	1999	Displaytechnologien
Photonik	1998	Halbleiterlaser
	1997	
	1996	



Tailored Light

Ein wesentliches Ziel der modernen Optik ist es, Licht gezielt als Träger von Informationen oder zur Untersuchung und Bearbeitung von Materie einzusetzen. Dazu muss das Licht hinsichtlich seiner Eigenschaften kontrolliert erzeugt, geformt und geführt werden. Dieses als Tailored Light (Maßgeschneidertes Licht) bezeichnete technologische Konzept eröffnet vielfältige neue Anwendungen zur Übertragung, Speicherung und Visualisierung von Daten aber auch in der Materialbearbeitung oder in der Medizintechnik. Ebenso findet es immer häufiger Verwendung bei konventionellen Beleuchtungssystemen.

Treiber der Entwicklungen ist in erster Linie der Laser, der durch stimulierte Emission kohärentes monochromatisches Licht erzeugt. Die meisten modernen Laseranwendungen, sei es in der Grundlagenforschung oder in der Materialbearbeitung, erfordern Laserkonzepte mit den unterschiedlichsten Strahleigenschaften. Durch geeignete Wahl der Strahlparameter kann Laserlicht hinsichtlich Intensität, Zeit und Wellenlänge gezielt eingestellt werden. Hier bieten derzeit die so genannten Faserlaser bzw. Faserverstärker das größte Potential.

Kernstück eines Faserlasers ist eine Lichtleitfaser, die das aktive Medium enthält, in dem der Laserprozess stattfindet. Durch die besonders enge Führung des Lichts in der Faser wird eine exzellente Strahlqualität erzielt. Aufgrund dieser Eigenschaft lassen sich Anwendungen realisieren, bei denen große Bauteile aus mehreren Metern Entfernung geschnitten, geschweißt oder beschichtet werden können. So lässt sich z.B. beim Einsatz des so genannten Remote-Schweißens (Fernschweißen) im robotergestützten Karosseriebau der Strahl eines Faserlasers direkt von einer Fokussieroptik an der Roboterhand auf das Werkstück lenken. Da der Roboter nur minimale Bewegungen ausführen muss, um auf dem Werkstück größere Positionierbewegungen zu realisieren, ist dieses Verfahren bis zu zehnmal schneller als das konventionelle Punktschweißen.

Ein Laserkonzept, das maßgeschneidertes Licht hinsichtlich des Parameters Zeit bereitstellt, ist der so genannte Femtosekundenlaser. Dieser sendet extrem kurze Lichtpulse mit einer Dauer von ca. 10-15 Sekunden aus. Mit diesen Pulsen können Materialien und Gewebe sehr exakt bearbeitet werden, weil die Zeit zu ihrer Erwärmung deutlich länger ist als die Einwirkdauer der Laserstrahlung. Daher treten z.B. bei der Materialbearbeitung keine Spannungen oder Risse auf. Aber auch in der Augen- und Zahnmedizin lassen sich damit hochpräzise minimalinvasive Operationen mit geringeren Nebenwirkungen als bei herkömmlichen Behandlungsmethoden durchführen.

Auch die Wahl der Wellenlänge ist für viele Laseranwendungen, wie z.B. bei der Datenspeicherung, ein wesentlicher Parameter. Durch die Entwicklung des so genannten Blauen Lasers ist es möglich geworden, auf einer CD oder DVD pro Volumen deutlich mehr Informationseinheiten zu schreiben, zu speichern und auszulesen als mit den herkömmlichen, im nahen Infrarotbereich arbeitenden Systemen größerer Wellenlänge. So bietet z.B. das Speichermedium der nächsten Generation (Blu-Ray Disc, BD) mehr als fünfmal so viel Speicherplatz wie eine DVD.

Ein weiterer Wellenlängenbereich von großem Interesse ist das Extreme Ultraviolett (EUV). Es handelt sich um eine extrem kurzwellige Strahlung, weit unterhalb des sichtbaren Lichts und nahe der Röntgenstrahlung. Wie im Röntgenbereich sind hier klassische optische Quellen und strahlformende Komponenten nicht mehr einsetzbar. Stattdessen werden spezielle Plasma-Quellen, die Gasentladungen im Vakuum nutzen, und hochreflektierende EUV-Optiken entwickelt. EUV-Licht soll für die nächste Lithographiegeneration in der Chipherstellung eingesetzt werden. Erste Tests waren bereits erfolgreich. Darüber hinaus kann EUV-Strahlung für mikroskopische Untersuchungen von Strukturen im Nanometerbereich verwendet werden.

Auch die Nutzung von langwelliger Terahertzstrahlung, die im Wellenlängenbereich zwischen der Infrarotstrahlung und den Mikrowellen liegt, eröffnet neue Möglichkeiten in der Analytik, Mess-, Prüf- und Überwachungstechnik. Wegen grundsätzlicher Schwierigkeiten beim Erzeugen und Detektieren wurde sie bisher aber kaum angewendet. Es gibt allerdings eine Reihe von Bestrebungen, diese Strahlung kommerziell zu erschließen. Als aussichtsreiche Kandidaten für leistungsstarke Strahlenquellen gelten auch in diesem Spektralbereich Faserlaser, die im Bereich von Femtosekunden gepulst sind. Ein alternativer Ansatz der Erzeugung geht von der Entwicklung höchstfrequenter elektronischer Bauelemente aus.

In der klassischen Beleuchtungstechnik geht der Trend zu energie- und ressourcenschonenden Lichtquellen. Dies erfordert auch hier einen zunehmenden Einsatz von maßgeschneidertem Licht. Es ist damit zu rechnen, dass die traditionellen Glühbirnen im kommenden Jahrzehnt vollständig vom Markt verschwinden werden. Neben wirksamen Halogenlampen werden vor allem punktförmige Leuchtdioden (LED) und flächige organische Leuchtdioden (OLED) große Verbreitung finden. Es ergeben sich völlig neue Gestaltungsmöglichkeiten und eine bisher unerreichte Flexibilität. Die denkbaren Anwendungen reichen von leuchtenden Kacheln und Klebefolien über rollbare elektronische Zeitungen bis hin zu Wandtapeten, die auch als TV- oder Internet-Terminal nutzbar sind. Ebenso könnten intelligente Notbeleuchtungen oder Führungslichter auf Straßen, Bürgersteigen und öffentlichen Plätzen die allgemeine Sicherheit deutlich erhöhen. Die Beleuchtungsaufgabe wird zukünftig weniger von Einzelkomponenten erfüllt werden, sondern aus kompletten Leuchtsystemen mit Lampen oder Leuchtdioden, Sensoren und Elektronik bestehen. Solche Systeme können sich z.B. über Bewegungsmelder automatisch an die Situation anpassen und die Beleuchtung effizient und möglichst energiesparend realisieren.

November 2008 Claudia Notthoff

Flachbildschirme

Als Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine haben Bildschirme im Bereich der modernen Informations- und Medientechnologien eine zentrale Bedeutung. Hier verdrängen digitale Flachbildschirm-Technologien immer stärker die klassische analoge Röhrentechnik, bei der Elektronenstrahlen über den gesamten Bildschirm geführt werden und Leuchtstoffe zur Lichtemission anregen. Aufgrund ihrer guten Eigenschaften (z.B. wenig Platzbedarf, niedriges Gewicht, geringer Energieverbrauch) erschließen die Flachbildschirme viele neue Anwendungsbereiche. Insbesondere portable Geräte wie Notebooks, Handys, Digitalkameras oder PDAs (Personal Digital Assistant) wären ohne ihren Einsatz nicht realisierbar.

Trotz der verschiedenen technologischen Umsetzungen arbeiten alle derzeit erhältlichen Flachbildschirme nach dem gleichen Grundprinzip. Sie bestehen aus einzelnen Bildpunkten (Pixeln), die jeweils drei Farbzellen (rot, grün, blau) umfassen. Jede dieser Zellen ist einzeln ansteuerbar.

Derzeit dominieren die Flüssigkristalldisplays (LCD, Liquid Crystal Displays) immer noch den Markt. LCDs bestehen aus einer von hinten beleuchteten Flüssigkristallschicht. Die einzelnen Flüssigkristalle verändern je nach angelegter Spannung ihre Lichtdurchlässigkeit, wodurch die vor ihnen liegenden Farbzellen hell oder dunkel erscheinen. Heutiger Standard sind die so genannten TFT-Displays, bei denen jede Zelle von einem Feldeffekt-Transistor gesteuert wird. Wegen des hohen Stromverbrauchs der bisher zur Hintergrundbeleuchtung verwendeten Leuchtstofflampen werden zunehmend stromsparende lichtemittierende Dioden (LEDs) eingesetzt.

Insbesondere im Bereich der Fernsehgeräte stehen Plasmabildschirme in direkter Konkurrenz zu den LCDs. Die jeweilige Farberzeugung findet hier in Gasentladungszellen statt, bei denen eine Leuchtschicht direkt angeregt wird. Aus diesem Grund lassen sich Plasmabildschirme besser von der Seite einsehen als LCD-Displays. Darüber hinaus eignen sie sich aufgrund der hohen Schaltgeschwindigkeiten besonders gut für die Darstellung schneller Bildfolgen z.B. in Videospielen. Wegen der relativ hohen Produktionskosten wird sich der Einsatz von Plasmabildschirmen auch zukünftig eher auf den TV-Sektor oder großflächige Anzeigen auf Messen oder in der Industrie beschränken. Prototypen mit 103 Zoll (261 cm) Bilddiagonale und 1920 x 1080 Bildpunkten (ca. 6,2 Mio. Farbzellen) existieren bereits.

Auch bei den Elektrolumineszenz-Bildschirmen (EL-Displays) dominieren bisher vor allem großflächige Anwendungen z.B. für Werbedisplays. Bei dieser Technologie werden Leuchtstoffe zwischen zwei transparenten Elektroden durch ein elektrisches Wechselfeld zur Lichtemission angeregt. Ihre Herstellung ist äußerst günstig, da sich der Leuchtstoff zusammen mit der benötigten Isolationsschicht mittels Siebdrucktechnik auf das Trägermaterial aufbringen lässt. Durch die Verwendung von transparenten und flexiblen Trägermaterialien sind beidseitig leuchtende Elemente in beliebiger Form denkbar. Aufgrund der fortschreitenden Miniaturisierung könnten EL-Mikrodisplays in naher Zukunft die Nachfolge von Flüssigkristalldisplays antreten.

Ein besonderes Potenzial wird auch den organischen Leuchtdioden (OLEDs) zugeschrieben. Da diese selbst leuchten, sind OLED-Displays heller und schneller als LCDs. Die größten Vorteile dürften in Zukunft jedoch vor allem in ihrer Herstellung liegen. So ist es möglich, OLEDs mit Tintenstrahldruckern auf flexiblen Materialien, wie z.B. dünnen Folien, aufzutragen, um flexible Bildschirme herzustellen. Bisher wurden OLEDs aufgrund ihrer Leuchtstärke und der unterschiedlichen Lebensdauer der einzelnen Leuchtstoffe nur zur Produktion von kleineren Displays in Digitalkameras, Handys oder ähnlichen Produkten eingesetzt. Neueste Entwicklungen zeigen, dass es in Zukunft auch möglich sein wird, großflächige Volldisplays herzustellen. Ein 21-Zoll-OLED-Display für den Einsatz als Fernsehbildschirm wurde bereits entwickelt.

Für großflächige Projektionen mit Bilddiagonalen von mehr als 50 Zoll werden zukünftig auch Geräte basierend auf SED-Technologie (Surface Conduction Electron Emitter Display) zur Verfügung stehen. Sie arbeiten wie die herkömmliche Kathodenstrahlröhre, jedoch wird anstelle des voluminösen Glaskolbens eine flache Glaswanne oder ein Miniröhrenfeld verwendet. Weil für jede Farbzelle ein eigenes Kathoden-Anoden-System benötigt wird und sich die Elektronen emittierende Oberfläche und die fluoreszierende Schicht direkt gegenüberliegen, entfällt die Ablenkung des Elektronenstrahls. Die gesamte Bauhöhe des Displays beträgt daher nur etwa 2 mm mit allen Vorteilen der Kathodenstrahlröhre, wie z.B. weite Betrachtungswinkel, hoher Kontrast und Helligkeit.

Engen Bezug zu Flachbildschirmen hat das so genannte Elektronische Papier, an dem seit längerer Zeit gearbeitet wird. Erste Varianten in Schwarz-Weiß sind mittlerweile erhältlich. Die zwischen zwei Folien befindliche elektronische Tinte besteht entweder aus unterschiedlich geladenen schwarzen und weißen Kugeln oder aus zweifarbigen dielektrischen Kugeln, die über eine äußere Spannung gesteuert werden. Eine mögliche Variante verwendet elektrochrome Moleküle, die je nach angelegter Spannung ihre Farbe verändern.

Generell gibt es auch Bestrebungen, Displays mit zusätzlichen Funktionalitäten auszustatten. So ist es z.B. durch Verwendung spezieller Linsensysteme gelungen, Displays herzustellen, die beim Betrachter den Eindruck hervorrufen, Bildinhalte würden aus dem Display nach vorne heraustreten und dort existieren. Außerdem wurde ein Kamerasystem für LCDs entwickelt, das aus über den ganzen Bildschirm verteilten mikroskopisch kleinen Bildsensoren besteht. Damit ließe sich z.B. die Kamerafunktion von Handys deutlich verbessern und das vom Display ausgestrahlte Licht könnte zur Beleuchtung des Motivs beitragen.

Juli 2006 Claudia Notthoff

Lithographieverfahren

In der ursprünglichen Bedeutung wird mit dem Begriff Lithographie (griech. Steinschrift) eine Flachdrucktechnik bezeichnet, die als ein Vorläufer des modernen Offsetdrucks gelten kann. Im Prinzip basiert sie auf der schrittweisen Vervielfältigung einer graphischen Darstellung unter Verwendung von Kalkstein als Druckplatte. Seit ihrer Erfindung vor ca. 200 Jahren hat sie sich insbesondere im künstlerischen Bereich zu einem weitverbreiteten Verfahren zur Herstellung von Graphiken entwickelt. Bedingt durch eine gewisse Ähnlichkeit der Verfahrensabläufe wurde in jüngster Zeit der Begriff Lithographie auf eine Gruppe von Fertigungsverfahren der Halbleitertechnik übertragen, bei der mit Hilfe von Strahlen oder geeigneten Prägewerkzeugen Strukturen auf die Oberfläche einer Trägersubstanz geschrieben werden. Diese bilden eine wesentliche technologische Grundlage für die Herstellung höchstintegrierter Schaltungen der Mikro- und Nanoelektronik.

Im Prinzip lassen sich in der Halbleitertechnik zwei Arten von Lithographieverfahren unterscheiden. Besonders gut für die Massenfertigung von Bauelementen eignen sich die parallelen Prozesse, bei denen die gesamte Oberfläche eines Materials durch Einwirkung elektromagnetischer Strahlung oder bestimmter Teilchenstrahlen gleichzeitig strukturiert wird. In der Regel wird hier die Struktur geeigneter Masken unter Verwendung von Fotolacken und Anwendung von Ätzprozessen schrittweise auf das Substrat übertragen. Im Gegensatz hierzu wird bei den seriellen Methoden die Struktur sukzessive eingeschrieben, was vor allem für individuelle Anforderungen interessant ist.

Das bis heute dominierende Parallelverfahren zur Strukturierung von Halbleiteroberflächen ist die Optische Lithographie. Hier ist die kleinstmögliche erzielbare Struktur im Wesentlichen durch die Wellenlänge des Lichts bestimmt. Heute erfolgt die Massenfertigung mit Excimerlasern (Wellenlängen: 248 nm und 193 nm), die Strukturbreiten von ca. 100 nm ermöglichen. Geplant ist eine weitere Steigerung des Auflösungsvermögens durch Reduktion der Wellenlänge bis in den Bereich des extremen Ultraviolett (EUV) bei einer Wellenlänge von 13,5 nm. Die EUV-Lithographie soll Strukturabstände bis 35 nm ermöglichen. Allerdings lassen sich in diesem Wellenlängenbereich die bisher verwendeten transmittierenden Linsen nicht mehr einsetzen. Stattdessen sind reflektierende optische Elemente, wie z.B. Spiegel, erforderlich.

Bei noch kürzeren Wellenlängen arbeitet die Röntgenstrahl-Lithographie, typischerweise im Bereich von 1 nm. Wegen der besonders hohen Anforderungen an die Strahlqualität ist dieses Verfahren derzeit nur mit relativ aufwendigen Strahlungsquellen möglich. Ebenfalls bereitet die Herstellung der hierfür geeigneten Masken große Probleme, die bisher noch nicht zufriedenstellend gelöst werden konnten.

Die Strukturierung von Oberflächen mit Elektronen- oder Ionenstrahlen kann sowohl als Masken-Parallelverfahren als auch über sequentielles Schreiben mit fokussierten Strahlen erfolgen. So basiert die Elektronenstrahl-Projektion auf der definierten Streuung an einer für Elektronen transparenten Folie, die im maskierenden Bereich mit einer metallischen Streuschicht verstärkt ist. Elektronen, die auf diese Streuschicht treffen, werden stark abgelenkt, während die anderen nur geringfügig ihre Ausbreitungsrichtung ändern und

zur Belichtung führen. Hiermit konnte bereits eine Auflösung von 30 nm Linienbreite realisiert werden. Beim so genannten Elektronenstrahlschreiben wird ein feiner Elektronenstrahl mit einem Durchmesser von wenigen Nanometern über eine Substratoberfläche geführt, die ebenfalls mit einem Fotolack beschichtet ist. Die typische Auflösung dieser Methode liegt bei unter 50 nm.

Eine noch bessere Auflösung erzielt man mit der Ionenstrahl-Projektion aufgrund der geringen Streuung der Ionen im Lackmaterial. Es wird erwartet, dass bei Verwendung von Wasserstoff- und Heliumionen in Verbindung mit empfindlichen Fotolacken Strukturen von unter 20 nm realisiert werden können. Beim Ionenstrahlschreiben werden entweder die Ionen direkt auf dem Substrat deponiert oder Teile der Oberfläche mit dem Ionenstrahl abgetragen. Theoretisch sind mit diesem Verfahren bei Verwendung leichter Ionen Linienbreiten bis 1 nm zu erreichen.

Bei der Atomstrahl-Lithographie wird der Fluss der auf der Oberfläche eines Substrats abzuscheidenden Atome durch so genannte Lichtmasken räumlich strukturiert. Diese entstehen durch Überlagerung von Laserstrahlen gleicher Wellenlänge, die in einer Ebene senkrecht zum Atomstrahl verlaufen. Durch die Wahl der Lichtfrequenz der Masken können Atome unterschiedlicher Elemente individuell manipuliert werden, so dass eine dreidimensionale Strukturierung in einem Schritt ohne zusätzliche Ätzprozesse realisierbar wird. Auch bei der Atomstrahl-Lithographie gibt es die Möglichkeit einer seriellen Variante, Atomstift genannt.

Neben den strahlungsbasierten Verfahren kommen zunehmend auch andere lithographische Methoden zur Mikro- bzw. Nanostrukturierung von Oberflächen zum Einsatz. So lassen sich z.B. Stempel (z.B. auf Polymerbasis) oder Gussformen zur Strukturierung verwenden, die ihrerseits mittels Optischer oder Elektronenstrahl-Lithographie hergestellt werden können. Diese Technik vermeidet die Verwendung agressiver Chemikalien und wird daher als Soft-Lithographie bezeichnet.

Noch in den Anfängen einer großtechnischen Nutzung befindet sich die so genannte Rastersonden-Lithographie. Sie nutzt die ursprünglich zur Untersuchung von Strukturen im atomaren Bereich entwickelten Rasterkraft- und Rastertunnelmethoden. Die Vorteile liegen hierbei vor allem darin, dass räumliche Veränderungen auf der Oberfläche bereits während der Strukturierung direkt gemessen und gesteuert werden können. Hiermit lassen sich Gräben mit Breiten kleiner 50 nm und Tiefen von bis zu 15 nm herstellen. Derartige Verfahren kann man z.B. bei der Herstellung von zukünftigen nanoelektronischen Bauelementen verwenden.

November 2005 Claudia Notthoff

Integrierte Optik

Die Integrierte Optik befasst sich mit der Miniaturisierung optischer Elemente, Komponenten und Funktionen auf einem gemeinsamen Trägermaterial. In Analogie zu den integrierten Schaltungen (ICs) in der Elektronik lassen sich optische Bauelemente, wie z.B. Filter, Verstärker, Lichtablenker und -modulatoren, zu so genannten integriert-optischen Schaltkreisen (IOCs) kombinieren, wobei das Licht in ebenen Wellenleiterstrukturen mittels Totalreflexion geführt wird. Dies ermöglicht nicht nur eine direkte Informationsverarbeitung ohne Umwandlung in elektrische Signale, sondern hat auch den Vorteil einer erhöhten Abhör- und Störsicherheit. Es treten keine Wechselwirkungen mit elektrischen Feldern auf, die Signalübertragung kann mit großer Bandbreite erfolgen und die Überlagerung verschiedener Frequenzen (Multiplexing) ist möglich. Darüber hinaus ist eine direkte Ankopplung der Bauelemente an optische Glasfasern realisierbar. Werden optische und elektronische Komponenten auf dem gleichen Chip untergebracht, so spricht man auch von integrierten optoelektronischen Schaltkreisen (IOECs).

Im Gegensatz zur Integrierten Elektronik, deren Schaltkreise in der Regel auf Siliziumwafern hergestellt werden, gibt es für die Integrierte Optik kein bevorzugtes Basismaterial. Für den Bau von Lasern und Modulatoren werden Halbleiter, wie z.B. Galliumarsenid, genutzt. Elektrooptische (z.B. Lithiumniobiat) und magnetooptische Materialien (z.B. magnetische Granate) finden Verwendung in Schaltern und Kopplern, und für Wellenleiter sind Glas, Quarz und Polymere die wichtigsten Werkstoffe.

Die zur Herstellung integriert-optischer Bauteile notwendigen Technologien ähneln denen der Mikroelektronik. Eingesetzt werden z.B. Dünnschichttechniken, Mikrolithographie, Diffusionsverfahren und das so genannte Pigtailing (Kleben, Verbinden). Es gibt sowohl monolithische Systeme, bei denen auf Basis eines einzigen geeigneten Halbleitermaterials, wie z.B. Galliumarsenid oder Indiumphosphid, ein komplettes Modul erzeugt wird, als auch hybride Systeme, bei denen verschiedene Substratsysteme miteinander verbunden werden. Die erste Variante hat dabei den Vorteil, dass bis auf die Ankopplung der Glasfasern keine Justierung einzelner optischer Komponenten erfolgen muss. Allerdings kann eine Designänderung innerhalb des Moduls unter Umständen zu aufwändigen Änderungen des Fertigungsprozesses führen.

Ein vielfach eingesetztes Verfahren zur Realisierung von integriert-optischen Strukturen ist die Silizium-Mikrostrukturtechnik. Hierbei werden durch Ätzprozesse feine Strukturen auf einem Siliziumwafer erzeugt, die zur Aufnahme der Glasfasern und der optoelektronischen Komponenten dienen. Eine Alternative hierzu bildet das SIGA (Silizium-Mikrostrukturierung-Galvanik-Abformung)- Verfahren, das ebenso auf Silizium-Mikrostrukturen aufbaut, die aber über einen galvanischen Prozess in eine Metallform überführt werden. Diese Form dient als Abformwerkzeug für die Herstellung mikrostrukturierter Kunststoffsubstrate durch Heißprägen oder Spritzgießen. Hierbei liegen die Wellenleiterkanäle in Form feiner Kanäle vor, die anschließend mit einem hochbrechenden flüssigen Polymer ausgefüllt und mit einer Deckelfolie verpresst werden. Die typischen Abmessungen der so hergestellten Bauteile betragen einige Quadratzentimer bei einer Dicke von 1-2 mm. Auf Basis der SIGA-Technik sind bereits erste thermooptische Faserschalter her-

gestellt worden, die z.B. bei einem Bruch der Glasfaser-Hauptleitung in Telekommunikationsnetzen die optischen Signale innerhalb einer Millisekunde auf eine Ausweichleitung schalten können.

Weitere Arbeiten beschäftigen sich z.B. mit der Herstellung elektrisch steuerbarer Komponenten aus ferroelektrischen Kristallen wie Lithiumniobat. Durch photolithographische Strukturierung lassen sich dessen Eigenschaften so verändern, dass durch Anlegen einer Spannung Licht moduliert, gelenkt oder fokussiert werden kann, wie es z.B. zum Beschreiben und Lesen von optischen Speichermedien mit mehreren Informationsschichten benötigt wird. Zunehmende Bedeutung gewinnen auch die integriert-optisch aufgebauten Faserlaser. Im Vergleich zu konventionellen Festkörperlasern zeichnen sie sich nicht nur durch eine größere Leistung aus, sondern auch durch eine bessere räumliche Strahlstabilität. Sie werden z.B. zur Erzeugung extrem kurzer Laserpulse eingesetzt.

Die Entwicklung integriert-optischer Bauteile wurde bisher vor allem durch die Anforderungen der Telekommunikationsbranche vorangetrieben. So sind z.B. Wellenlängenmultiplexer, Vielfachverzweiger und elektrooptische Modulatoren in großen Stückzahlen im Einsatz. Aber auch auf dem Gebiet der Sensorik, der Lasertechnik oder der Biomedizin sind integriert-optische Bauelemente immer stärker vertreten. So wird z.B. an einem Analysesystem für die medizinische Diagnostik gearbeitet, mit dem sich wichtige Blutparameter direkt bestimmen lassen. Das Sensorprinzip besteht darin, dass sich die Brechzahl von Wellenleitern charakteristisch ändert, wenn sich auf ihrer Oberfläche Moleküle anlagern. Dieses Prinzip könnte auch in der Pharmawirkstoffforschung eingesetzt werden, um mit Hunderten von Sensoren, integriert auf einem Chip, eine große Zahl von Agenzien gleichzeitig zu testen.

Auch in der Computertechnik lassen die weiter zunehmenden Datenmengen den Einsatz von integriert-optischen Systemen z.B. auf Galliumarsenid-Basis für die Chip-Chip- und Board-Board-Kopplung in Verbindung mit anderen integriert-optischen Komponenten sinnvoll erscheinen. Hierbei wäre es denkbar, so genannte photonische Kristalle, bei denen sich Licht nur in bestimmten Richtungen ausbreiten kann, aus Halbleitermaterialien herzustellen, um diese in integrierten Schaltkreisen einzusetzen, die optische und elektronische Funktionalitäten miteinander verbinden.

Die photonischen Kristalle gelten aber auch im Hinblick auf eine Realisierung optischer Computer als aussichtsreiche Kandidaten für eine Reihe von Komponenten wie Dioden oder Transistoren bis hin zu komplexen logischen Schaltkreisen. Unabhängig von den eingesetzten Materialien sind durch den Einsatz von Lichtpulsen zur Informationscodierung völlig neue mehrstufige Rechenlogiken denkbar, bei denen jeder Zustand durch eine andere Lichtwellenlänge repräsentiert wird. Bisher wurden schon einfache Schaltungen mit wenigen integriert-optischen Elementen realisiert, aber die Entwicklung rein optischer Digitalrechner wird noch längere Zeit beanspruchen.

Oktober 2004 Claudia Notthoff

Optische Materialien

Als Optische Materialien bezeichnet man Stoffe und Werkstoffe, die sich aufgrund ihrer Eigenschaften besonders gut für den Einsatz in optischen Komponenten und Systemen eignen. Insbesondere zeichnen sie sich durch ihre spezielle Wechselwirkung mit optischer Strahlung aus. So tritt z.B. bei bestimmten Frequenzen eine induzierte Magnetisierung oder Polarisation im Material auf, oder bestimmte Eigenschaften des Lichts wie Frequenz oder Richtung werden verändert. Beispiele für Optische Materialien sind klassische technische Gläser wie Quarz- oder Borosilikatglas, optische Schichten oder UV-transparente Materialien. Von besonderem Interesse sind auch Materialien für Bauelemente der Integrierten Optik, nichtlinear-optische Materialien oder optische Flüssigkeiten.

Vor dem Hintergrund zunehmender Miniaturisierung gibt es bei den Optischen Materialien einen generellen Trend, entweder vorhandene Materialien oder Schichtsysteme zu optimieren oder gezielt neu maßzuschneidern bzw. herzustellen. Die Anforderungen werden dabei in der Regel durch den Anwendungsbereich vorgegeben. Beispiele hierfür sind die Homogenität von Brechwert und Absorption, die Güte der Oberfläche sowie die Planparallelität zwischen Ein- und Austrittsfläche. Weitere Randbedingungen ergeben sich aus den Präparationsmöglichkeiten, den Forderungen nach mechanischer, chemischer bzw. optischer Stabilität sowie der medizinischen Verträglichkeit oder der Verträglichkeit mit anderen Substanzen, wie z.B. Klebstoffen. Aber auch sekundäre Materialeigenschaften wie Oberflächenrauigkeit, Photo- und Langzeitstabilität sowie elektronische Eigenabsorption werden berücksichtigt.

Das derzeit wohl etablierteste Optische Material ist Glas. Zukünftig zeichnet sich jedoch ab, dass es immer häufiger durch kostengünstig abformbare transparente Polymere bei der Herstellung sowohl von Präzisionsoptiken als auch von optischen Komponenten für den Konsumbereich ersetzt wird. Dabei ist PMMA (Polymethylmethacrylat) der gegenwärtig am häufigsten eingesetzte Kunststoff. Optiken aus thermoplastischem Kunststoff bieten im Vergleich zu Glas neben ihren mechanischen Vorteilen wie erhöhte Bruchzähigkeit und niedrigem Gewicht die Möglichkeit zur präzisen Fertigung großer Stückzahlen bei gleichzeitiger Integration mechanischer Funktionselemente. Polymere sind aufgrund ihrer guten Mikrostrukturierbarkeit besonders attraktiv für elektrooptische Modulatoren. Ebenso werden verstärkt organische Leuchtdioden (OLEDs) und Laserstrukturen auf Polymerbasis entwickelt.

Im Bereich der optischen Beschichtungen ist ein zunehmender Einsatz von nanobasierten Materialien zu verzeichnen. Zur Entspiegelung lässt sich z.B. auf Kunststoffgläsern mittels Sol-Gel-Verfahren eine nanoporöse Siliziumdioxid-Schicht aufbringen, die zusätzlich die Kratzfestigkeit erhöht. Schaltbar transparente (elektrochrome) Beschichtungen z.B. bei abblendbaren Spiegeln können durch Abscheidung von nanokristallinem Wolframtrioxid realisiert werden. Ebenso ist es möglich, ungiftige lumineszente Nanopartikel mit magnetischen Eigenschaften und hydrophiler Oberfläche herzustellen, die in der medizinischen Diagnostik oder bei verschiedenen biologischen und pharmazeutischen Analysen als optische Marker eingesetzt werden können.

Bei den Materialien, die speziell für den UV- und mittleren IR-Bereich transparent sind, nimmt das so genannte Saphirglas eine besondere Position ein. Es ist eines der härtesten Materialien und zeichnet sich vor allem durch seine hohe mechanische Festigkeit und thermische Unempfindlichkeit gegen Verschleiß und Abrieb aus. Es wird daher bevorzugt für die Herstellung von Schaugläsern, Linsen, Prismen und Scannerfenstern eingesetzt.

Eine weitere interessante Gruppe Optischer Materialien basiert auf der Nutzung von nichtlinearen optischen Effekten. Hier kommt den so genannten photorefraktiven Kristallen eine besondere Bedeutung zu. Diese zeigen eine lokale Abhängigkeit des Brechungsindex je nach eingestrahlter Intensität und Wellenlänge, so dass ihr Einsatz vor allem als holographische Massenspeicher von großem Interesse ist. Interessante Materialien in diesem Bereich sind Lithiumtantalat und Lithiumniobat, die auch als Substrate für Wellenleiter in Frage kommen, sowie neue Halbleiterstrukturen wie Galliumnitrid-Schichten oder amorphes Silizium.

Die optischen Eigenschaften von Flüssigkeiten eröffnen ebenfalls interessante Anwendungsoptionen. So lassen sich z.B. durchsichtige nicht mischbare Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Brechungsindizes und elektrischen Leitfähigkeiten derart zusammenbringen, dass sie mit Hilfe eines von außen angelegten elektrischen Feldes eine flüssige Linse bilden. Die Abmessungen eines solchen Systems liegen zur Zeit im Millimeterbereich, so dass ein Einsatz in Digitalkameras, Kamerahandys oder Endoskopiewerkzeugen denkbar erscheint. Weit verbreitet sind auch Flüssigkristalle, eine Zustandsform, die zwischen ungeordneter Flüssigkeit und geordnetem Kristall liegt. Ihre optischen Eigenschaften lassen sich z.B. durch Temperaturänderung oder Anlegen einer äußeren Spannung steuern. Sie finden unter anderem Anwendung in der Displaytechnik (LCD-Displays), in Gläsern mit elektronisch gesteuerter Lichtdurchlässigkeit oder in variablen Farbfiltern.

Eine neue Klasse von optischen Materialien, mit denen Licht gezielt beeinflusst werden kann, bilden die so genannten Photonischen Kristalle. Hierbei handelt es sich um periodische Strukturen, in denen sich das Licht in bestimmten Richtungen nicht ausbreiten kann. Diese wellenlängenabhängigen „verbotenen" Bereiche ähneln den Bandlücken für Elektronen in Halbleiterkristallen. Beispiele für photonische Kristalle sind 3D-periodisch strukturierte Polymere oder 2D-Strukturen aus Silizium bzw. Galliumarsenid. Durch Einbringung von lokalen Defekten in diese periodischen Strukturen kann man erreichen, dass das Licht an diesen Defekten lokalisiert bleibt oder entlang bestimmter Pfade geführt wird. Photonische Kristalle lassen sich daher besonders gut als Wellenleiter einsetzen, wobei das Licht ohne größere Verluste auch „um die Ecke" geleitet werden kann. Sie sind darüber hinaus als rein optische Schalter oder in Laserdioden verwendbar, jedoch lässt sich die gesamte Breite des potentiellen Anwendungsspektrums noch nicht absehen. Sie gelten aber bereits heute als aussichtsreiche Kandidaten für eine Reihe von Komponenten von zukünftigen rein optischen Computern.

August 2004 Claudia Notthoff

Adaptive Optik

Die adaptive Optik stellt eine moderne Entwicklungsrichtung der technischen Optik dar. Ziel ist die selbstständige Korrektur des Strahlengangs eines abbildenden optischen Systems durch geeignete Kombination von optischen und elektronischen Elementen. Ihre Hauptanwendungen findet man derzeit insbesondere in der terrestrischen Astronomie bzw. in der optischen Kommunikation. Zukünftig ist auch verstärkt mit dem Einsatz adaptiver optischer Systeme in der Lasertechnik, der Biologie, der Medizin sowie in der Beleuchtungstechnik zu rechnen. Dabei wird die Entwicklungsdynamik wesentlich durch die Fortschritte in den Bereichen Mikrosystem- und Computertechnik bestimmt.

Adaptive optische Systeme sind aus drei Komponenten aufgebaut. Zunächst misst ein Wellenfrontsensor die Abweichungen vom ungestörten Strahlengang der von einer Lichtquelle ausgehenden Wellenfronten. So trifft z.B. bei dem am häufigsten eingesetzten Verfahren (Shack-Hartmann-Prinzip) die zu messende Wellenfront auf ein Array von Mikrolinsen gleicher Brennweite, wobei die Lichtverteilung in der Brennebene von einer CCD-Kamera aufgenommen wird. Anschließend ermittelt ein so genannter Rekonstruktionsrechner aus der Abweichung der gemessenen Lichtfleckenschwerpunkte von der Solllage die erforderlichen Werte zur Korrektur des Strahlenganges. Die eigentliche Strahlbeeinflussung erfolgt über aktive Elemente. Hierfür werden in der Regel Spiegel (für Reflexion) oder Flüssigkristallmodulatoren (für Transmission) eingesetzt. Die Spiegel können aus dünnen, hochflexiblen Membranen (z.B. aus Silizium oder Quarz) bestehen, die durch elektrostatische Kräfte bzw. darunter angebrachte Piezoelemente verformt werden. Auch einzelne durch Piezoelemente formbare Spiegelsegmente kommen in Betracht. Flüssigkristalle werden zur Modulation von Laserlicht eingesetzt, wobei ihre Lichtdurchlässigkeit elektronisch gesteuert wird. Ebenso werden auch nichtlineare optische Effekte zur Kompensation von Störeinflüssen bei Lasern ausgenutzt.

Die älteste Anwendung der adaptiven Optik findet sich in der terrestrischen Astronomie, wo aufgrund der durch die Erdatmosphäre hervorgerufenen Turbulenzen Bildunschärfen auftreten. So wird z.B. eine punktförmige Lichtquelle in viele kleine Bilder aufgespalten. Diese so genannten Speckles bewegen sich einzeln und als Gesamtheit. Die Schwankungen liegen dabei typischerweise im Frequenzbereich um 1000 Hz. Die Korrektur erfolgt in zwei Schritten. Ein Kippspiegel gleicht die Wanderbewegung des gesamten Flecks aus, und ein deformierbarer Spiegel korrigiert die Form der auf den Detektor treffenden Wellenfront. Beide Spiegel benötigen einen Sensor, der die Sternabbildung eines hellen Referenzsterns analysiert und die Messdaten an den Rekonstruktionsrechner weiterleitet. Ist in der Nähe des zu beobachtenden Objektes kein geeigneter Stern vorhanden, so lässt sich über einen starken Laserstrahl eine Resonanzstreuung an Natriumatomen in ca. 100 km Höhe und damit ein künstlicher Referenzstern erzeugen, auf den fokussiert werden kann. Auch bei der drahtlosen optischen Kommunikation zwischen Weltraumobjekten und Bodenstationen werden adaptive Optiken zusammen mit nichtlinearen optischen Elementen verwendet, um das Signal-zu-Rausch-Verhältnis deutlich zu verbessern.

In der industriellen Fertigung setzt man adaptive optische Spiegel ein, um Intensitäts- oder Strahlverluste durch Verzerrung oder Streuung zu vermeiden. Anwendungen sind

z.B. das Laserschweißen oder -schneiden. Ein Beispiel aus der Wehrtechnik ist der Airborne Laser zur Raketenabwehr, der an Bord eines geeigneten Flugzeug betrieben werden soll. Ebenso kommen adaptive Strahlführungen bei einer Vielzahl von Präzisionslaser-Anwendungen zum Einsatz. So nutzt man in der Lithographie adaptive Mikrospiegel, um beispielsweise bei der Chipherstellung hochgenaue Strukturen erzeugen zu können. Darüber hinaus gewinnen in vielen optischen Systemen beugende Elemente als Ersatz oder Ergänzung zu klassischen brechenden Bauelementen wie Linsen oder Prismen zunehmend an Bedeutung.

Eine spezielle Anwendung der adaptiven Optik bilden computergenerierte Hologramme bei der so genannten optischen Pinzette bzw. optischen Falle. Dieses wichtige Werkzeug der Mikrobiologie ermöglicht das Berühren und Verschieben kleinster Strukturen, wie z.B. das Sortieren von Zellen im Gewebe, ohne mechanischen Kontakt durch Ausnutzen des Impulsübertrags vom Licht auf das zu manipulierende Teilchen. Mittels adaptiv gesteuerter Hologramme wird es möglich, mehrere Teilchen gleichzeitig zu fangen oder zu bewegen.

Auch in der Medizintechnik zeichnen sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten der adaptiven Optik ab. Auf Basis der Wellenfront-Messtechnik wurde z.B. ein augenoptisches Messinstrument (Aberrometer) entwickelt, mit dem sich so genannte Sehschärfen-Landkarten des Auges erstellen lassen. Dazu werden parallele Lichtstrahlen über einen Multifacetten-Mikrochip-Spiegel ins Auge geleitet und die von der Netzhaut reflektierten Strahlen detektiert. Dieses Oberflächenmuster wird anschließend beim chirurgischen Eingriff verwendet, um die Intensität des eingesetzten Lasers zu steuern. In Kombination mit endoskopischen Verfahren lässt sich diese neue minimal-invasive Operationstechnik auch als intelligentes Laserskalpell für weitere chirurgische Eingriffe einsetzen. Durch so genannte adaptive Aberrationskorrekturen können visuelle Störungen beim endoskopischen Eindringen in Gewebe ausgeglichen und die Tiefenschärfe erweitert werden. Erste vorklinische Studien hierzu werden bereits in der Neurochirurgie, Orthopädie und Zahnheilkunde durchgeführt.

Adaptive optische Systeme werden in Zukunft auch verstärkt Einzug in die Beleuchtungstechnik halten. So hat die Automobilindustrie bereits intelligente Frontscheinwerfer realisiert, welche die Lichtverteilung automatisch an die jeweilige Fahrsituation anpassen. Weiterhin ist geplant, so genannte Pixellight-Scheinwerfer zu verwenden, bei denen der starre Reflektorspiegel durch einen Chip ersetzt ist, auf dem sich mehrere hunderttausend individuell ansteuerbare Mikrospiegel befinden.

Insgesamt gesehen handelt es sich bei der adaptiven Optik um ein Teilgebiet der Optik mit großem Zukunftspotenzial. Insbesondere die weitere Miniaturisierung von optischen und elektronischen Komponenten lässt viele neue Anwendungsoptionen erwarten.

September 2003 Claudia Notthoff

Nichtlineare Optik

Das als Optik bezeichnete Teilgebiet der Physik befasst sich mit Entstehung und Ausbreitung sowie den Eigenschaften von Licht, d.h. von elektromagnetischer Strahlung im Spektralbereich von Infrarot bis Ultraviolett. Optische Phänome und Vorgänge werden seit langem in vielen Anwendungsfeldern (z.B. Informations-, Automatisierungs-, Mess- und Gerätetechnik) technisch genutzt. Sie basieren in der Regel auf den Gesetzmäßigkeiten der klassischen Optik (Wellenoptik, Strahlenoptik), die Phänomene wie Beugung, Brechung oder Spiegelung beschreibt und von linearen Beziehungen zwischen den charakteristischen Größen (z.B. Dielektrische Polarisation, Feldstärke) ausgeht.

Über die klassische Optik hinaus gewinnt in letzter Zeit das Gebiet der so genannten Nichtlinearen Optik (NLO) zunehmend an Bedeutung. Es umfasst alle Phänomene, die bei der Wechselwirkung von Licht hoher Intensität (z.B. Laserlicht) mit Materie auftreten und nichtlinear von der elektrischen Feldstärke des Lichts abhängen. Wichtige Beispiele hierfür sind Frequenzvervielfachungen, nichtlineare Frequenzmischungen sowie der elektrooptische Effekt. Aus technologischer Sicht ist ihre Erforschung sowie die gezielte Herstellung von Materialien mit ausgeprägt nichtlinear optischen Eigenschaften von großem Interesse, da sie unter anderem in der Lasertechnologie, im Bereich der optischen Signalübertragung und -verarbeitung sowie der Speichertechnologie eine breite Anwendung finden.

Grundlage der Erklärung nichtlinear optischer Effekte bildet die auf der Wellenoptik basierende Theorie zur Ausbreitung von Licht in dielektrischen Medien. In diesen werden beim Durchgang einer Lichtwelle die Ladungsträger (Elektronen, Ionen, Atomkerne) in Schwingungen versetzt. Bei sehr hohen Intensitäten sind diese Schwingungen nichtlinear und es entsteht ein elektromagnetisches Feld, das neben der Frequenz des eingestrahlten Lichtes zusätzlich eine Reihe von Oberschwingungen enthält. Hierbei entspricht die erste Oberschwingung der doppelten Frequenz des eingestrahlten Lichtes, die zweite Oberschwingung der dreifachen Frequenz usw.. Durch geeignete Wahl der Kristallgeometrie und –orientierung sowie der Betriebstemperatur kann die gewünschte Frequenzvervielfachung für die jeweilige Grundfrequenz erzielt werden. Ebenso lassen sich zwei oder mehr eingestrahlte elektromagnetische Wellen unterschiedlicher Frequenz zu einer Oberwelle anderer Frequenz zusammensetzen, was als sogenannte Frequenzmischung bezeichnet wird.

Die Frequenzverdopplung ist eine empfindliche Methode, um elektronische Eigenschaften und Struktureigenschaften von Festkörperoberflächen oder Grenzflächen zu untersuchen. Darüber hinaus wird sie zusammen mit der Frequenzmischung in Lasersystemen verwendet, um beispielsweise rotes (630 nm), grünes (540 nm) und blaues (450 nm) Licht aus Infrarot-Emissionen handelsüblicher Laser, wie z.B. dem Nd:YVO_4-Laser, zu erzeugen. Dieser Laser wird z.B. in der Display- und Phototechnik zur digitalen Informationswiedergabe eingesetzt. Die Bilddarstellung erfolgt dabei zeilenweise durch additive Mischung der drei Grundfarben.

Große Frequenzen, d.h. kurze Wellenlängen, sind außerdem auch für die kompakte optische Datenspeicherung von besonderer Bedeutung. Durch Verkleinerung der verwendeten Lichtwellenlängen lassen sich die Speicherkapazitäten erhöhen, ohne das Speichermedium zu verändern. So werden die DVDs (Digital Versatile Disks) der nächsten Generation durch Verwendung des neuentwickelten blauen Halbleiterdiodenlasers über eine Kapazität von bis zu 20 Gigabyte verfügen, im Vergleich zu bisher 4,7 Gigabyte bei etwa 640 nm.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit der NLO besteht im Bereich der Signalverarbeitung. Aufgrund des stark wachsenden Datenverkehrs erfolgt die Informationsübertragung zunehmend über Glasfasern. Für die Verarbeitung der optischen Signale eignen sich besonders Materialien, die nichtlinear optische Eigenschaften 2. Ordnung haben, da deren Brechungsindex durch ein von außen angelegtes Feld geändert werden kann (elektrooptischer Effekt). Dabei werden sowohl die Phase als auch die Amplitude des Lichtes über eine Amplitudenmodulation des äußeren Feldes gesteuert. Da diese Modulation mit bis zu 1 GHz erfolgen kann, werden elektrooptische Materialien auch für die Herstellung schneller optischer Schalter zum Steuern von Licht durch Licht verwendet. Die derzeit aussichtsreichsten Konzepte nutzen die so genannte Kreuzphasenmodulation, d.h. die Beeinflussung von Licht einer Wellenlänge oder Polarisation durch das Licht einer anderen Wellenlänge oder Polarisation als Funktion des nichtlinearen Brechungsindexes, in optischen Halbleiterverstärkern innerhalb Interferometer-Anordnungen. Auf diese Weise lassen sich Datenraten in einer Größenordnung von mehreren 100 Gigabit pro Sekunde verarbeiten, was die Leistungsfähigkeit elektronischer Schalter deutlich übersteigt. Ultraschnelle optische Schalter und Abtaster werden beispielsweise als Zeit-Demultiplexer oder zur Qualitätsüberwachung von hochratigen optischen Übertragungssystemen eingesetzt. Ihre Vorteile liegen in einer großen optischen Bandbreite sowie einem geringen Rauschen.

Für kommerzielle nichtlinear optische Anwendungen werden heute hauptsächlich noch Kristalle anorganischer Verbindungen, wie z.B. Lithiumniobat, verwendet, obwohl organische Farbstoffe teilweise erheblich bessere Eigenschaften besitzen. Allerdings lassen sich die Techniken zur Fabrikation anorganischer Kristalle nicht ohne größere Schwierigkeiten auf die Herstellung organischer nichtlinear optischer Materialien übertragen, so dass Verfahren entwickelt werden, um die für die Farbigkeit einer Verbindung verantwortlichen Atomgruppen (Chromophore) in Polymere zu integrieren. Gegenwärtig finden viele organische Farbstoffe aufgrund ihrer hohen optischen Nichtlinearitäten und ihrer optimierbaren mechanischen, thermischen und photochemischen Stabilität Anwendungen als Komponenten für optische und optoelektronische Bauteile. Aufgrund vielfältiger Forschungsaktivitäten in diesem Bereich ist zu erwarten, dass der Einfluss nichtlinear optischer Verfahren und Komponenten in der Zukunft stark zunehmen wird, wobei sich viele Anwendungsmöglichkeiten heute erst schematisch abzeichnen.

Mai 2002 Claudia Notthoff

Holographie

Als Holographie (griech.: holos = das Ganze, graphein = schreiben) wird das Verfahren bezeichnet, das Bild eines Gegenstandes in seiner dreidimensionalen Struktur auf einem zweidimensionalen Träger aufzuzeichnen (Hologramm) und räumlich wiederzugeben. Voraussetzung hierfür ist die Verwendung von kohärentem Licht, d.h. von Lichtwellen gleicher Frequenz, die eine konstante Phasenbeziehung besitzen. Obwohl das grundsätzliche physikalische Prinzip der Holographie schon seit über fünfzig Jahren bekannt ist, wird ihr großes Anwendungspotenzial erst in letzter Zeit durch eine Reihe neuer Entwicklungen insbesondere im Bereich der Laser- und Computertechnologie erschlossen.

Zur Aufnahme eines Hologramms wird z.B. Laserlicht in einem Strahlteiler in zwei Teilstrahlen zerlegt, von denen einer das Objekt beleuchtet. Die vom Objekt reflektierten Wellen interferieren (überlagern) mit dem zweiten Teilstrahl des Lasers, dem Referenzstrahl, und bilden auf dem optischen Speichermedium ein Interferenzmuster, das neben der Intensitätsverteilung (entsprechend der klassischen Photographie) auch die Phaseninformation enthält. Zur Wiedergabe wird das Hologramm mit der Referenzwelle beleuchtet. Für das Auge entsteht dadurch ein virtuelles, dreidimensionales Bild des Objektes an seiner ursprünglichen Position.

Um Hologramme auch unter weißem Licht (z.B. Sonnenlicht, Halogenspots) betrachten zu können, ist ein weiterer holographischer Belichtungsschritt zur Erstellung von so genannten Weißlichtkopien notwendig, die das zur Rekonstruktion benötigte farbige Licht aus dem weißen Licht herausfiltern. Als Beispiele hierfür sind Sicherheitshologramme auf Geldscheinen oder Scheck- und Kreditkarten zu nennen. Sie bieten einen wirksamen und kostengünstigen Schutz gegen Fälschungen und Manipulationen, da sie aufgrund ihres komplizierten optischen und technischen Aufbaus sehr schwer zu kopieren sind. Das Interferenzmuster wird hierbei als Oberflächenrelief auf eine spezielle Prägefolie übertragen. Die Rekonstruktion des gespeicherten Objektes erfolgt durch Lichtbeugung, verbunden mit einer spektralen Zerlegung des auftreffenden Lichtes.

Eine herausragende technische Anwendung der Holographie stellt die Datenspeicherung dar. Mögliche Datenträger werden hierzu mit einem photoadressierbaren Polymer (PAP) bis zu zwei Millimeter dick beschichtet. Das durch Daten- und Referenzstrahl erzeugte Interferenzmuster verursacht in der PAP-Schicht eine Ausrichtung der Polymer-Seitenketten und damit das Speichern der Datenseite. Auf der Fläche einer CD könnten auf diese Weise rund 1000 Gigabyte gespeichert werden, was etwa 1500 herkömmlich beschriebenen CDs entspricht. Ein großer Vorteil dieser Methode besteht zudem darin, dass durch ein Verkratzen der Oberfläche eines „PAP-Holo-Speichers“ keinerlei Information verloren geht, weil diese in der gesamten Schichttiefe gespeichert ist. Unter Verwendung photorefraktiver, ferroelektrischer Kristalle werden derzeit holographische Massenspeicher in der Größe eines Zuckerwürfels entwickelt, die eine Datenübertragungsrate von mehr als 100 Megabyte/s, eine Datenkapazität von mindestens 1000 Gigabyte und eine Datensicherheit von mehr als 100 Jahren aufweisen. Die Hologramme der Daten werden dabei in verschiedenen Schichten gespeichert, wobei in jeder Schicht durch Variation des

Schreibwinkels einige tausend Hologramme gespeichert werden können. Eine reine Ausleseeinheit wurde bereits als Prototyp vorgestellt.

Mit Hilfe der so genannten Holographischen Interferometrie lassen sich kleinste statische und dynamische Deformationen von beliebigen Objekten zerstörungsfrei erfassen. Dazu wird das Objekt mit einem Referenzhologramm, das am Originalzustand des Objektes oder an einem Prototyp eines Werkstücks aufgenommen wurde, verglichen. Ist das Objekt gegenüber dem Referenzzustand verändert, z.B. verdreht, verschoben oder verformt, so wird auf dem Objekt ein Interferenzmuster sichtbar, das den Abweichungen zwischen Hologramm und Objekt entspricht. Anwendungen dieses Prinzips sind z.B. in der industriellen Qualitätskontrolle zur Erkennung von Formfehlern oder verborgenen Strukturdefekten, die mikroskopisch nicht nachweisbar sind, von großer Bedeutung.

In der so genannten Synthetischen Holographie werden die Hologrammstrukturen nicht durch einen optischen Aufzeichnungsprozess erzeugt, sondern das Interferenzbild computergestützt berechnet und in codierter Form auf das Aufzeichnungsmedium übertragen. Das rekonstruierte Bild zeichnet sich dadurch aus, dass es weitgehend frei von Verzerrungen und optischen Störungen ist. Auf diese Weise können komplexe optische Bauteile hergestellt werden. Die strahlablenkende Wirkung solcher HOEs (Holographic Optical Element) beruht auf den diffraktiven Eigenschaften ihrer Gitterstruktur. Bisher werden vor allem die spektralen Eigenschaften holographischer Gitter in Kompaktspektrometern und Monochromatoren genutzt. Mit HOEs lassen sich Wellenfronten in nahezu beliebiger Weise beeinflussen. Sie werden als Strahlteiler, Scanner, Spiegel, Linsen, optische Filter oder zur Korrektur von Abbildungsfehlern eingesetzt.

Aufgrund ihres dreidimensionalen mikroskopischen Auflösungsvermögens gibt es eine Reihe weiterer interessanter Anwendungsmöglichkeiten für holographische Verfahren. So können entfernt aufbewahrte oder nicht transportierbare archäologische Fundstücke, wie z.B. Fragmente von Keilinschriften verschiedener Museen, optisch zusammengeführt und im Labor nachträglich analysiert werden. Ebenso wird die medizinische Anwendbarkeit der so genannten Holographischen Diagnostik immer größere Bedeutung gewinnen. Ein Beispiel hierfür ist die Endoholographische Biopsie, die eine Untersuchung von Zellstrukturen ermöglicht, ohne Gewebeproben entnehmen zu müssen.

Juli 2001 Claudia Notthoff

Displaytechnologien

Die Displaytechnik ist ein wesentliches Schlüsselelement bei der Bedienung von Informationssystemen und Maschinenanlagen. Kaum ein Endgerät der militärischen und zivilen Informations- und Kommunikationstechnik kommt derzeit ohne Display aus. Die Darstellung elektronisch generierter Information auf Bildschirmen umfaßt dabei ein weites Spektrum, das von einfachen Instrumentenanzeigen bis zum hochauflösenden Graphikmonitor, vom Videobild bis zur Großbildprojektion reicht.

Hinsichtlich der darstellbaren Bildpunkte (Pixel) deckt derzeit immer noch die Kathodenstrahlröhre einen weiten Bereich ab, der sich vom Computermonitor über die Fernseh-Bilddarstellung bis zum neuen HDTV-Bildschirm erstreckt (HDTV = High Definition TV). Das untere Ende dieser Skala wird jedoch von eingeführten Flüssigkristall-Displays (LCDs) beherrscht. Bei Großbildschirmen mit hoher Auflösung zeichnet sich dagegen eine Ablösung der derzeitigen Bildröhren-Projektionssysteme durch die sog. Lichtventil-Projektion ab. Projektoren auf der Basis von Flüssigkristallzellen sind bereits auf dem Markt. Neuere Projektionstechnologien arbeiten mit integrierten mikromechanischen Spiegeln oder mit modulierten Laserstrahlen.

Kathodenstrahlröhren sind im Umfeld der allgemeinen Miniaturisierung aller Rechnerkomponenten häufig der sperrigste und am meisten Energie verbrauchende Teil. Auch die benötigte Hochspannung fällt immer mehr aus dem sonstigen elektrischen Umfeld heraus und wird zunehmend systemfremd. Daher werden vor allem für Rechneranwendungen technologische Alternativen bei aktiven, Licht emittierenden Flachdisplays gesucht.

Marktführer bei den Flachdisplays sind mit großem Abstand die LCDs. Nachdem sie in den letzten Jahren fast ausschließlich in Laptop- und Notebook-Computern und in Industrieanwendungen zu finden waren, wird derzeit zunehmend auch der Heim- und Bürobereich erschlossen. Wegen des schnelleren Bildaufbaus und der größeren Kontraste werden LCD-Flachdisplays überwiegend als Aktiv-Matrix in TFT (Thin Film Transistor)-Technologie produziert, bei der jeder Bildpunkt direkt über Dünnschicht-Transistoren angesteuert wird. Ihre Bildqualität konnte weiter verbessert werden und steht der Röhre jetzt kaum noch nach. Durch verbesserte Fertigungstechniken konnten die Ausschußquoten von früher 70-90 % auf heute 30-40 % gesenkt werden. Dies ermöglicht die wirtschaftliche Herstellung auch größerer Displays, die als Monitore für PCs und Workstations einsetzbar sind. Alternativen zu der aufwendigen TFT-Technologie sind Ansteuermatrizen in MIM (Metall-Isolator-Metall)- oder TFD (Thin Film Diode)-Technologie. In beiden Fällen werden pro Pixel nur zwei statt drei Anschlüsse benötigt. Daher können Displays mit einer erheblich einfacheren Schaltungsstruktur realisiert werden. Im Vergleich zu Röhrengeräten sind LCD-Displays jedoch noch immer erheblich teurer.

Weitere aussichtsreiche Technologien für aktive Displays sind die bereits länger bekannte Plasmaentladung und die erst neu etablierte Mikrospitzen-Fluoreszenz. Plasmadisplays erzeugen ihr Licht durch Gasentladungen und arbeiten im Gegensatz zu Bildröhren auch unter sehr hohen magnetischen Störfeldern einwandfrei, was dieser Technologie einen

Nischenmarkt etwa in der medizinischen Diagnostik oder in Energieversorgungsunternehmen sichert. Bei den Mikrospitzen-Displays, auch Feldemissions-Displays (FED) genannt, wird die Elektronenemission aus mikroskopisch feinen, mikrosystemtechnisch herstellbaren Spitzen ausgenutzt. Jeder Bildpunkt besteht aus einem separaten, mikroskopisch kleinen Röhrensystem mit eigener Kathode und eigenem Gitter, während die Anode allen diesen Systemen gemeinsam ist. FEDs wird die Chance eingeräumt, sich zu einer Konkurrenz der LCDs entwickeln zu können. Sie haben im Vergleich zu LCDs minimale Lichtverluste, einen weitaus größeren Arbeitstemperaturbereich, kürzere Ansprechzeiten und einen größeren Sichtwinkel. Die ersten FEDs werden bereits in Serie gefertigt.

Als aussichtsreichster Kandidat für großflächige Aktivdisplays gilt die Dünnschicht-Elektrolumineszenz (EL). Im Vergleich zu LCDs ist die Fertigung einfacher, da alle Materialien fest sind und in gängiger Dünnschichttechnik aufgebracht werden können. An der Leuchtstoffschicht muß allerdings eine im Vergleich zu LCDs relativ hohe Betriebsspannung (ca. 200 V) angelegt werden. EL-Displays sind vor allem für Nischenanwendungen interessant, wo z.B. ein breiterer Betrachtungswinkel oder ein weiterer Temperaturbereich gefordert wird und bei denen sie anderen preiswerteren Displaytechnologien technisch überlegen sind.

Eine interessante Weiterentwicklung zeichnet sich hier durch den in letzter Zeit möglich gewordenen Einsatz von Dünnschicht-Displays auf der Basis organischer Materialien ab. Das Ziel dieser Entwicklung sind große, flexible und billige Bildschirme, die als leichtgewichtige Monitore für Laptop-Computer oder auch als flache, wie Bilder an die Wand zu hängende TV-Bildschirme eingesetzt werden können. Sogar zusammenrollbare und damit universell einsetzbare Displays sollen in dieser Technologie realisierbar sein. Probleme bereitete bisher vor allem die Lebensdauer der Leuchtschicht. Hier zeichnen sich jetzt aber Fortschritte ab, die diesen bisher eher als exotisch eingestuften Displays gute Realisierungschancen eröffnen.

Noch weiter in die Zukunft zielen wehrtechnisch sehr interessante Arbeiten an bistabilen Flüssigkristall-Displays, die nach Abtrennung der Stromversorgung (Batterien) noch den letzten Bildinhalt anzeigen. Wenn diese bisher nur im Labor nachgewiesene Technik mit hoher Auflösung auch auf flexiblen Substraten realisierbar wird, könnten solche LCDs als eine Art elektronisches Papier dienen, auf denen z.B. sehr schnell Karten und Lagedarstellungen vor Ort z.B. über Satellit aktualisiert werden könnten.

Juni 1998 Henner Wessel

Halbleiterlaser

Halbleiterlaser sind komplexe optoelektronische Systeme, welche kohärente Strahlung, d.h. elektromagnetische Wellen mit fester Phasendifferenz, emittieren. Diese auch als Laserdioden oder Diodenlaser bezeichneten Bauelemente sind aufgrund ihrer vielen Vorteile, wie z.B. kleine Größe, relativ niedriger Preis und lange Lebensdauer, mittlerweile die am häufigsten verwendeten Laserstrahlungsquellen.

Der Begriff Laser steht für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", d.h. ein Photon stimuliert in einem optisch aktiven Medium (z.B. Gas, Festkörper, Halbleiter) die Emission von weiteren phasengleichen Photonen. Das optische Anschwingen innerhalb eines Halbleiters ist das Ergebnis einer Ladungsträgerinjektion in eine zentrale aktive Zone und der nachfolgenden Rekombination der Ladungsträger unter Aussenden von Photonen, deren Wellenlänge dem Bandabstand entspricht. Dies wird durch Anlegen einer Spannung an die p- und n-dotierten Schichten in Durchflußrichtung ausgelöst. Zunächst kommt es zur spontanen Emission inkohärenten Lichts, wie bei einer Lumineszensdiode (LED). Der Wechsel zur stimulierten Emission findet dann statt, wenn die „Lichtverstärkung" die Absorptions- und Strahlungsverluste übersteigt. Der dazu nötige Strom ist der Schwellstrom, ab welchem das Laserverhalten einsetzt und die Ausgangsleistung rapide ansteigt.

Um den Wechsel zum Laserbetrieb zu erreichen, müssen die spontan emittierten Photonen in einem optischen Resonator eingeschlossen werden. Die Reflexion an dessen Endflächen erzeugt eine Rückkoppelung (Ausbildung einer stehenden Welle), so daß die erzeugten Photonen mehrfach im Resonator entlang laufen und die Emission von weiteren stimulieren können. Bei Halbleiterlasern wird der Resonator durch Einbetten des aktiven Mediums in Materialien mit niedrigerem Brechungsindex gebildet. Die traditionellen Laserdioden haben einen horizontalen Resonator, in dem die Laseremission in der aktiven Zone senkrecht zu den p-n-Übergängen geführt wird.

Höchste Effektivitäten lassen sich mit den sog. Multiple-Quantum-Well-Strukturen gewinnen. Dabei handelt es sich um wenige Nanometer dicke Schichten, in denen sich die Elektronen und Löcher nur noch in zwei Dimensionen bewegen können. Diese starke Lokalisierung erhöht die Rekombinationwahrscheinlichkeit und reduziert die Verlustleistung. Hohe Ausgangsleistungen werden durch geeignete Anordnungen von mehreren Laserdioden (Arrays) erzeugt. So können linear angeordnete Multistreifen-Laserdioden mit 1 cm Breite bis zu 20 W Dauerleistung (cw) emittieren. Gestapelte Arrays können Leistungen bis in den Kilowattbereich haben. Leider sind die spektralen und geometrischen Strahleigenschaften dieser Laserdiodenarrays relativ schlecht.

Eine Alternative für mittelstarke Laserdioden ist die sog. Masteroszillator-Leistungsverstärker-Struktur (MOPA). Ein Masteroszillator emittiert einen hochqualitativen Single-Mode-Strahl, dessen optische Leistung nachfolgend verstärkt wird. Der Oszillator und der Verstärker sind monolithisch auf dem gleichen Substrat integriert. Die MOPA-Konfiguration behält die Single-Mode-Qualität des Oszillators bei, obwohl sie Ausgangsleistungen von mehr als einem Watt erzeugt.

Ein weiterer wichtiger Halbleiterlaser ist die vertikal- oder oberflächenemittierende Laserdiode (VCSEL). Sie hat einen Resonator, der rechtwinklig zu der aktiven Schicht, d.h. parallel zum p-n-Übergang, steht. Der Resonator besteht aus mehrschichtigen Spiegeln ober- und unterhalb der aktiven Zone, jeder mit wesentlich höherem Reflexionsgrad als bei horizontal emittierenden Laserdioden. VCSELs weisen einen sehr niedrigen Schwellstrom auf und emittieren an der Oberfläche einen runden Laserstrahl mit kleinen Querschnitt. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, aus ihnen Bauteile in monolithisch zweidimensionalen Arrays herzustellen, die unabhängig voneinander optisch modulierbar sind.

Halbleiterlaser bestehen meistens aus III-V-Verbindungshalbleitern, die man epitaktisch auf Substrate mit ähnlicher Gitterkonstante aufwachsen läßt. AlGaAs-Laserdioden auf GaAs-Substrat emittieren im Wellenlängenbereich von 750 nm bis 900 nm. Die Materialkonfiguration InGaAsP auf InP wird hauptsächlich verwendet, um Komponenten für die typischen Telekommunikations-Wellenlängen um 1300 nm und 1550 nm herzustellen, bei denen die Absorptionsverluste in optischen Fasern relativ gering sind. Die neueste Entwicklung sind GaN-Laserdioden, die blaues Licht (440 nm) emittieren. Jedoch haben diese Bauteile noch eine sehr geringe Lebensdauer und einen hohen Preis.

Der Einsatz von Halbleiterlasern ist mittlerweile so weit verbreitet, daß es schwer ist, eine komplette Liste der möglichen Anwendungen zu erstellen. Sowohl in weitreichenden Datenübertragungssystemen (Telefonleitungen, Unterseekabel) als auch für Kurzstreckenanwendungen (Local Area Network, Kabelfernsehen) werden heute faseroptische Systeme mit Laserdioden als Sendebausteinen eingesetzt. Eine wesentliche Rolle spielen Halbleiterlaser auch bei den mit Erbium dotierten Faserverstärkern. In informationstechnischen Komponenten wie Laserdruckern, optischen Plattenspeichern, CD-ROM-Laufwerken, CD-Spielern oder Bildplattenspielern werden Infrarot-Diodenlaser als Lichtquellen zum Schreiben und Lesen der Information benutzt. Meß-, Regel- und Anzeigegeräte wie Präzisionsoberflächen-, Entfernungs-, Geschwindigkeits- oder Partikelmeßsysteme arbeiten mit Laserdioden als Lichtquelle. In der Medizin werden Halbleiterlaser als Skalpell eingesetzt. Eine weitere wichtige Anwendung ist das optische Pumpen von Hochleistungs-Festkörperlasern, die z.B. in der Materialbearbeitung zum Schneiden, Bohren oder Schweißen eingesetzt werden.

April 1998 Stefan Metzger

Photonik

Unter dem Begriff Photonik faßt man alle Technologien zusammen, bei denen Signale auf optischem Wege erzeugt, bearbeitet, übertragen, empfangen und gespeichert werden. Wie die Elektronik von den Elektronen leitet die Photonik ihren Namen von den Photonen („Lichtteilchen") ab. Im Gegensatz zu Elektronen sind Photonen ladungs- und massefrei, so daß sich Lichtstrahlen weitgehend wechselwirkungsfrei kreuzen und in demselben Übertragungsmedium ohne gegenseitige Beeinflussung ausbreiten können. Diese Eigenschaft erweist sich allerdings wiederum dort als Nachteil, wo es auf die gewollte Beeinflussung des Lichtes ankommt, wie z.B. beim Schalten.

Bis vor einigen Jahren hat man geglaubt, daß sich die Photonik relativ schnell als eigenständiges Gebiet parallel und weitgehend losgelöst von der etablierten Elektronik durchsetzen könnte. So wurde insbesondere der optische Universalcomputer als natürlicher Nachfolger der Elektronenrechner angesehen, deren Leistungspotential in der Vergangenheit häufig unterschätzt wurde. Erst in letzter Zeit setzt sich zunehmend die Erkenntnis durch, daß für viele Rechnerkomponenten die Möglichkeiten der Mikroelektronik bei weitem noch nicht ausgereizt sind. Aus diesem Grunde, aber auch wegen der vielen noch ungelösten Probleme der Photonik gilt die Realisierung eines völlig aus photonischen Elementen bestehenden Rechners in absehbarer Zukunft nicht mehr als sehr wahrscheinlich.

Zumindest kurz- und mittelfristig realistischer erscheinen Hybridsysteme mit der bestmöglichen Kombination aus elektronischen und optischen bzw. photonischen Anteilen. So wird z.B. die Datenverarbeitungsrate rein elektronischer Hochleistungsrechner immer stärker durch die Signallaufzeiten auf den Leitungen zwischen den integrierten Schaltkreisen beeinflußt. Darüber hinaus wird die gegenseitige Beeinflussung der Elektronenströme aufgrund der zunehmenden Integrationsdichten und Taktfrequenzen immer größer. Beide Probleme können durch optische Verbindungen überwunden werden.

Unbedingte Voraussetzung für die optimale Kombination von Elektronik und Photonik sind Komponenten, die eine schnelle und verlustfreie Wandlung zwischen diesen beiden Informationsträgerformen ermöglichen. Den entscheidenden Fortschritt hat hier in erster Linie die Entwicklung der aus Halbleitermaterialien wie Galliumarsenid (GaAs) und Indiumphosphid (InP) bestehenden Laser- und Photodioden gebracht. In diesem Zusammenhang zeigt sich die unmittelbare Verknüpfung der Photonik mit der Optoelektronik, die sich mit dem Zusammenspiel und der Wechselwirkung optischer Strahlung mit elektronischen Vorgängen befaßt. Die gegenseitige Abhängigkeit dieser beiden Technologiefelder hat dazu geführt, daß die Optoelektronik in letzter Zeit häufig sogar als ein Teilgebiet der Photonik dargestellt wird.

Die derzeit am weitesten fortgeschrittene photonische Technologie ist die Glasfaser zur optischen Nachrichtenübertragung. Zumindest theoretisch läßt die enorme Bandbreite der neuesten Glasfasergeneration Datenübertragungsraten in der Größenordnung von 50 Tbit/s zu. Ziel von Forschung und Entwicklung ist daher, auf Sender- und Empfängerseite einen möglichst großen Anteil dieser Kapazität nutzbar zu machen. Derzeit werden

Datenraten bis etwa 10 Gbit/s elektronisch beherrscht; Steigerungen bis zu 100 Gbit/s erscheinen langfristig möglich. Ein weiterer Schritt zur vollen Nutzung des enormen Übertragungspotentials von Glasfasern ist die Einführung der optischen Mehrkanaltechnik, bei der die Daten in Kanälen mit unterschiedlichen Wellenlängen übertragen werden. Diese auch Wellenlängenmultiplex genannte Technik ist nur für optische Informationsübertragung möglich.

Zwei weitere innovative Entwicklungen der jüngsten Zeit werden zukünftig entscheidend zur dominierenden Stellung der Glasfaser als Übertragungsmedium insbesondere für die Langstrecken-Kommunikation beitragen. Zum einen ermöglicht der Einsatz von mit Erbium dotierten Fasern eine Signalverstärkung, die aufgrund der unvermeidlichen Signaldämpfung immer erforderlich ist, auf rein optischem Wege. Zum anderen wird durch die Technik der sog. Solitonen die Dispersion, d.h. die Verzerrung der Signale aufgrund von Laufzeiteffekten, verhindert. Daher werden die bisher erforderlichen aufwendigen Maßnahmen zur elektronischen Verstärkung und Regeneration der Lichtsignale überflüssig.

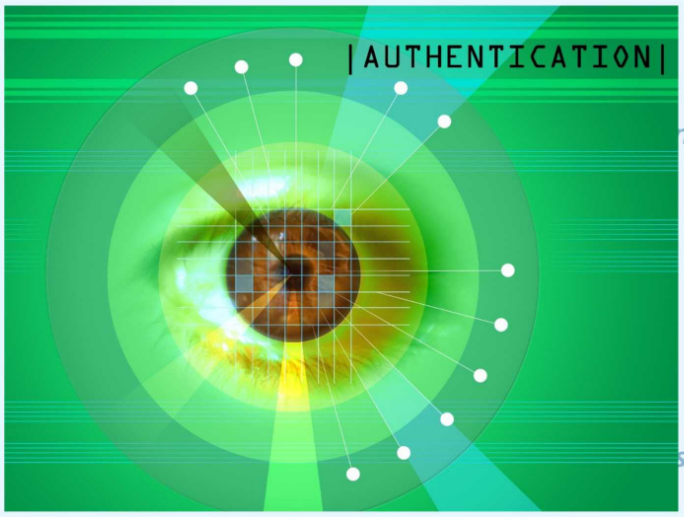
Im Gegensatz zur auf Glasfasern basierenden Übertragungstechnik befindet sich die photonische Schaltungstechnik noch weitgehend am Anfang der praktischen Nutzung. Im Prinzip lassen sich fast alle hierfür in Betracht kommenden Konzepte physikalisch auf Effekte der sog. Nichtlinearen Optik zurückführen. So wird z.B. der optische Brechungsindex von bestimmten Medien durch ein äußeres elektrisches Feld so beeinflußt, daß ein optisches Eingangssignal je nach Polarität des Feldes auf zwei verschiedene Ausgänge geleitet wird. Derartige optoelektronische Schalter sind für den GHz-Bereich als monolithisch integrierte Bausteine auf der Basis von Indiumphosphid bereits realisiert. Dagegen befinden sich rein photonische Schalter, die nach dem Prinzip „Licht steuert Licht" auf nichtlinearen Wechselwirkungseffekten von Lichtsignalen basieren, noch im Forschungsstadium.

Eine interessante Entwicklung der jüngsten Zeit, die langfristig für die Photonik ähnliche Bedeutung erlangen könnte wie heute die Halbleiter für die Elektronik, sind die sog. photonischen Kristalle. Durch geeignete Strukturierungsmaßnahmen im Mikrometerbereich lassen sich die optischen Eigenschaften bestimmter Materialien gezielt so verändern, daß die unterschiedlichsten Manipulationen der Lichtstrahlen möglich werden. Im Prinzip kann man damit der Elektronik vergleichbare Schaltungen aufbauen, wie z.B. photonische Transistoren, Dioden, Filter oder Widerstände.

Aus wehrtechnischer Sicht liegt die große Bedeutung photonischer Bauelemente und Systeme neben der allgemeinen Leistungssteigerung für die Informationsübertragung und -verarbeitung in ihrer geringen Empfindlichkeit gegenüber äußeren elektrischen und magnetischen Störeinflüssen. Auch hierdurch dürften sich zukünftig für die Bereiche Führung und Aufklärung große Auswirkungen ergeben.

November 1997 Thomas Kretschmer

Wissen & Information



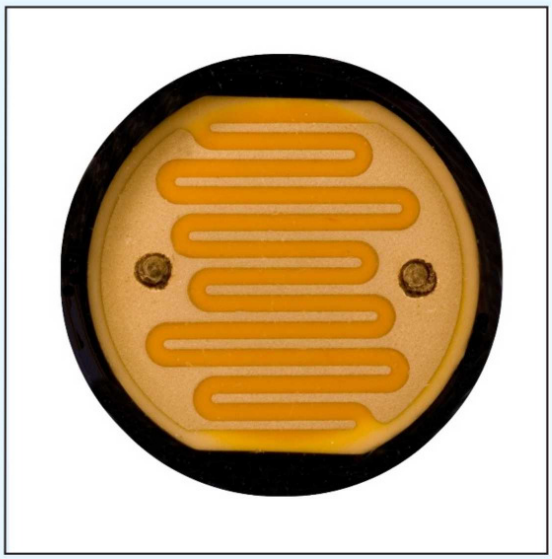
n & Information

sen & Information

Wissen & Information

Wissen & Information

Wissen & Information



Wissen & Information

Sensortechnik

2009

2008

Sprengstoffdetektion

Künstliche Nasen

Digitale Photographie

2007



2006

Biometrie

2005

Terahertz-Strahlen

Smart Dust

2004

2003

2002

Infrarot-Sensoren

2001

Laser-Radar

Chemische Sensoren

2000

Mustererkennung

1999

1998

Faseroptische Sensoren

Biosensoren

1997

1996

Sprengstoffdetektion

Insbesondere aufgrund der in jüngster Zeit zugenommenen Terroranschläge hat die Detektion von Sprengstoffen erheblich an Bedeutung gewonnen. Das Spektrum der nachzuweisenden Sprengstoffe umfasst neben den vielfältigen Produkten für militärische und gewerbliche Zwecke, wie z.B. TNT (Trinitrotoluol) und RDX (Hexogen), auch so genannte Laborate, die aus frei erhältlichen Grundsubstanzen hergestellt werden können.

Zur Detektion von Sprengstoffen existieren grundsätzlich zwei Ansätze. Zum direkten Nachweis nutzt man üblicherweise eine Form von durchdringender Strahlung, mit deren Hilfe das Innere eines Gegenstandes näher untersucht werden kann. Ein zweiter Weg beruht auf dem Nachweis von Spuren, die der Sprengstoff in seiner Umgebung hinterlässt. Diese können in Form von Dämpfen oder Partikeln auftreten. Da Sprengstoffe häufig nur sehr geringe Mengen von Dämpfen an die Umgebung abgeben, sind für deren Nachweis allerdings sehr empfindliche Detektionsverfahren notwendig. Zu den effektivsten Detektoren zählen hier nach wie vor die Nasen von entsprechend ausgebildeten Spürhunden. Partikelspuren können sich z.B. auf der Kleidung von Personen befinden, die zuvor Kontakt mit Sprengstoffen hatten.

Als Detektoren zum direkten Nachweis von Sprengstoffen werden vielfach bildgebende Systeme auf der Basis von Röntgenstrahlung eingesetzt. Aus dem Röntgenbild kann neben dem Erscheinungsbild von Gegenständen auch auf gewisse Merkmale geschlossen werden, die einen Hinweis auf die mögliche Materialart liefern, wie z.B. die Dichte. Eine spezifischere Identifikation erlauben u.a. Verfahren, welche die Atomkerne des jeweiligen Stoffes untersuchen. Dies kann z.B. durch eine Bestrahlung mit Neutronen erfolgen. Aufgrund der dabei stattfindenden Wechselwirkung ergibt sich eine charakteristische Gammastrahlung oder eine Veränderung des Energiespektrums der einfallenden Neutronenstrahlung, die auf einen eventuell vorhandenen Sprengstoff schließen lässt. Das Verfahren der so genannten Kernquadrupolresonanz beruht hingegen darauf, dass ein in fast allen Sprengstoffen enthaltenes Stickstoffisotop ein Kernquadrupolmoment besitzt. Die Wechselwirkung dieser Atomkerne mit geeigneten von außen eingestrahlten elektromagnetischen Wellen erzeugt ein für den jeweiligen Stoff charakteristisches Antwortsignal.

Beim Einsatz von Sprengstoffspuren-Detektoren kann die Probenentnahme bei Dämpfen durch Einsaugen von Umgebungsluft und bei Partikeln durch Abwischen von verdächtigen Oberflächen erfolgen. Als Nachweisprinzip hierfür kommen mehrere Methoden in Betracht. So basiert die häufig angewendete so genannte Ionenmobilitätsspektrometrie auf der unterschiedlichen Beweglichkeit von Ionen verschiedener Art in einem elektrischen Feld. Daher werden in diesem Verfahren die in der Probe enthaltenen Moleküle zunächst ionisiert und anschließend ihre Beweglichkeit in einem Gas unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes bestimmt. Eine noch bessere Unterscheidung von chemischen Substanzen kann z.B. mit Hilfe der Massenspektrometrie erreicht werden. Bei dieser erfolgt ebenfalls zuerst eine Ionisation der zu untersuchenden Probe. Die eigentliche

Analyse beruht auf der Auswertung der Masse/Ladungs-Verhältnisse der entstandenen Ionen.

Besonders leistungsfähige Systeme zur Detektion von Sprengstoffen werden in der zivilen Luftfahrt bei Sicherheitskontrollen von Personen und Gepäckstücken verwendet. Für die Untersuchung von Gepäckstücken werden hier hauptsächlich Röntgengeräte genutzt. Bei der Kontrolle von Personen können Sprengstoffspuren-Detektoren eingesetzt werden. Sie besitzen den Vorteil, dass hier keine für die zu untersuchende Person eventuell gesundheitsgefährdende Strahlung auftritt. Solche Systeme sind beispielsweise als tragbare Lösungen verfügbar. Für einen höheren Personendurchsatz gibt es auch Geräte in Form von begehbaren Portalen. Ein weiteres mögliches Anwendungsgebiet stellen Überprüfungen von Fahrzeugen und Frachtgütern dar, z.B. im Rahmen von Grenzkontrollen. In dieser Hinsicht existieren u.a. ebenfalls entsprechende Systeme auf der Basis von Röntgenstrahlung. Neben diesen Einsätzen im Bereich von Sicherheitskontrollen kann die Sprengstoffdetektion auch noch bei der Suche nach Landminen und beim Aufspüren anderer Überreste von Kampfhandlungen, z.B. von Blindgängern, eingesetzt werden. Moderne Minen enthalten nur noch sehr geringe Mengen von Metall, so dass sie mit den typischerweise verwendeten Metalldetektoren nur schwer zu finden sind. Daher kann eine Suche nach dem in der Mine enthaltenen Sprengstoff hier vorteilhafter sein.

Leistungsfähigere Sprengstoff-Detektionssysteme werden in Zukunft u.a. durch die Kombination von unterschiedlichen Nachweisprinzipien in einem System entstehen. Hierdurch können die Vorteile von unterschiedlichen Verfahren miteinander vereint werden, wodurch sich u.a. der Durchsatz eines Systems erhöhen oder die Anzahl von Fehlalarmen senken lassen. So können z.B. mit einem bildgebenden Röntgenverfahren in einem ersten Schritt Gepäckstücke mit verhältnismäßig hoher Geschwindigkeit überprüft werden. In einem zweiten Schritt lassen sich dann die hierbei aufgespürten verdächtigen Materialien durch ein genaueres aber langsameres Verfahren, z.B. auf Basis der Kernquadrupolresonanz, näher untersuchen.

Weitere Verbesserungen werden sich durch die Nutzung von neuen Nachweismethoden ergeben. Ein derartiger neuer Ansatz ist die Verwendung von elektromagnetischer Strahlung im Terahertzbereich. Auf dieser Grundlage können neben bildgebenden Systemen auch Verfahren zur genaueren Materialuntersuchung verwirklicht werden. Verfahren auf der Basis von Terahertzstrahlung werden derzeit außerdem als ein möglicher Weg untersucht, um Sprengstoffe aus einer größeren Entfernung heraus zu detektieren. Damit lassen sich gegebenenfalls Sprengstoffanschläge, z.B. mit Autobomben, frühzeitig erkennen.

November 2007 Klaus Ruhlig

Digitale Photographie

Die bereits im 19. Jahrhundert entwickelte (heute als analog bezeichnete) klassische Photographie basiert auf der Speicherung der Bildinformation in den lichtempfindlichen Kristallen eines Films. Im Unterschied dazu nutzt man bei den seit etwa 20 Jahren kommerziell erhältlichen Digitalkameras zur Detektion üblicherweise flächige Halbleitersensoren mit mehreren Millionen Bildpunkten (Pixel). Hier werden die Lichtintensitäten vom Sensor zunächst in analoge elektrische Signale umgewandelt, anschließend digitalisiert und durch eine komplexe Bildverarbeitung in Bilder umgesetzt. Im Vergleich zur Analogen Photographie entfällt der Zeitverzug zwischen Aufnahme und Verfügbarkeit des Bildes, was eine sofortige Verbreitung ermöglicht. Durch die Fortschritte bei Sensortechnologien und Bilddatenverarbeitung hat inzwischen die Bildqualität der Digitalen Photographie (bezogen auf das Aufnahmeformat) die der Analogen Photographie erreicht bzw. auch schon übertroffen und zeigt noch weiteres Entwicklungspotenzial.

Im Mittelpunkt des Interesses bei der Sensorentwicklung standen bislang zwei Größen, einerseits die Zahl der Bildpunkte und damit die erreichbare Auflösung sowie andererseits der Dynamikumfang, also die Fähigkeit zur gleichzeitigen Erfassung sehr lichtschwacher und sehr heller Bereiche eines Bildes. Zwar bewegt man sich mit den heute erreichten Pixeldichten an der Grenze der verwendeten Sensortechnologien, aber selbst einfache Digitalkameras mit relativ kleinen Bildsensoren erfüllen die Erfordernisse der meisten Anwender an die Auflösung. Der Trend geht jetzt mehr zur Verbesserung der Qualität der einzelnen Pixel zur Erzielung besserer Farbtreue, natürlicherer Strukturwiedergabe, höheren Kontrastumfangs und gesteigerter Lichtempfindlichkeit.

Da die lichtempfindlichen Elemente der meisten Bildsensoren keine Farben unterscheiden können, sind sie mit einem Farbfilter ausgestattet, der ein schachbrettartiges Muster mit grünen, blauen und roten Feldern in der Größe der einzelnen Sensorpixel aufweist. Auf diesem Weg erhält man die Farbinformation, da jedes Pixel so nur für eine dieser Grundfarben empfindlich ist. Die fehlenden Farbwerte werden durch Interpolation mit gleichfarbigen Pixeln aus der Nachbarschaft erzeugt. Dadurch kann es aber vor allem an Objektkanten zu Farbfehlern kommen. Bei neueren Sensorentwicklungen werden für jeden Bildpunkt alle drei Grundfarben gemessen. Dies kann, wie es bei einem speziellen Bildsensor analog zum Schichtaufbau bei Farbfilmen realisiert wurde, durch drei übereinander liegende Sensorschichten unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit geschehen, wodurch bei gleicher Pixelzahl größere Detailgenauigkeit und Farbtreue erreicht werden. Ein weiteres verfolgtes Prinzip ist das optische Aufspalten des auf jeden Bildpunkt treffenden Lichtes in die drei Grundfarben mit winzigen farbselektiven Spiegeln und die separate Detektion auf nebeneinander liegenden Sensorflächen. Zur Erhöhung des Dynamikbereiches wurden Bildsensoren entwickelt, die für jeden Bildpunkt zwei Sensorelemente unterschiedlicher Empfindlichkeit verwenden, mit denen sowohl dunkle Schattenbereiche als auch hellere Bildbereiche aufgelöst werden können.

Die Verwacklungsgefahr wurde bei der analogen und digitalen Freihandphotographie bislang durch bewegliche optische Elemente im Objektiv vermindert. Inzwischen ist es aber auch möglich geworden, die Bildstabilisierung durch eine Ausgleichsbewegung des

Digitalsensors zu erreichen. Gesteuert von Beschleunigungssensoren wird dieser im Moment der Aufnahme so bewegt, dass das Bild auf dem Sensor selbst still steht.

Neben den die Pixelzahl und Dynamik bestimmenden Sensoren hat die sensornahe Bildverarbeitung erheblichen Einfluss auf die Bildqualität. So haben z.B. die Algorithmen zur Kontrastbewältigung, Erhöhung der Konturenschärfe und Erzielung natürlicher Farben wesentliche Verbesserungen erfahren. Auch Störungen wie das so genannte Bildrauschen, das im Sensor durch die vom Lichteinfall unabhängige spontane Bildung freier Ladungsträger entsteht, werden zunehmend besser unterdrückt.

Der Wechsel von der analogen zur digitalen Aufnahmetechnik beschränkt sich nicht nur auf den Ersatz des Films durch einen Sensor. Inzwischen beginnt man bei hochwertigen Kameras die weitgehenden Möglichkeiten der Digitalen Photographie zur Korrektur technisch bedingter Abbildungsfehler zu nutzen. So können Farbsäume im Bild, die durch die unterschiedlich starke Brechung der verschiedenen Spektralfarben im Objektiv entstehen, beseitigt werden. Auch lassen sich der Lichtabfall zu den Bildrändern und die Verzeichnung der Optik rechnerisch kompensieren. Da diese Abbildungsfehler vom jeweiligen Objektiv sowie von der eingestellten Blende und Entfernung abhängen, setzen diese Techniken entsprechend integrierte Systemkameras voraus.

Nachdem sich die Digitale Photographie in ihrer Anfangsphase vor allem bezüglich des Aufbaus der Kameras an der Analogen Photographie orientiert hat, zeigt sich immer stärker, dass ihre Integration in die Informationstechnologie zu einer Vielzahl neuer Möglichkeiten bei der Aufnahme, Übertragung, Bearbeitung, Darstellung und Verwendung von Bildern führen wird. Neue Möglichkeiten bieten sich insbesondere durch die Entwicklungen in der Displaytechnik. So können z.B. Photoalben durch elektronisches Papier ersetzt werden oder in großen flexiblen Wanddisplays lassen sich Bilder nach Wahl aus einer digitalen Photobibliothek anzeigen. Darüber hinaus werden Bilder immer mehr nicht nur zur Erinnerung oder Dekoration, sondern auch als Kommunikationsmittel genutzt. So wie Mobiltelephone bereits heute mit einfachen Digitalkameras ausgestattet sind, wird in jedes Kommunikationsgerät der Zukunft die Bilderstellung integriert sein. Bilder werden drahtlos in das Internet übertragen werden, wo sie sich wie schon heute archivieren, für andere sichtbar machen und z.B. für den Ausdruck an Dienstleister übertragen lassen.

Oktober 2007 Ulrik Neupert

Künstliche Nasen

Als Künstliche Nasen (häufig auch Elektronische Nasen) bezeichnet man technische Systeme zur Analyse von Gerüchen. Ihr natürliches Vorbild ist der Geruchssinn (olfaktorischer Sinn) von Wirbeltieren, deren Rezeptoren sich zumeist in der Riechschleimhaut im Inneren der Nase befinden. Künstliche Nasen bestehen üblicherweise aus einer Anzahl elektrochemischer Sensoren, die zu einem Sensorfeld angeordnet sind, und einem geeigneten System zur Analyse der erfassten Messsdaten.

Das Grundkonzept Künstlicher Nasen ist dem biologischen Vorbild sehr ähnlich, im Detail bestehen jedoch deutliche Unterschiede. In beiden Fällen werden komplexe vielkomponentige Stoffgemische untersucht. Dabei kommt es weniger darauf an, einzelne Bestandteile der Probenmischung zuverlässig zu identifizieren, als vielmehr durch Verrechnung der Messergebnisse der einzelnen Sensorelemente eine chemische Signatur des analysierten Stoffgemisches zu erhalten. So stehen z.B. im Geruchssinnesorgan des Menschen hierfür 10-30 Millionen Riechzellen zur Verfügung. Diese sind jeweils mit einem von mehreren hundert verschiedenen beim Menschen vorkommenden olfaktorischen Rezeptoren ausgestattet. Mit ihnen können selektiv bestimmte Komponenten gasförmiger Substanzen erkannt werden. Künstliche Nasen hingegen verfügen über nur wenige Sensorelemente, die auf eine große Vielfalt gasförmiger Substanzen ansprechen. Dabei werden chemisch ähnliche Stoffe mit ähnlicher Signalstärke detektiert.

Derzeit ist der biologische Geruchssinn noch weitaus leistungsfähiger als Künstliche Nasen. Die minimale Konzentration eines Stoffs, die ein Lebewesen durch den Geruchssinn gerade noch wahrnehmen kann, der so genannte Geruchsschwellwert, ist teilweise sehr gering. Beim Menschen liegt er je nach Substanz zwischen 10^4 und 10^{14} Molekülen pro mm³ Luft. Bei Hunden allerdings reicht für den Nachweis mancher Substanzen bereits ein Molekül pro mm³ Luft, um eine Geruchsempfindung auszulösen.

Die in Künstlichen Nasen eingesetzten Chemosensoren sind Signalwandler, die eine chemische Wechselwirkung in ein elektrisches Signal umsetzen. Einzelsensoren, die bevorzugt auf bestimmte Substanzen ansprechen, sind in Künstlichen Nasen zu Sensorfeldern (Sensorarrays) zusammengefasst. Dabei müssen die Signale der Einzelsensoren im gewissen Umfang voneinander abweichen. Die Anzahl der Einzelsensoren ist gegenwärtig noch erheblich durch die Auswertbarkeit der Daten begrenzt. Sie liegt bei den gegenwärtig kommerziell erhältlichen Geräten zwischen 6 und 48.

In Künstlichen Nasen werden im Wesentlichen vier unterschiedliche Sensortypen eingesetzt, die sich insbesondere hinsichtlich der chemischen Struktur der gemessenen Gase unterscheiden. So messen Metalloxid-Halbleitersensoren (MOS- und MOS-FET) bevorzugt niedermolekulare reduzierende Gase, wie z.B. Benzin- oder Alkoholdämpfe in der Luft. Von Sensoren auf Basis leitfähiger Polymere werden polare Gruppen (z.B. Carbonyl- oder Aminogruppen) von Gasen gut gemessen. Massensensitive piezoelektrische Sensoren zeichnen sich durch eine vergleichsweise hohe Selektivität und Empfindlichkeit sowie Temperaturstabilität aus. Sie sind zur Messung höhermolekularer Stoffe besonders gut geeignet. In den letzten Jahren wird zunehmend auch die Entwicklung von Künstlichen

Nasen auf optischer Basis verfolgt. Entsprechende Sensoren, bei denen Lichtwellenleiter in Verbindung mit Fluoreszenzfarbstoffen Verwendung finden, stellen ein extrem empfindliches Nachweisverfahren dar, welches prinzipiell sogar die Detektion einzelner Moleküle ermöglicht.

Beim Einsatz entsprechender Sensorarrays ist eine aufwändige Datenverarbeitung der Messergebnisse erforderlich. In der Regel werden sowohl anspruchsvolle statistische Methoden als auch Mustererkennungsverfahren unter Verwendung von Neuronalen Netzen oder Fuzzy-Logik eingesetzt. Beim gegenwärtigen Stand der Technik steht die qualitative Analyse im Vordergrund, um vor allem komplexe Stoffgemische voneinander zu unterscheiden.

Mit relativ primitiven Signalwandlern lassen sich auch bei einer recht geringen Anzahl von einzelnen Sensorelementen beachtliche Erfolge erzielen. So ändern simple Schichten aus leitfähigen Polymeren ihren Widerstand bei Einwirkung von Aromastoffen immerhin so deutlich, dass auf diesem Wege z.B. Biersorten unterschieden werden können. In der Medizin werden Künstliche Nasen bereits erfolgreich zur Diagnose von Lungenkrebs durch Analyse der Atemluft eingesetzt. Ein wichtiger Vorteil von Künstlichen Nasen bei der Analyse von Stoffgemischen in der Gasphase ist die Möglichkeit des Nachweises von für den Menschen geruchslosen Substanzen, wie z.B. Kohlenmonoxid.

Künstliche Nasen sind in den letzten Jahren bei der Geruchsanalyse immer stärker zu einer kostengünstigen Alternative zu menschlichen und tierischen Geruchstestern geworden. Entsprechende Sensorsysteme versprechen anders als tagesformabhängige Testriecher eine Einsetzbarkeit rund um die Uhr. Zudem kann bei ihrer Verwendung weitgehend auf besonders geschultes Fachpersonal verzichtet werden.

Generell gibt es für Künstliche Nasen eine große Bandbreite von Anwendungen. Die meisten Forschungsanstrengungen findet man derzeit in den Bereichen Lebensmittelindustrie, medizinische Diagnostik, Umweltüberwachung, industrielle Prozessüberwachung sowie Wehr- und Sicherheitstechnik. Einen ersten Massenmarkt für Künstliche Nasen bietet die Automobilindustrie. So soll bei PKWs die kontinuierliche Geruchsüberwachung der Außenumgebung eine Lüfterklappensteuerung ermöglichen, welche die Ansaugung von Abgasen, Fäkaliengerüchen o.ä. verhindert. Zunehmend erfolgreich lassen sich Künstliche Nasen zur berührungslosen Detektion von Sprengstoffen aufgrund von Ausdünstungsspuren einsetzen. In den letzten Jahren wird auch verstärkt ihr möglicher Einsatz zur Detektion von Chemischen Waffen verfolgt.

August 2007 Roman Kernchen

Biometrie

Die Biometrie befasst sich grundsätzlich mit der Erfassung quantitativer Merkmale von Lebewesen. In neuerer Zeit versteht man unter diesem Begriff vorwiegend die Vermessung körpereigener Merkmale von Menschen zum Zweck der Personenidentifizierung. Dabei wird ein aktuelles Messergebnis eines Merkmals mit einem zuvor aufgenommenen und gespeicherten Referenzdatensatz (Template) der zu identifizierenden Person verglichen.

Der Vorteil biometrischer Verfahren ist, dass körperliche Merkmale untrennbar mit einer Person verbunden sind und dieser nicht künstlich zugeordnet werden müssen, wie z.B. bei einer PIN-Nummer. Es ist jedoch zu beachten, dass sich körpereigene Merkmale im Laufe des Lebens ändern können und daher der Referenzdatensatz einer Person eventuell aktualisiert werden muss. In Frage kommen einerseits physiologische Merkmale wie Fingerabdruck, Handgeometrie, Gesicht oder Iris. Andererseits können auch verhaltensbezogenen Merkmale wie Stimme, Lippenbewegung und Unterschrift herangezogen werden. Darüber hinaus werden Verfahren entwickelt, die eine Erkennung anhand von Tastaturanschlag, Gestik, Mimik oder Gangrhythmus zum Ziel haben.

Mögliche Anwendungsbereiche biometrischer Verfahren sind die Zutrittskontrolle zu Räumlichkeiten oder die Zugriffskontrolle auf Computersysteme, Mobiltelefone oder auch Schusswaffen. Ebenso können biometrische Verfahren auch zur Unterstützung von Fahndung, Überwachung und Grenzkontrollen eingesetzt werden. So ist im Rahmen der Terrorismusbekämpfung u.a. vorgesehen, alle Pässe von EU-Bürgern mit biometrischen Daten auszustatten. Dabei sollen zunächst Daten des Gesichtsbildes und später zusätzlich eines Fingerabdruckes auf Funketiketten (RFID-Chips) gespeichert und über Funk ausgelesen werden. Beim Einsatz biometrischer Verfahren in sensitiven Bereichen besteht generell die Forderung nach Lebenderkennung, d.h. es muss sichergestellt werden, dass die zu identifizierende Person lebt. Derzeit kommen in der Praxis nahezu ausschließlich Verfahren zum Einsatz, die auf der Analyse von Fingerabdruck, Handgeometrie, Gesicht, Iris, Stimme, Lippenbewegung oder Unterschrift beruhen.

Beim Fingerabdruck nutzt man heute neben dem relativ aufwendigen Vergleich von Grundmustern der Fingerlinien wie Schleifen, Bögen und Wirbeln vor allem die Auswertung der so genannten Minuzien. Dabei handelt es sich um spezielle Merkmale wie Ende, Verzweigungen und Inseln von Fingerlinien. Eingesetzt werden vor allem optische und thermische Sensoren sowie Sensoren, die auf der Änderung des elektrischen Widerstandes oder der elektrischen Kapazität basieren. Im Erprobungsstadium befinden sich weiterhin Ultraschall-Sensoren, die den akustischen Widerstand der Haut messen. Eine Lebenderkennung kann bei allen Sensortypen durch gleichzeitige Messung von Puls, Temperatur oder Blutsauerstoffgehalt erfolgen.

In die Vermessung der Handgeometrie gehen die Abmessungen der Hand, der Durchmesser und die Länge der Finger sowie die Breite der Knöchel ein. Als problematisch hat sich bei diesem Verfahren das natürliche An- und Abschwellen der Finger herausgestellt, was zu teilweise hohen Fehlerraten führte. Diskutiert wird ebenso die Vermessung des

Venenmusters des Handrückens. Wie beim Fingerabdruck kann durch Messung von Puls, Temperatur oder Blutsauerstoffgehalt eine Lebenderkennung durchgeführt werden.

Die Gesichtserkennung stützt sich im wesentlichen auf die Methode der Elastischen Graphen. Dabei werden im Gesichtsbild markante Merkmale wie Augen, Nasenspitze, Kinn, Haaransatz gesucht und zu einem Gitter verbunden. Ein weiteres Verfahren versucht ein vorliegendes Gesicht durch eine geeignete Kombination von Standardgesichtern zu approximieren. Die relativen Gewichtungen dieser Standardgesichter bilden dann den Referenzdatensatz. In der Entwicklung befinden sich 3-D-Erkennungssysteme, bei denen die Projektion von horizontalen Farbstreifen auf das Gesicht die Vermessung der dreidimensionalen Gesichtsform erlaubt. Eine Lebenderkennung kann durch Feststellung von Kopf- und Lippenbewegung erreicht werden.

Bei der Iriserkennung wird die Iris mit Licht einer für das Auge ungefährlichen Wellenlänge im nahen Infrarotbereich zwischen 700 und 900 nm beleuchtet. Anschließend wird das aufgenommene Muster mit Methoden der modernen Signalverarbeitung weiterverarbeitet. Die Iriserkennung gilt insgesamt als sehr leistungsfähiges Verfahren mit geringem Täuschungsrisiko. Die Registrierung des Pupillenreflexes während der Beleuchtung kann eine Lebenderkennung sicherstellen.

Die Stimmerkennung basiert auf der Aufnahme nacheinander folgender Kurzzeitspektren (typischerweise im Abstand von 10-30 ms) mit anschließender Extraktion charakteristischer Werte, wie z.B. der relevanten Stimmfrequenzen. Dabei wird vorzugsweise eine feste Wortsequenz verwendet. In engem Zusammenhang zur Stimmerkennung steht die Analyse der Lippenbewegung bei der Aussprache. Die Mundpartie wird dabei mit einer Videokamera aufgezeichnet und der Sprechfluss ausgewertet.

Etablierte Verfahren der Unterschriftenerkennung z.B. im Bankenwesen, basieren auf der Auswertung statischer Merkmale wie Strichdichte oder Hüllkurve. Neuere Systeme beziehen dynamische Merkmale wie Schriftdruck und Schreibgeschwindigkeit mit ein. Hierbei können spezielle Unterlagen oder auch so genannte Smart Pens Verwendung finden. Bei letzteren handelt es sich um Schreibgeräte, die mit Sensoren und einer Signalverarbeitungseinheit ausgestattet sind und welche die beim Schreiben auftretenden Kräfte in allen drei Dimensionen erfassen. Systeme, die auf der Auswertung dynamischer Merkmale beruhen, beinhalten durch die aktive Teilnahme der zu identifizierenden Person gleichzeitig auch eine Lebenderkennung.

Grundsätzlich wird der Einsatz biometrischer Verfahren zunehmen, wobei langfristig für die Stimm- und Gesichtserkennung das größte Verbreitungspotenzial erwartet wird. Speziell für Hochsicherheitsanwendungen wird sich die Iriserkennung etablieren. Eine Steigerung der Erkennungsgenauigkeit biometrischer Systeme ist durch die gleichzeitige Erfassung mehrerer Merkmale möglich. So sind zur Zeit bereits solche multimodalen Systeme auf dem Markt erhältlich, die Gesicht, Lippenbewegung und Stimme auswerten.

August 2005 Thomas Euting

Terahertz-Strahlen

In jüngster Zeit wurde in den verschiedensten Medien über einige spektakuläre Eigenschaften der so genannten Terahertz-Strahlen (1 THz = 1000 GHz = 10^{12} Hz) berichtet. Diese elektromagnetische Strahlung liegt mit Wellenlängen von einigen Zehntel Millimetern zwischen dem infraroten Licht und den Mikrowellen und verfügt über wesentliche Vorteile dieser beiden angrenzenden Spektralbereiche. So sind viele optisch undurchsichtige Materialien für diese Frequenzen transparent, ähnlich wie für Mikrowellen. Dazu zählen beispielsweise Stoffe, Karton, Plastik, Holz, Keramik und sogar dünne Mauern. Hingegen ist für diese Strahlung Wasser hochabsorbierend, während Metalle stark reflektierend wirken. Wegen ihrer kürzeren Wellenlängen sind Terahertz-Strahlen im Vergleich zu den Mikrowellen besser fokussierbar, so dass wie mit infrarotem Licht scharfe Bilder möglich werden. Ein Nachteil besteht allerdings in ihrer starken Absorption durch den Wasserdampf in der Atmosphäre und der daraus resultierenden (mit Ausnahme einiger Fenster) relativ geringen Reichweite von wenigen Hundert Metern.

Als einer der letzten Spektralbereiche ist die THz-Strahlung bis vor kurzem weitgehend unerforscht geblieben. Hauptgrund war die mangelnde Verfügbarkeit von billigen und kompakten Strahlungsquellen auf Halbleiterbasis, wofür der Begriff „Terahertz-Lücke" geprägt wurde. Für niedrigere Frequenzen im Mikrowellen-Bereich (bis 0,1 THz) benutzt man elektronische Halbleiterschaltkreise. Wegen der steigenden Hochfrequenzverluste sinkt deren Ausgangsleistung aber stark mit wachsender Frequenz. Höhere Frequenzen ab dem Infraroten (> 30 THz) erzeugt man dagegen mit Halbleiterlasern. Für Frequenzen unter 30 THz fehlten hier jedoch bisher die geeigneten Materialien. Darüber hinaus sah man in der Vergangenheit außerhalb der Astronomie kaum Anwendungen für Terahertz-Strahlung.

Die gegenwärtig zu beobachtende Änderung der Situation hat zwei wesentliche Ursachen. Zum einen gelang vor ca. zehn Jahren ein Durchbruch mit der Demonstration eines ersten Bildgebungssystems unter Nutzung von Terahertz-Strahlen. Zum anderen sind in den letzten Jahren deutliche Fortschritte in der Entwicklung von Quellen erzielt worden. Alle Vorteile von Halbleiterquellen besitzt der Quantenkaskaden-Laser, bei dem man eine künstliche Schichtstruktur geeigneter Dicke zur Erzeugung von THz-Laserlicht nutzt. Allerdings müssen diese Laser bisher noch auf Betriebstemperaturen um -200°C gekühlt werden. Ein weiteres Prinzip basiert auf der so genannten nichtlinearen Photomischung, bei der die Terahertz-Strahlung in einem nichtlinearen optischen Prozess aus der Differenzfrequenz zweier Infrarot-Laser entsteht. Zur Erzeugung von Strahlungspulsen im Pikosekundenbereich, wie sie vor allem in der Bildgebung und der Zeitbereichs-Spektroskopie genutzt werden, sendet man einen extrem kurzen Laserpuls auf einen nichtlinearen optischen Kristall oder eine photoleitende Dipolantenne. Die zugehörigen Frequenzspektren haben ihr Maximum bei einigen Terahertz und Bandbreiten von bis zu 50 THz.

Das traditionelle Anwendungsgebiet von Terahertz-Strahlen ist die Spektroskopie. Dabei macht man sich zunutze, dass leichte Moleküle in diesem Frequenzbereich sehr charakteristische Absorptionsspektren („Fingerabdrücke") besitzen. In der Astronomie liefert die reichhaltige Terahertz-Strahlung aus dem Weltall schon seit längerem Informationen

über die Frühgeschichte des Universums oder die Entstehung von Sternen. Die auf der Basis günstiger Quellen vorgeschlagenen neuen Einsatzmöglichkeiten reichen von der Materialcharakterisierung (z.B. verschiedener Kristallstrukturen von Pharmazeutika) über die für die Klimaforschung wichtige Beobachtung von Spurengasen in der Atmosphäre bis hin zum Auffinden von Asbestverunreinigungen in Beton. Die Unterscheidbarkeit der Spektren verschiedener räumlicher Strukturen von biologischen Molekülen eröffnet neue Möglichkeiten bei der Erforschung einer Reihe von Krankheitsbildern wie Allergien, Stoffwechselerkrankungen, Rinderwahnsinn (BSE), Alzheimer oder Parkinson. In der Gentechnik können Terahertz-Strahlen für markerfreie Analyseverfahren mit hoher räumlicher Auflösung verwendet werden. Zu den sicherheitsrelevanten Anwendungen gehört die Entdeckung von versteckten Explosivstoffen wie TNT oder C4. Erfolgreich demonstriert wurde bereits die Unterscheidung verschiedener Drogen sowie biologischer Kampfstoffe wie Milzbrand-Erreger von harmlosen Pulvern, auch in verschlossenen Umschlägen.

Ein großes Anwendungspotenzial besitzen Terahertz-Bildgebungssysteme. Aktive Systeme tasten die abzubildende Fläche Punkt für Punkt mit Terahertz-Strahlen ab. Ebenfalls demonstriert wurde ein passives System, das die natürliche Abstrahlung jedes Körpers im Terahertz-Spektrum detektiert. Durch Fokussierung der Strahlen auf unterschiedliche Schichten des Untersuchungsgegenstands wird auch die Herstellung dreidimensionaler Abbildungen, d.h. Terahertz-Tomografie möglich. Unbefriedigend ist hier allerdings derzeit noch die Scan-Zeit im Minutenbereich. Durch parallele Bildverarbeitung und Verwendung von effizienten numerischen Algorithmen soll sie jedoch zukünftig auf wenige Sekunden reduziert werden.

Zur Anwendung in der Medizin nutzt man die Empfindlichkeit von Terahertz-Strahlen für den Wassergehalt von Proben zur Unterscheidung von gesundem und krankem Gewebe. Vielversprechend ist wegen der begrenzten Eindringtiefe in feuchtes Gewebe insbesondere die Diagnose von Hautkrebs ohne Gewebeentnahme. Auch zur schonenden Erkennung von Karies möchte man Terahertz-Strahlen verwenden, da sie im Unterschied zu Röntgenstrahlen und UV-Licht wegen ihrer vergleichsweise geringen Energie keine ionisierende Wirkung haben. Weitere Anwendungsgebiete eröffnen sich im Handel bei der Erkennung des Fett- und Muskelanteils von Fleisch oder des Reifegrades von Früchten sowie im Auffinden von Materialfehlern. So prüft die NASA gegenwärtig die Verwendung von Terahertz-Strahlen bei der Kontrolle der Schaumstoffisolierung der Treibstofftanks für das amerikanische Space Shuttle auf verborgene Fehler, wie sie wahrscheinlich zum Absturz der Raumfähre Columbia führten. Eine interessante Anwendungsoption ist die Nutzung von Terahertz-Strahlen für berührungslose Sicherheitskontrollen auf Flughäfen, um in Kleidung und Verpackung verborgene Objekte, wie z.B. Waffen aus Keramik oder Plastik, aufzuspüren. Erste Versuche gibt es auch zur Entdeckung von vergrabenen nichtmetallischen Landminen.

Mai 2004 Michael Suhrke

Smart Dust

Als Smart Dust („schlauer" Staub) wird ein Sensorkonzept bezeichnet, bei dem eine Menge von Sensoren geringer Abmessungen gemeinsam ein verteiltes, drahtloses Netz bildet und so ein Gesamtbild des durch die Sensorelemente abgedeckten Gebietes liefert. Die Ursprünge dieses Ansatzes basieren auf Forschungsarbeiten an der Universität Berkeley. Der überwiegende Teil der heute verfolgten Entwicklungslinien ist aktiv ausgelegt, d.h. die einzelnen Elemente des Netzes besitzen neben dem eigentlichen Sensor zusätzlich noch eine Steuerungslogik, Sende- und Empfangskapazitäten sowie eine Stromversorgung. Das Spektrum der möglichen Sensortypen ist groß und wird nur durch die erforderliche geringe Baugröße beschränkt. Daneben gibt es aber auch passive Versionen von Smart Dust, bei denen die Staubelemente nur aus Materialien mit Sensoreigenschaften bestehen, deren Funktionsweise keine zusätzliche Steuerungslogik und Stromversorgung voraussetzt. Die Messwerte der einzelnen Elemente werden dann aktiv von außen, z.B. mit Hilfe eines Lasers, ausgelesen.

Die geringe Baugröße von aktiven Smart-Dust-Elementen wird durch die Verwendung von so genannten mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) ermöglicht, bei denen elektrische und mechanische Komponenten auf einem Bauelement im Mikrometer- bis Millimeterbereich integriert sind. Die kleinsten bisher so realisierten Staubelemente haben Kantenlängen in der Größenordnung von ca. fünf Millimetern; das Entwicklungsziel liegt bei einem Millimeter. Wegen der geringen Abmessungen steht nur sehr wenig Platz für die Energieversorgung, z.B. durch Batterien oder Solarzellen, zur Verfügung. Daher aktivieren sich die Elemente nur zu vorgegebenen Zeiten, um dann zu kommunizieren und Messungen vorzunehmen. Zur Kommunikation verwendet man z.B. Radiowellensender bzw. -empfänger mit nur geringer Reichweite und deshalb auch geringerem Stromverbrauch. Weil diese Reichweite dann nicht mehr ausreicht, um die zentrale Basisstation direkt zu erreichen, senden die Staubelemente ihre Daten nur zu den in ihrer Umgebung gelegenen Nachbarn. Diese leiten die Daten dann solange weiter, bis die Basisstation erreicht ist. Neben Radiowellen findet auch die optische Kommunikation durch Laser Anwendung. Auf diesem Wege können noch kleinere Staubelemente realisiert werden, da hier nicht die bei Radiowellen erforderlichen größeren Antennenabmessungen gebraucht werden. Nachteil der optischen Kommunikation ist allerdings die notwendige freie Sichtlinie zum Kommunikationspartner.

Derzeit befinden sich mehrere aktive Smart-Dust-Systeme in der Testphase. Im kommerziellen Bereich werden sie z.B. eingesetzt, um technische Geräte zu überwachen und so frühzeitig deren eventuelle Fehlfunktionen zu erkennen. Im militärischen Bereich finden Versuche statt, von Drohnen abgeworfenen Smart Dust zur akustischen oder magnetischen Zielaufklärung, -identifizierung und –verfolgung zu nutzen. Darüber hinaus sind zukünftig noch viele weitere Anwendungen denkbar, wie z.B. die vorzeitige Erkennung von Waldbränden, die Überwachung des Verkehrsflusses auf Straßen oder die Lokalisierung und Verfolgung von Gütern. Sicherheitsrelevante Anwendungen könnten u.a. die Überwachung der Umgebung von Flughäfen oder Kernkraftwerken sein. Durch die angestrebte geringe Größe und große Anzahl der Staubelemente werden aber auch sehr

visionäre Einsatzmöglichkeiten denkbar, wie z.B. eine für längerere Zeit in der Luft schwebende Staubwolke. Generell besteht im Überwachungsbereich wegen der geringen Entdeckbarkeit der Sensoren allerdings auch ein großes Missbrauchspotenzial.

Praktisch alle zur Zeit bekannten passiven Versionen von Smart Dust sind chemische Sensoren. Sie basieren auf mikrometergroßen, so genannten photonischen Kristallen mit der Eigenschaft, nur Licht bestimmter Wellenlängen zu reflektieren. Um den Kristall als Sensor nutzen zu können, wird er chemisch so modifiziert, dass sich die reflektierte Wellenlänge vorhersehbar ändert, wenn er mit einer bestimmten Substanz in Berührung kommt. Auf unterschiedliche Substanzen reagierende Staubelemente dieser Art können gemischt werden, um eine Vielzahl von verschiedenen Stoffen gleichzeitig nachzuweisen. Ausgelesen wird die charakteristische Wellenlänge der jeweiligen Stoffe dann mit Hilfe eines Lasers. Die maximalen Ausleseentfernungen liegen derzeit bei ca. 20 Metern; an Distanzen bis zu einem Kilometer wird gearbeitet. Als denkbare Anwendung könnte man sie in Wasser oder in der Luft einsetzen, um aus sicherer Entfernung zu überprüfen, ob eine Verunreinigung mit biologischen oder chemischen Kampfstoffen vorliegt. Eine mögliche Verwendung im medizinischen Bereich ist die schnelle Untersuchung von Blutproben auf eventuelle Krankheiten bei Patienten.

Ein wichtiges Forschungsgebiet bildet derzeit die Energieversorgung von autonomen Mikrosystemen wie Smart Dust. Während Solarzellen eine gute Lösung für helle Umgebungen darstellen, werden bei Dunkelheit andere Technologien benötigt, wie z.B. die Nutzung von Umgebungsvibrationen. Eine andere Möglichkeit sind nukleare Mikrobatterien, die den radioaktiven Zerfall von Elementen ausnutzen. Weiterhin wird daran gearbeitet, den Staubelementen ein gewisses Maß an Eigenmobilität zu verleihen, um z.B. die Sensorabdeckung eines Gebietes zu vergrößern. Hierfür können u.a. Kleinstraketen eingesetzt werden, die den Sensoren das Hüpfen über den Boden ermöglichen. Andere Ansätze verwenden als Vorbild die Fortbewegung von Insekten, wie das Flugverhalten von Fliegen oder die Laufbewegung bei Käfern. Ebenfalls an biologischen Vorbildern (z.B. Insekten, Vögel) orientiert sich die denkbare Nutzung der so genannten Schwarmintelligenz zur Selbstorganisation des Sensornetzes. In diesem Falle wird ein komplexes Gruppenverhalten eines Systems durch eine relativ einfache lokale Wechselwirkung der einzelnen Elemente mit ihrer Umgebung erzeugt. So kann man beispielsweise die Vorgehensweise von Ameisen zur Auffindung des kürzesten Weges zwischen Nahrung und Nest als Vorbild für Smart Dust heranziehen, um eine schnelle und energiesparende Übertragung der Daten zwischen den einzelnen Staubelementen und der Basisstation zu gewährleisten.

Januar 2004 Klaus Ruhlig

Infrarot-Sensoren

Der infrarote (IR) elektromagnetische Spektralbereich schließt sich unmittelbar an das langwellige (rote) Ende des sichtbaren Spektrums (bei ca. 780 nm) an und erstreckt sich bis in den Submillimeterbereich. IR-Strahlung ist unmittelbar mit allen technischen und biologischen Prozessen verknüpft und auch vom Menschen durch körpereigene Rezeptoren wahrnehmbar. Sie enthält ein hohes Maß an Information über Vorgänge, die sich in unserer Umwelt abspielen. Schon aus diesem Grunde besteht ein großes Interesse daran, über geeignete Sensoren zu ihrer Detektion und Messung zu verfügen.

Ein wichtiger Einsatzbereich für IR-Sensoren ist die Beobachtung und Überwachung von Gebieten und Räumen sowie die Entdeckung und Verfolgung von Objekten. Hierbei macht man sich zu Nutze, dass jeder feste Körper abhängig von seiner Temperatur mit unterschiedlicher Intensität infrarote Strahlung emittiert. Solche Anwendungen finden sich z.B. in der Wetterbeobachtung sowie der Untersuchung von Luft- und Wasserverschmutzung. Im militärischen Bereich werden IR-Sensoren in Beobachtungs- und Zielgeräten sowie Zielsuchköpfen eingesetzt. Weitere wichtige Anwendungsbereiche sind Nachrichtentechnik, Spektroskopie und Medizin.

Das Grundprinzip eines IR-Sensors basiert auf der Detektion der elektromagnetischen Strahlung in diesem Wellenlängenbereich und der anschließenden Umwandlung in für die Weiterverarbeitung geeignete elektrische, optische oder mechanische Signale. Zur Strahlungsdetektion werden im wesentlichen zwei Wirkprinzipien unterschieden, die so genannten Quantendetektoren und die thermischen Detektoren.

Die stark wellenlängenselektiven Quantendetektoren basieren auf dem Photoeffekt, d.h. durch Absorption eines Photons wird ein Ladungsträgerpaar erzeugt. Nach diesem Prinzip arbeiten sowohl die seit langem eingesetzten Röhrendetektoren als auch die weitaus zukunftträchtigeren Halbleiterdetektoren. Erstere bestehen im wesentlichen aus einer Bildverstärkerröhre, die im nahen Infrarotbereich empfindlich ist. Eine typische Anwendung hierfür ist das Nachtsichtgerät. Heute eingesetzte Bildverstärker basieren auf einer Mikrokanalplatte, die das Bild am Röhreneingang in sehr viele Einzelpunkte zerlegt und räumlich getrennt verstärkt.

Zu den IR-Halbleiterdetektoren zählen Photowiderstände und Photodioden. Für Überwachungs- und Entdeckungsaufgaben werden heutzutage abbildende Sensoren gefertigt, die aus hochintegrierten Detektormosaiken (Focal Plane Arrays) mit unterschiedlich vielen Elementen (bis zu 1024 x 1024) bestehen. Mittelfristig wird hier eine Vervierfachung des Integrationsgrades erwartet. Für diese Anwendungen wird das nutzbare Spektrum aufgrund der Streckendämpfung auf die Bereiche so genannter atmosphärischen Fenster eingeschränkt (bis 2,5 µm, 3-5 µm und 8-13 µm).

Eine vielversprechende, jüngere Entwicklung auf dem Gebiet der IR-Halbleiterdetektoren sind die so genannten Quantum Well Infrared Photodetectors (QWIPs). Diese bestehen aus einer geeigneten Schichtfolge verschiedener Halbleitermaterialien. Die Besonderheit dieser Technologie liegt darin, dass die spektrale Empfindlichkeit nur abhängig von der

Wahl der Materialien und deren Schichtdicken flexibel eingestellt werden kann. Ein weiterer Vorteil der QWIPs ist ihre hervorragende Temperaturauflösung.

Während einige wenige Typen von Halbleiterdetektoren für den mittleren IR-Bereich gegebenenfalls ohne Kühlung auskommen, müssen Detektoren für das ferne Infrarot im allgemeinen mit flüssigem Stickstoff (77 K) gekühlt werden, um die vorgegebenen Aufgaben zu erfüllen. QWIPs erfordern zum Teil noch niedrigere Temperaturen. Herkömmliche Halbleiterdetektoren sind in Wärmebildgeräten, Infrarotkameras oder Zielsuchköpfen weit verbreitet. Systeme mit QWIP-Technologie sind dagegen noch vergleichsweise selten anzutreffen.

Neben den Quantendetektoren finden die thermischen Detektoren als zweite große Gruppe von IR-Sensoren in letzter Zeit vermehrt Anwendung. Ihr Ausgangssignal ist von der absorbierten Gesamtenergie der Strahlung abhängig, die sich in einer Temperaturerhöhung des Detektors niederschlägt. Thermische Detektoren sind in ihrer spektralen Empfindlichkeit weitgehend wellenlängenunabhängig. Hier sind vor allem die so genannten Bolometer und die pyroelektrischen Detektoren zu nennen. Das Bolometer ändert seinen Widerstand infolge der durch die Strahlungsenergie hervorgerufenen Temperaturerhöhung. Hauptsächlich zur Anwendung kommen Halbleiter-Bolometer (Thermistoren). Pyroelektrische Detektoren nutzen die Temperaturabhängigkeit der spontanen Polarisation so genannter ferroelektrischer Kristalle oder Keramiken aus, die infolge ihres unsymmetrischen Kristallaufbaus einen Dipolcharakter und damit eine permanente, elektrische Polarisation aufweisen. Eine Änderung der Temperatur hat eine Änderung der Polarisation und somit der Potentialdifferenz zur Folge.

Thermische Detektoren werden ähnlich wie IR-Halbleiterdetektoren in hochintegrierter Form hergestellt. Ihre Vorteile sind die Robustheit, die geringen Kosten und die Tatsache, dass sie bei normaler Umgebungstemperatur betrieben werden können. Nachteile sind die etwas geringere Temperaturauflösung und die höhere Zeitkonstante gegenüber Halbleiterdetektoren.

Insgesamt gewinnen abbildende IR-Sensoren immer mehr an Bedeutung. Während für den mittleren IR-Bereich Halbleiterdetektoren in nächster Zeit konkurrenzlos erscheinen, werden thermische Detektoren im fernen Infrarot insbesondere für Überwachungsaufgaben zunehmend eingesetzt. Aufgrund der angesprochenen Nachteile thermischer Detektoren, werden Halbleiterdetektoren in Bereichen, in denen kurze Integrationszeiten aufgrund schneller Bewegungen erforderlich sind, wie z. B. in Zielsuchköpfen, auf absehbare Zeit favorisiert werden. Aber auch hier gibt es Entwicklungsbestrebungen auf der Basis thermischer Detektoren.

März 2001 Frank Pfeil

Chemische Sensoren

Chemische Sensoren, auch Chemosensoren genannt, nutzen eine chemische Reaktion bzw. einen physikalisch/chemischen Effekt zur Identifizierung und häufig auch zur Konzentrationsbestimmung von chemischen Stoffen bzw. Stoffgruppen. Diese an der spezifisch empfindlichen Schicht eines Sensors stattfindende Reaktion verändert dessen Eigenschaften und kann so (in der Regel elektrisch) nachgewiesen werden. Im Vergleich zu analytischen Laborinstrumenten, die vor allem auf ihre Nachweisempfindlichkeit und Genauigkeit optimiert werden, sind Chemische Sensoren dort interessant, wo es auf geringe Baugröße, Messgeschwindigkeit oder Kosten ankommt. Dank vieler Neuentwicklungen finden sie vor allem in den Bereichen Umwelt- und Produktanalytik, Produktionssteuerung und medizinische Diagnostik sowie zunehmend auch in der Wehrtechnik breite Anwendung.

Eine häufige Unterteilung Chemischer Sensoren geht von bestimmten physikalischen Sensoreigenschaften aus, die sich durch die Bindung der zu messenden Substanz (Analyt) an die chemisch aktive Sensorschicht ändern. So führt bei den sog. Elektrochemischen Sensoren die Wechselwirkung von zu analysierenden Ionen oder ionenbildenden Substanzen mit der Sensoroberfläche zu elektrischen Potentialänderungen. Nach diesem Prinzip funktioniert z.B. die sog. Lambda-Sonde, die im Abgasstrom eines Ottomotors zur Regelung der Verbrennung den Restgehalt an Sauerstoff mißt. Auch in Ionensensitiven Feldeffekttransistoren beeinflußt das elektrische Feld der an der empfindlichen Schicht gebundenen Analytionen den Stromfluß durch den Halbleiter.

Homogene Halbleitersensoren können der Konzentrationsbestimmung oxidierender oder reduzierender Gase dienen. Diese lagern sich auf der Oberfläche des Halbleiters an, ändern dort die Zahl der Leitungselektronen und somit die Leitfähigkeit des Halbleiters. Strukturierte Halbleitersensoren auf der Basis von Dioden und Transistoren reagieren auf die Einlagerung von Ladungsträgern mit der Verschiebung ihrer Kennlinie. Ein weiteres nutzbares elektronisches Bauelement ist der Kondensator, bei dem die chemisch sensitive Schicht auf einer Elektrode aufgebracht ist. In diesen Dielektrischen Sensoren ändert sich die Kapazität mit der Anlagerung des Analyten.

Zunehmend gewinnen Chemische Sensoren auf der Basis von lichtleitenden Fasern an Bedeutung. Bei den sog. Intrinsischen Faseroptischen Sensoren wird die Lichtausbreitung im Lichtleiter selbst beeinflußt. So können Moleküle, die sich außen an den Lichtleiter anlagern, die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes ändern. Bei den sog. Extrinsischen Faseroptischen Sensoren dient die Glasfaser dagegen nur zur Lichtleitung, während die gemessene chemische Reaktion außerhalb der Faser, z.B. in einer vor dem Lichtleiter fixierten Membran, abläuft. Derzeit arbeitet man z.B. an der Entwicklung eines in Landminendetektoren nutzbaren Sensors für den Sprengstoff TNT auf der Basis eines fluoreszierenden Polymerfilms als Indikator. Dringen TNT-Moleküle in die Poren des Polymers ein, entsteht eine Komplexverbindung, was zur meßbaren Auslöschung der Fluoreszenz führt.

Ebenfalls zu den Chemischen Sensoren zählen die Wärmetönungssensoren, an deren katalytisch wirkenden Oberflächen der jeweilige Analyt reagiert und die dabei umgesetzte Wärme registriert wird. Ein weiteres Beispiel sind die Massesensitiven Sensoren, bei denen die mit der Anlagerung des Analyten verbundene Masseänderung nachgewiesen wird, z.B. durch die Frequenzänderung eines beschichteten Schwingquarzes. Chemische Sensoren, deren sensitive Schicht biologischer Herkunft ist - meist handelt es sich dabei um Enzyme - werden als Biosensoren bezeichnet. Sie sind besonders selektiv, sind oft als Faseroptische Sensoren ausgeführt und werden z.B. in der Blutanalytik eingesetzt.

Nachteil von Chemischen Sensoren ist oft ihre Querempfindlichkeit, d.h. sie reagieren auf mehrere Stoffe, wenn auch mit unterschiedlicher Empfindlichkeit. Diesem Problem begegnet man vermehrt durch das Zusammenschalten mehrerer Sensoren mit unterschiedlichen Charakteristiken. Bei solchen Sensor-Arrays sind für die Signalverarbeitung insbesondere empirische Verfahren wie künstliche Neuronale Netze geeignet. Als elektronische Nasen für die Erkennung von Gerüchen in der Getränke-, Nahrungs- und Duftindustrie spielen sie eine immer wichtiger werdende Rolle. Sie können auch als Frühwarnsysteme für chemische Fabriken oder zur Überwachung der Atemluft an Bord von Raumschiffen oder U-Booten dienen.

Durch den Einsatz von Mikrotechniken lassen sich nicht nur die Sensoren, sondern auch die dazugehörigen Systeme miniaturisieren. So sind bereits integrierte Mikro-Analysesysteme für Flüssigkeiten entwickelt worden, bei denen Kanalsysteme, Pumpen, Ventile, Sensor-Arrays sowie die Steuer- und Auswerteelektronik auf einem einzigen Chip untergebracht sind. Damit lassen sich die benötigten Probevolumina auf wenige Nanoliter reduzieren. Derartige Minilaboratorien könnten mittelfristig z.B. in Verbindung mit kleinen unbemannten Aufklärungsflugzeugen zur autonomen Detektion von chemischen Kampfstoffen genutzt werden.

Für die Suche nach neuen in Chemosensoren nutzbaren selektiven und langlebigen Sensorschichten werden sowohl die dort stattfindenden molekularen Vorgänge systematisch erforscht als auch neuerdings Zufallsstrategien der Kombinatorischen Chemie angewandt. Neue Materialien und Aufbauprinzipien unterstützen die Trends zur Miniaturisierung, preiswerten Massenfertigung und Herstellung optimierter Multisensorsysteme. Chemische Sensoren werden somit dank vielfältiger Einsatzmöglichkeiten, sinkender Preise und einfacher bzw. automatisierter Handhabung eine stark steigende Verbreitung finden.

Oktober 2000 Ulrik Neupert

Laser-Radar

Laser-Radare sind aktive Aufklärungssensoren, die im optischen Wellenlängenbereich (einschl. UV und IR) arbeiten und als Strahlungsquellen Laser verwenden. Sie erlauben die ortsaufgelöste Erfassung von entfernten Objekten. Darüber hinaus sind sie in bestimmten Modifikationen zur Detektion und Charakterisierung von Schwebstoffen oder Gasen in der Atmosphäre geeignet. Gebräuchliche Abkürzungen für Laser-Radare sind Ladar (Laser-Radar) und Lidar (Light Detection and Ranging), wobei sich letztere Bezeichnung vor allem im zivilen Sprachgebrauch zunehmend durchsetzt.

Ähnlich wie beim konventionellen Radar, das mit Radiowellen arbeitet, basiert das Meßprinzip beim Lidar auf der Aussendung kurzer Lichtpulse in die Atmosphäre. Das von einem erfaßten Objekt in das Meßsystem zurückgestreute Licht wird anschließend von einem Teleskop gesammelt und z.B. von einer Photodiode oder einem Photomultiplier nachgewiesen. Die Entfernungsinformation steckt in der Laufzeit des Laserpulses und damit im zeitlichen Verlauf des reflektierten bzw. zurückgestreuten Signals. Eine räumliche Abbildung ist darüber hinaus durch sukzessive Messungen in vielen verschiedenen, dicht beieinander liegenden Richtungen möglich. Neben der ortsaufgelösten Erfassung erlauben Lidar-Systeme auch die Messung von Geschwindigkeiten. Eine wichtige Rolle spielt hier der Nachweis kleiner Frequenzverschiebungen, die bei der Streuung an bewegten Objekten durch den Dopplereffekt auftreten.

Der Einsatz von Lichtwellen für ein aktives Aufklärungssystem ist nur mit einer entsprechend leistungsfähigen Sendeeinrichtung sinnvoll. Erst die Nutzbarmachung von Lasern hat hier zu praktikablen Lösungen geführt. Deren für diese Anwendung wesentlichen Eigenschaften sind die sehr hohe und exakt regelbare Intensität sowie die genau einstellbare und dabei möglicherweise sehr geringe Pulslänge. Dazu kommen die minimale Streuung der emittierten Frequenz und die geringe Strahldivergenz. Je nach Anwendung kommt eine Vielzahl von Lasern für Lidar-Systeme in Frage. Für die Zukunft wird, wie in der gesamten Lasertechnik, auch hier den Halbleiterlasern eine besondere Rolle vorhergesagt.

Aufgrund der selbst gegenüber Millimeterwellen-Radaren um typischerweise mehrere Zehnerpotenzen kürzeren Wellenlängen sind mit Lidaren wesentlich bessere Ortsauflösungen als mit Radaren und sogar dreidimensionale Darstellungen auch relativ kleiner Ziele möglich. Außerdem sind kleinere Geräteabmessungen realisierbar. Aus dem gleichen Grund ist allerdings auch die Reichweite geringer und die Wetterabhängigkeit stärker. Selbst unter optimalen Bedingungen sind die Aufklärungsreichweiten beim Lidar in der Praxis nicht größer als einige zehn Kilometer.

Über die typischen Radar-Anwendungen hinaus sind Lidar-Systeme auch für die Ermittlung und die Identifizierung von Gasen und Aerosolen in der Atmosphäre geeignet. Neben der Anregung und dem anschließenden Nachweis charakteristischer Fluoreszenzspektren bietet sich dazu vor allem das sog. DIAL-Verfahren an (Differential Absorption Lidar). Es beruht darauf, daß der zu untersuchende Stoff selektiv elektromagnetische Strahlung einer ganz bestimmten Wellenlänge absorbiert. Deshalb sendet man im Wech-

sel Laserpulse zweier Wellenlängen aus, die so gewählt sind, daß das Licht der einen Frequenz von dem Stoff absorbiert wird, das der anderen dagegen nicht. Liegen die Wellenlängen dicht beieinander, ist das Streuverhalten der Pulse praktisch gleich. Ein Intensitätsunterschied der Rückstreusignale beruht dann allein auf der Absorptionsdifferenz, woraus sich die Konzentration des Stoffes ermitteln läßt.

Lidar-Systeme werden in der Praxis bereits zur Fernerkundung der Atmosphäre und zur Überwachung von Schadstoffemissionen eingesetzt. Auch die in jüngerer Zeit in der Verkehrskontrolle eingeführten laserbasierten Geschwindigkeitsmesser beruhen auf dieser Technologie. Im militärischen Bereich bietet sich z.B. eine Nutzung in Hindernis-Warnsystemen für Hubschrauber an. Für Flugkörper-Suchköpfe sollen scannende, bildgebende Lidar-Systeme besonders hohe Zielortungsgenauigkeiten und detailgetreue Zielabtastungen ermöglichen.

Darüber hinaus sind Laser-Radare prädestiniert für die Fernortung von radioaktivem Fallout. Auch zum Fernnachweis von chemischen Kampfstoffen werden sie in Zukunft verstärkt einsetzbar, insbesondere zum Schutz stationärer Anlagen wie z.B. Fliegerhorsten. Der Fernnachweis biologischer Kampfstoffe auf dieser Grundlage wird ebenfalls untersucht. Die physikalischen Möglichkeiten sind hier allerdings stark eingeschränkt. Als Schwierigkeiten gelten insbesondere die sehr geringen Aerosolkonzentrationen, in denen B-Agentien bereits wirksam sind.

Im infraroten Bereich arbeitende Lidar-Verfahren zur Ortung von Kampfstoffwolken nutzen die Rückstreuung der ausgestrahlten Energie an Aerosol-Partikeln. Prototypen derartiger Systeme sind bereits vorhanden. Sie haben eine relativ hohe Reichweite, können aber wegen ihrer geringen Klassifikationsfähigkeit noch nicht einmal zwischen B- und C-Kampfstoffen unterscheiden. Bessere Klassifikationsmöglichkeiten wären möglicherweise mit DIAL-Verfahren erreichbar oder mit UV-Lidar-Systemen, die die Fluoreszenz-Anregung von Molekülen auszunutzen. Letztere hätten allerdings den Nachteil einer besonders geringen Reichweite (unter optimalen Bedingungen maximal 5 km).

Für die Zukunft wird Laser-Radaren eine wesentliche Erweiterung ihres Einsatzspektrums vorhergesagt. Neben der Optimierung der Sende- und Empfangseinrichtungen spielt dabei die Weiterentwicklung der computergestützten Auswerteverfahren eine besondere Rolle. Diese sollen immer mehr Eigenschaften des rückgestreuten Lichtes einbeziehen und damit entscheidend zu einer weiteren Verbesserung der Aufklärungsergebnisse beitragen.

Juni 2000 Jürgen Kohlhoff

Mustererkennung

Als ein Teilgebiet der angewandten Informatik hat die Mustererkennung die Aufgabe, den Inhalt und die Bedeutung sensorisch erfaßter Daten, sog. Muster, mit Hilfe spezialisierter Computer und Software automatisch zu ermitteln. Die so definierten Muster umfassen eine große Vielfalt möglicher Datenströme, wie z.B. die von Mikrophonen, Kameras oder auch Radarsensoren aufgenommenen Signalfolgen oder Bilder. Die prinzipielle Lösbarkeit dieser Aufgabe zeigen viele biologische Vorbilder einschließlich des Menschen. Das Ziel der technischen Realisierung der Mustererkennung konzentriert sich jedoch nicht auf das Nachvollziehen des natürlichen Lösungsweges, sondern auf eine möglichst effiziente Bearbeitung des vorgegebenen Erkennungsproblems.

Die Anwendungsfelder für die Mustererkennung sind entsprechend der Vielfalt der möglichen Muster breit gefächert. Weitgehend auf der Analyse der Musterstrukturen basieren Anwendungen wie die Qualitätskontrolle durch Geräuschanalyse oder visuelle Oberflächeninspektion sowie die automatische Erkennung gesprochener oder geschriebener Sprache, die wachsende wirtschaftliche Bedeutung erlangen. So ermöglichen erst Methoden der Mustererkennung auch bei schnellen Produktionsvorgängen eine hundertprozentige Kontrolle.

Auch die Mustererkennung, bei der die gesamte Datenmenge stärker inhaltlich analysiert wird, findet ein immer größer werdendes Anwendungsspektrum. Es reicht von der diagnostischen Interpretation medizinischer Bilder über die Auswertung schematischer Zeichnungen wie Schaltpläne oder Landkarten bis zur inhaltlichen Analyse von Dokumenten, die in freier Form Text, Formeln, Graphiken und Bilder enthalten. Hierzu zählt auch die Interpretation von Luft- und Satellitenbildern für kartographische Zwecke oder militärische Aufklärung. So kann z.B. das Entdecken und Klassifizieren von Zielen auch aus gestörten oder verrauschten Sensordaten unterstützt oder die Luftbildauswertung durch eine geeignete Vorauswahl bzw. Bewertung erleichtert werden. Aus militärischer Sicht besonders interessant ist hier auch die automatische Klassifikation von Sonarechos.

Ein weiteres großes Anwendungsfeld befaßt sich mit der Klassifikation und Lokalisation von Objekten in Bildern und Bildfolgen. Es umfaßt neben neueren Videokompressionsverfahren für den Unterhaltungsbereich vor allem zivile und militärische Objektverfolgungssysteme. So kann die Interpretation von Bildfolgen, die z.B. mit einer Fernsehkamera aus einem fahrenden Kraftfahrzeug aufgenommen werden, in Fahrerunterstützungssystemen mit unterschiedlichem Automatisierungsgrad bis hin zum vollautonomen Fahrzeug eingesetzt werden. Militärisch wird diese Technik zur Zielverfolgung (Tracker) mit Hilfe eines Kamerasystems im Suchkopf eines Flugkörpers verwendet. Klassifikation und Lokalisation in zwei- oder dreidimensionalen Szenen sind auch in vielen industriellen Anwendungen notwendig, wie z.B. beim Einsatz von Robotern zur Steuerung von Greifvorgängen oder zur Erkennung von Gefahrensituationen.

Das dem Mustererkennungsprozeß zugrundeliegende Optimierungsproblem ist zur Zeit noch nicht global, sondern jeweils nur in Teilstrukturen lösbar. Daher kommt der für einen bestimmten Aufgabenbereich gewählten Systemarchitektur eine große Bedeutung

zu. Das Problem der Suche nach der richtigen oder besten Architektur eines speziellen mustererkennenden Systems ist jedoch noch immer ungelöst. Es gibt zwar generelle Hinweise und Erfahrungen aus realisierten Systemen, aber keine umfassende Theorie. Weit verbreitet ist daher die pragmatische Vorgehensweise des Realisierens und Testens. Eine zunehmend wichtiger werdende Architektur ist der wissensbasierte Ansatz, in dem das verfügbare Wissen über den Aufgabenbereich und das Ziel der Verarbeitung in einem Modell repräsentiert werden. Damit vollzieht sich in der Mustererkennung eine Verschiebung von den bisher statistisch dominierten Methoden zu einer mehr wissensorientierten Strukturanalyse, bei der komplexe Muster durch einfachere Muster und deren inhaltliche Beziehungen zueinander beschrieben werden.

Eine charakteristische Entwicklung der Mustererkennung folgt unmittelbar aus den rapiden Fortschritten in der Sensorik. Die wachsende Vielfalt von Sensoren, die zur Beobachtung einer Szene verwendet werden können (Röntgenapparate, Kameras für ultraviolettes, sichtbares oder infrarotes Licht, mm-Wellen-Radiometer, SAR,...), stellt eine hohe Herausforderung für die anschließende Verarbeitung der resultierenden heterogenen Datenbasis dar. Nur mit effizienter Datenfusion können die großen Vorteile eines Multisensorsystems genutzt werden. Diese kann auf mehreren Ebenen vorgenommen werden, die alle berücksichtigt werden müssen, um die jeweiligen Vorteile optimal nutzen zu können. Die Möglichkeiten reichen dabei vom niedrigsten Rohdaten-Niveau (Pixel-Ebene) über eine Fusion auf einem mittlerem Niveau durch eine geeignete Merkmalsverschmelzung bis hin zur Fusion auf dem höchsten Niveau des Mustererkennungsprozesses, der Entscheidungsfindung. Hier sind eventuell noch bestehende Interpretationsunsicherheiten oder Mehrdeutigkeiten mit Methoden der Künstlichen Intelligenz aufzulösen.

Zukünftige Mustererkennungssysteme stellen immer höhere Anforderungen hinsichtlich der benötigten Rechen- und Speicherkapazität. Der Grund hierfür liegt im wachsenden Datenaufkommen und in den komplexer werdenden Programmen, die immer mehr Zusatzinformation in den Mustererkennungsprozeß mit einbeziehen. Durch die großen Fortschritte sowohl bei der Rechnerhardware, wie schnellere Prozessoren und größere Datenspeicher, als auch bei der Rechnerarchitektur, wie Parallelrechner und andere verteilte Architekturen, ist jedoch zu erwarten, daß auch zukünftig die steigenden Anforderungen erfüllt werden können.

Juli 1999 Henner Wessel

Faseroptische Sensoren

Faseroptische Sensoren basieren auf Lichtwellenleitern, bei denen gezielt der Einfluß bestimmter Umgebungsparameter auf Intensität, Wellenlänge, Phase oder Polarisation des durchstrahlenden Lichtes gemessen wird. Sie bilden eine noch sehr junge Klasse innovativer Sensortypen, deren Entwicklung erst in den frühen siebziger Jahren begann und eng mit den Fortschritten der optischen Nachrichtenübertragung verknüpft ist. Obwohl dort der Einfluß äußerer Bedingungen auf die Übertragungseigenschaften der Lichtwellenleiter gerade nicht erwünscht ist und vermieden werden muß, konnten viele Schlüsselkomponenten der Telekommunikation unverändert für die Sensorik übernommen werden. Für eine Reihe von Sensor-Anwendungen werden aber auch neue Komponenten, insbesondere Spezialfasern, systematisch entwickelt.

Aufgrund der geometrischen Abmessungen wirkt das Innere eines Lichtwellenleiters wie ein Resonator, in dem sich bestimmte Variationen (Moden) eines Lichtstrahls bevorzugt ausbreiten. Je nach technischer Ausführung können das mehrere (Multimode) oder nur ein Strahltyp (Monomode) sein. Bei den Multimode-Sensoren beeinflußt der zu messende Parameter in der Regel die Transmissionseigenschaften des Wellenleiters und damit die Intensität des geführten Lichtes. Auf diesem Prinzip basieren heute die am weitesten verbreiteten faseroptischen Sensoren. Beim Monomode-Sensor beeinflußt der von außen einwirkende Parameter andere Merkmale der Lichtwelle, z.B. ihre Phase. Hierbei handelt es sich in der Regel um interferometrische Sensoren. Die meisten Monomode-Sensoren befinden sich noch im Entwicklungsstadium.

Faseroptische Sensoren haben eine ganze Reihe grundätzlicher Vorteile gegenüber konventionellen Sensoren. Sie bestehen aus dielektrischen Werkstoffen und sind daher unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Störfeldern. Im Gegensatz zu elektrischen Sensoren können sie ohne Beeinträchtigung der Sicherheit auch in der Umgebung explosionsgefährdeter Substanzen, z.B. in Kraftstofftanks, eingesetzt werden. Insbesondere Sensoren auf interferometrischer Basis können vom Funktionsprinzip her außerordentlich hohe Empfindlichkeiten besitzen. Weitere positive Merkmale sind der geringe Raumbedarf, das vernachlässigbare Gewicht und die hohe geometrische Flexibilität. Besonders bemerkenswert ist die Tatsache, daß faseroptische Sensoren „verteilt" sein können, also ortsaufgelöste Messungen entlang der Faser erlauben. Außerdem sind sie in einem großen Temperaturbereich einsetzbar und resistent gegen korrosive Umgebungen. Ein besonders interessantes Anwendungspotential haben sie als Bestandteile sog. Intelligenter Materialien und Strukturen, wo sie während des Betriebs den Zustand des Verbundes überwachen und gleichzeitig sogar eine (mechanisch) tragende Funktion übernehmen können.

Faseroptische Sensoren eignen sich im Prinzip zum Nachweis einer ganzen Reihe von Meßgrößen. Für industrielle Überwachungsaufgaben können sie geometrische oder physikalische Variablen wie Position, Geschwindigkeit, Temperatur und Druck messen oder Betriebszustände (z.B. „ein/aus") anzeigen. Faseroptische Beschleunigungs- und Berührungssensoren sind u.a. für Robotersysteme von Interesse. In der Kraftfahrzeugtechnik ist die faseroptische Sensorik vor allem im Zusammenhang mit optischen Bussystemen zur

Datenübertragung vielversprechend. Ein weiteres wichtiges Einsatzfeld ist die medizinische Diagnostik, für die biochemische Analysen mit faseroptischen Chemo- bzw. Biosensoren auf schnelle und einfache Weise unmittelbar am Patienten vorgenommen werden können. Die als Faraday-Effekt bekannte Drehung der Polarisationsebene von linear polarisiertem Licht in einem Magnetfeld bildet die Grundlage für die faseroptische Messung elektrischer Ströme. Vorteilhaft ist hier z.B. das Fehlen von Isolationsproblemen bei der Integration von Lichtleitfasern in Stromkabeln. Ein technologisch besonders aufwendiges faseroptisches Sensorsystem ist der Faserkreisel. Dieser interferometrische Sensor für Navigationsanwendungen ist in der Lage, kleinste Drehbewegungen zu detektieren.

Für den militärischen Einsatz sind neben Faserkreiseln insbesondere die sog. faseroptischen Hydrophone von Interesse. Diese dienen zur Schallmessung im Unterwasserbereich und basieren auf der mechanischen Belastung der Faser durch den Schalldruck, der dabei zu einer nachweisbaren Änderung des Brechungsindexes und der Faserlänge führt. In der Entwicklung befinden sich auch faseroptische Sensoren zum Nachweis ionisierender Strahlung mit interessanten Anwendungsmöglichkeiten im ABC-Schutz.

Trotz der nun schon über 20 Jahre dauernden Entwicklungsbemühungen und trotz ihrer positiven Eigenschaften sind die ursprünglichen, sehr optimistischen Marktprognosen für faseroptische Sensoren bisher noch nicht eingetreten. Herkömmliche Sensoren können in vielen Fällen nicht ohne weiteres durch faseroptische ersetzt werden, ohne daß gleichzeitig eine bereits vorhandene aufwendige Sensor-Peripherie entscheidend modifiziert werden muß. Außerdem sind die kommerziell erhältlichen Fasern aufgrund der kleinen Stückzahlen bisher noch relativ teuer. Nicht zu unterschätzen bleibt auch die Tatsache, daß bereits im Einsatz befindliche konventionelle Sensoren den konkurrierenden faseroptischen Systemen insbesondere hinsichtlich der Langzeitzuverlässigkeit oft noch überlegen sind. Gerade im Mangel an Erfahrung mit den neuen Meßverfahren liegt ein wesentlicher Grund für die nur zögernde Einführung. Aus technologischer Sicht kann den faseroptischen Sensoren jedoch auch weiterhin ein bedeutendes Potential bescheinigt werden. Fortschritte werden vor allem auf dem Gebiet der Fasern selbst angestrebt. Hier gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, z.B. durch die Entwicklung neuer und die Kombination verschiedener Fasermaterialien.

März 1998 Jürgen Kohlhoff

Biosensoren

In Biosensoren werden biologische Meßfühler mit technischen Bauteilen kombiniert. Sie basieren auf natürlichen oder der Natur nachempfundenen Bestandteilen, die nach dem sog. Schlüssel-Schloß-Prinzip spezifisch auf eine zu analysierende Substanz reagieren. Diese Reaktion führt zur Veränderung bestimmter physikalischer Eigenschaften eines Signalwandlers, mit dem der biologische Meßfühler in direktem Kontakt steht, und damit schließlich zu einem auswertbaren Signal. Auf diese Weise gelingt die technische Nutzbarmachung der enormen natürlichen Wahrnehmungsleistungen vieler Lebewesen. So können z.B. Schmetterlinge sogar einzelne Moleküle von Lockstoffen ihres Partners registrieren.

Aufgrund ihres Meßverfahrens zeichnen sich Biosensoren also durch eine besonders hohe Selektivität und Empfindlichkeit aus. In dieser Hinsicht sind sie den meisten konventionellen chemischen Sensoren weit überlegen. Sie sind in der Lage, auch komplex zusammengesetzte Proben ohne spezielle Vorbereitung zu untersuchen. Die Analysen können schnell, zuverlässig und nahezu kontinuierlich geliefert werden. Ihr wesentlicher Vorteil gegenüber laboranalytischen Verfahren, deren außerordentliche Erkennungsleistungen zudem durch einen besonders hohen Aufwand erkauft werden müssen, ist die Möglichkeit zur Messung und Auswertung direkt am Ort des Geschehens. Dadurch ist bereits heute häufig eine deutliche Reduzierung der Kosten pro Messung möglich.

Welche Substanz von einem Biosensor nachgewiesen werden kann, hängt entscheidend vom eingesetzten biologischen Meßfühler ab. Prinzipiell geeignet sind hier bestimmte Enzyme, Antikörper, Zellteile oder ganze Zellen. Detektierbar sind damit niedermolekulare Substanzen wie Stoffwechselprodukte, Pharmaka oder Gase, Enzymbestandteile wie Vitamine oder Coenzyme, Makromoleküle wie Stärke oder Zellulose sowie bestimmte Viren und Mikroorganismen. Derzeit sind bereits für weit über 100 verschiedener solcher Analyte Biosensoren bekannt. Die Mehrzahl dieser Entwicklungen ist jedoch noch relativ weit von einer kommerziellen Lösung enfernt.

Die bisher realisierten Biosensoren erfüllen die Anforderungen der Praxis hinsichtlich Robustheit und Wartungsaufwand oft nur unvollkommen, sicherlich ein besonderer Nachteil gerade im Hinblick auf die militärische Anwendung. Durch Kombination mikrosystemtechnischer und biotechnologischer Verfahren sollen derartige Schwachstellen eliminiert werden. Langfristiges Ziel ist die monolithische Integration aller Komponenten auf einem Chip, der Sensoren, Aktoren (z.B. Pumpen, Ventile) und die Auswerteelektronik tragen soll. Damit ist langfristig sogar die Nutzbarkeit langzeitimplantierbarer Biosensoren zur Steuerung künstlicher Organe zu erwarten, z.B. für eine künstliche Bauchspeicheldrüse. Eine Massenproduktion in Siliziumtechnologie würde außerdem die Kosten senken. Sog. Arrays von Biosensoren identischer Charakteristik könnten dem Nachteil der kurzen Funktionsdauern entgegenwirken, indem sequentiell immer nach Ausfall des gerade messenden ein neuer Sensor meßbereit gemacht wird. Auch Multiparameter-Sensoren sind als Arrays realisierbar.

Ein wichtiger Forschungsschwerpunkt liegt auf dem Gebiet der biologischen Meßfühler selbst. Von besonderer Bedeutung sind hier neuartige und weiterentwickelte Verfahren des computergestützten Protein-Engineering. Ein wesentliches Ziel ist die Erhöhung der Stabilität, da der Einsatz von Biosensoren heute immer noch auf Zeiträume von oft nur wenigen Wochen limitiert ist. Außerdem können die Biomoleküle bisher erst nach Fertigstellung der möglicherweise benötigten Siliziumkomponenten in das System eingebracht werden, da sie den hohen Temperaturen bei der Fertigung nicht standhalten. Hier sollen gentechnische Modifikationen zu weiteren Fortschritten führen. Gentechnische Verfahren könnten auch die Realisierung technisch bisher nur ansatzweise genutzter Prinzipien der Biologie z.B. zur Verstärkung von Signalen ermöglichen und damit die Fertigung sog. Ultrasensitiver Biosensoren erlauben.

Fortschritte werden außerdem bei der Weiterentwicklung der Signalwandler erwartet. Die meisten der heute eingesetzten sog. Transducer liefern elektrische Signale. Interessante Entwicklungen gibt es hier insbesondere bei optischen Wandlungssystemen, die z.B. die Änderung des Brechungsindex in einer Glasfaser ausnutzen, an deren Oberfläche sich Moleküle anlagern.

Trotz aller zu erwartenden Verbesserungen werden Biosensoren den ebenfalls ständig weiterentwickelten laboranalytischen Verfahren in Empfindlichkeit und Selektivität aber vermutlich immer unterlegen bleiben. Da sie im praktischen Einsatz unter den vor Ort herrschenden Umgebungsbedingungen nicht nur zuverlässig, sondern v.a. auch schnell arbeiten müssen, sind bei ihrer Herstellung gewisse Kompromisse unumgänglich. Außerdem sind die Entwicklungen auf diesem Gebiet relativ aufwendig und teuer. In einigen potentiellen Anwendungsbereichen werden Biosensoren daher mit weiterentwickelten klassischen Methoden konkurrieren müssen, etwa mit miniaturisierten Laboranalysegeräten oder mit verbesserten konventionellen Farbtests.

Das ändert jedoch nichts an den insgesamt positiven Zukunftsaussichten für Biosensoren. Ihre wesentlichen zivilen Einsatzgebiete sind die Umwelttechnik, die medizinische Diagnostik, die Lebensmittelkontrolle, die Prozeßsteuerung und die Drogendetektion. Vor allem über die ersten beiden Bereiche erhalten sie auch eine zumindest indirekte Relevanz für die Streitkräfte. Von zunehmender direkter militärischer Bedeutung ist ihre prinzipielle Eignung zur sicheren und schnellen Vor-Ort-Detektion von Kampfstoffen. Aber auch Entwickungen wie ein neuartiges Laktat-Taschenmeßgerät zur objektiven Abschätzung der momentanen körperlichen Belastung eröffnen womöglich ganz neue Einsatzoptionen für Soldaten. In diesem Sinne werden Biosensoren z.B. im Zusammenhang mit der Ausrüstung des „Soldaten als System" diskutiert.

Mai 1997 Jürgen Kohlhoff

Leben & Natur



Natur

Leben & Natur

Leben & Natur

Leben & Natur



Leben & Natur

Leben

Biologische Technologien

2009
2008
2007 — **Synthetische Biologie**
2006 — **Biotechnologie**
2005
2004
2003
2002
2001
2000
Gentechnik
1999
1998
Bionik
1997 — **Biomimetische Werkstoffe**
1996



Synthetische Biologie

Als Synthetische Biologie bezeichnet man die gezielte Entwicklung komplexer biologischer Systeme unter Anwendung ingenieurwissenschaftlicher Methoden. Ziel dieser jungen Forschungsdisziplin ist es, in solchen Systemen neuartige Funktionalitäten zu ermöglichen, die in der Natur nicht vorkommen. Der wesentliche Unterschied zur herkömmlichen Biotechnologie besteht neben dem Ausmaß und der Komplexität der angestrebten Veränderungen vor allem in der systematischeren Vorgehensweise.

Die gegenwärtig verfolgten Forschungsansätze der Synthetischen Biologie betreffen verschiedene Organisationsebenen der belebten Natur. Auf molekularer Ebene wird angestrebt, die Menge der Grundbausteine des Lebens durch Entwurf und Synthese neuartiger Gene und Proteine zu erweitern. Darüber hinaus sollen zwischen diesen Bausteinen neuartige Wechselwirkungen z.B. bei Regulationsmechanismen oder enzymatische Reaktionen generiert werden. Auf zellulärer Ebene wird sowohl an der Schaffung neuer lebender Zellen durch vollständige Synthese aus einzelnen Komponenten als auch an der teilweisen Veränderung des Erbgutes natürlicher Zellen gearbeitet. Auf der Ebene höher entwickelter Organismen und ihrer Gesellschaften spielt derzeit im Wesentlichen die Synthese von Evolutionsmechanismen in Populationen eine Rolle. Hierbei gibt es inhaltliche Überschneidungen mit einem weiteren neuen Wissenschaftsgebiet, das als Künstliches Leben (Artificial Life) bezeichnet wird. Es befasst sich mit der gezielten Erschaffung künstlicher Lebensformen, die in der Regel keine auf der natürlichen Kohlenstoffchemie basierende Gestalt besitzen. Die derzeit prominenteste Forschungsrichtung dieser Disziplin ist die Simulation und Abwandlung von Evolutionsprozessen.

Durch die Einführung von Prinzipien und Verfahren, die in den Ingenieurdisziplinen bereits etabliert sind, soll in der Synthetischen Biologie eine wesentliche Weiterentwicklung der Vorgehensweise bei der Manipulation biologischer Systeme erreicht werden. Zu diesen Prinzipien gehört die Modularisierung und Standardisierung von Bauelementen und Vorrichtungen entsprechend international anerkannter Kriterien sowie die routinemäßige Anpassung vorhandener allgemeiner Entwicklungsprozeduren an biologische Systeme. Der wissenschaftliche Ansatz der Synthetischen Biologie beim Entwurf künstlicher biologischer Systeme ist dabei im hohen Maße abhängig von der Verfügbarkeit einer auf quantitativen Forschungsergebnissen basierenden Wissensbasis über die zugrunde liegenden, teilweise sehr komplexen zellulären Vorgänge in natürlichen Organismen. Mit entsprechenden Analysen beschäftigt sich die wissenschaftliche Disziplin der Systembiologie, in der seit einigen Jahren sehr erfolgreich versucht wird, biologische Systeme auf ihren verschiedenen Organisationsebenen als Ganzes zu betrachten.

Die potenziellen Anwendungsgebiete der Synthetischen Biologie sind breit gefächert. Mittels geeignet entworfener Mikroorganismen könnten in speziell entwickelten komplexen intrazellulären Synthesewegen Pharmazeutika und Materialien, wie z.B. biologisch abbaubarer Kunststoff oder Ethanol, produziert werden. Im Bereich Umweltschutz ließen sich Bakterien mit in geeigneter Weise entwickelten Eigenschaften zukünftig effizienter zum Abbau von toxischen Abfällen und der Sanierung chemisch belasteter Böden einset-

zen. Für medizinische Zwecke werden z.B. komplexe Wirkstoffträgersysteme entwickelt, die Schädigungen des Organismus autonom aufspüren und reparieren sollen.

Großes Anwendungspotenzial verspricht ebenfalls die Synthese und zweckdienliche Weiterentwicklung der von Lebewesen bei der Molekülsynthese und dem Strukturaufbau erreichten atomaren Präzision. Diese nutzt die Natur beispielsweise bei der Konstruktion komplexer Polymere mit genau reproduzierbaren Strukturen. Die grundlegenden zellulären Vorgänge der Biosynthese solcher Moleküle sind derzeit bereits durch gentechnische Verfahren steuerbar. Auf diese Weise lassen sich künstliche Biopolymere mit präzisen Kettenlängen und nützlichen Materialeigenschaften wie seidenähnliche Festigkeit oder große Adhäsionskraft produzieren. Die in der Synthetischen Biologie angestrebte Routine bei der Manipulation und Kontrolle biologischer Systeme könnte langfristig auch hinsichtlich der Steuerbarkeit der materiellen Eigenschaften nanoskaliger Werkstoffe und Komponenten einen gangbaren Weg aufzeigen. Die Natur bietet hier eine Reihe von Möglichkeiten, wie eine solche Steuerbarkeit erreicht werden kann. So wird z.B. daran gearbeitet, DNA-Moleküle als Schablonen für definierte Anordnungen von nanoskaligen Objekten auf Oberflächen zu nutzen. Entsprechende Ansätze könnten vor allem für die Produktion von nanoelektronischen Schaltkreisen und molekularen Speicherelementen interessant werden.

Von großer Bedeutung sind solche Forschungsansätze der Synthetischen Biologie, bei denen eine Erweiterung der molekularen Grundlage des Lebens verfolgt wird. Ein besonders vielversprechender Weg ist dabei die Erweiterung des genetischen Codes. Durch Verwendung von mehr als den vier DNA-Nukleotid-Bausteinen (T, G, A, C) lässt sich die im Erbgut speicherbare Informationsmenge sowie die Menge der für die Proteinsynthese verfügbaren unterschiedlichen Aminosäuren wegen der größeren Kombinationsmöglichkeiten erhöhen. Hieraus erschließen sich weit reichende Anwendungsmöglichkeiten vor allem im Bereich der Medizin und Pharmazie. So nutzt z.B. ein marktgängiger DNA-Test, der bereits heute bei der Diagnostik von Infektionskrankheiten wie HIV und Hepatitis eingesetzt wird, diese Möglichkeit der Erweiterung des genetischen Codes.

Bei aller Faszination über die Möglichkeiten des neuen Forschungsgebietes der Synthetischen Biologie gibt es eine Vielzahl von Problemen, die derzeit noch ungeklärt sind. Hierzu zählen z.B. die grundsätzlichen ethischen Bedenken bei der Schaffung neuen Lebens oder die Frage des Missbrauchpotenzials zur Herstellung neuartiger biologischer Waffen.

Januar 2007 Roman Kernchen

Biotechnologie

Unter Biotechnologie versteht man den Einsatz biologischer Systeme zur Veränderung von belebter und unbelebter Materie. Im Prinzip werden biotechnologische Verfahren schon seit Jahrtausenden angewendet, um Lebensmittel (z.B. Bier, Sauerteig) herzustellen oder zu veredeln. Aber erst im 19. Jahrhundert erkannten Wissenschaftler mit Hilfe des Mikroskops, dass Mikroorganismen für diese Stoffumwandlung verantwortlich sind, und erst vor ca. 100 Jahren ist mit dem bewussten und gezielten Einsatz von biotechnologischen Prozessen ein eigenständiger Wissens- und Technologiezweig entstanden. Heute eröffnen sich neue biotechnologische Anwendungsoptionen vor allem aus dem rasanten Erkenntnisgewinn auf dem Gebiet der Molekularbiologie. Von großer Bedeutung ist hier insbesondere die als Gentechnik bezeichnete gezielte Manipulation des Erbguts von Lebewesen. Die unterschiedlichen Einsatzbereiche biotechnologischer Verfahren werden heute üblicherweise durch bestimmte Farben (grün, rot und weiß) gekennzeichnet.

So werden die biotechnologischen Anwendungen im Agrarsektor unter dem Begriff Grüne Biotechnologie zusammengefasst. Im Mittelpunkt steht dabei die gezielte Veränderung von Pflanzen zur Verbesserung ihrer Nutzbarkeit. Ebenfalls schließt dieser Bereich die Anwendung der Biotechnologie in der Tierzucht und der Nahrungsmittelindustrie ein. Gegenüber der Grünen Biotechnologie gibt es in Europa, anders als in den meisten außereuropäischen Ländern, große Skepsis, die sich auch in der Gesetzgebung widerspiegelt. Besorgnis herrscht gegenüber dem Konsum von Lebensmitteln aus gentechnisch veränderten, sogenannten transgenen Pflanzen und Tieren, aber vor allem gegenüber der Gefahr einer Freisetzung gentechnisch veränderter Lebewesen, insbesondere in Form von Saatgut.

Die so genannte Rote Biotechnologie umfasst den Bereich der medizinischen Anwendungen. Dazu gehören die Entwicklung und Herstellung von Produkten (Therapeutika, Diagnostika, Impfstoffe, künstliches Gewebe usw.) sowie von Modellorganismen aus dem tierischen Bereich, die zur Entwicklung neuer Therapeutika benötigt werden. Eingeschlossen ist die Produktion von Wirkstoffen durch transgene Organismen. Die Rote Biotechnologie spielt vor allem für die Therapie von Krankheiten, bei denen herkömmliche Medikamente und Verfahren bisher keine oder nur begrenzte Heilungsmöglichkeiten liefern, eine immer wichtigere Rolle. So ist z.B. die Bekämpfung der verschiedenen Krebserkrankungen durch gezielte Eingriffe in die Steuerungsmechanismen des Tumorwachstums das Ziel einer Vielzahl von Forschungs- und Entwicklungsansätzen.

Unter Weißer Biotechnologie wird in erster Linie die industrielle biotechnologische Herstellung von verschiedenen Grund- und Feinchemikalien, Enzymen, Lebens- und Futtermitteladditiven sowie Agrar- und Pharmavorprodukten in geschlossenen Produktionskreisläufen verstanden. Zu den wichtigsten Produkten gehören hier derzeit Ethanol, Antibiotika und Vitamine. Von zunehmendem Interesse ist der Einsatz biotechnologischer Verfahren für die Kunststoffindustrie. Ebenfalls zur Weißen Biotechnologie gehört der Bereich der nachsorgenden Umweltbiotechnologie. Hierzu zählt man den Einsatz

biologischer Verfahren u.a. bei der Bodensanierung, Abwasserbehandlung und Abfall- bzw. Reststoffverwertung.

Die herausragende Rolle in der heutigen Biotechnologie spielt die Gentechnik, d.h. die gezielte Übertragung genetischer Informationen zwischen Organismen. Gegenwärtig werden z.B. Bakterien mit dem Ziel gentechnisch verändert, pharmazeutisch wirksame Substanzen sowie Aminosäuren und Biopolymere zu erzeugen. Gentechnische Veränderungen an Bakterien werden zudem vorgenommen, um deren natürliches Vermögen zur Durchführung bestimmter technologisch nutzbarer Prozesse zu erweitern. So wurden z.B. Bakterienstämme entwickelt, die Umweltschäden abbauen oder Biomasse aus Zellulose in verwertbare niedermolekulare Kohlenstoffverbindungen umwandeln können. Aber auch höhere Lebewesen können in nutzbringender Weise gentechnisch verändert werden. Während in der Vergangenheit sehr zeitaufwendig mittels selektiver Kreuzungen besonders leistungsfähige Typen verschiedener Nutzpflanzen und -tiere gezüchtet werden mussten, ist es heute in manchen Fällen bereits möglich, höhere Organismen gentechnisch zu verändern. So ist es bereits gelungen, eine ganze Reihe transgener Pflanzen zu erzeugen. Zu den neuen Merkmalen zählen dabei u.a. veränderte Fruchtreifung, verbesserte Nahrungsqualität und Herbizidresistenz.

Untersuchungen über die Anwendung der Gentechnik bei Tieren und deren mögliche Auswirkungen befinden sich überwiegend noch im Anfangsstadium. Gentechnisch veränderte Tiere sind derzeit vor allem in der medizinischen Grundlagenforschung von Bedeutung. Es gibt bereits transgene Tiermodelle zur Erforschung verschiedener menschlicher Erkrankungen, darunter Alzheimer-Krankheit und Mukoviszidose. Darüber hinaus wird jedoch auch das Ziel verfolgt, bei landwirtschaftlichen Nutztieren durch gentechnische Manipulationen eine Steigerung der Produktivität, die Verminderung der Anfälligkeit gegenüber Krankheiten oder eine Verbesserung der Aufnahme von Nährstoffen herbeizuführen.

Als ein weiteres zukunftsträchtiges Forschungs- und Entwicklungsgebiet der molekularen Biotechnologie wird die Anwendung der Nanotechnologie auf biologische Systeme, die so genannte Nano-Biotechnologie angesehen. So wurde z.B. in den letzten Jahren mit der Entwicklung von Werkzeugen zur Analyse und Manipulation nanoskaliger Strukturen eine wichtige Grundlage dafür geschaffen, die molekularen Eigenschaften biologischen Materials (z.B. Spinnenseide, bakterielle Zellmembranen) sowie biologischer Struktur- und Funktionsprinzipien (Biomineralisation, molekulare Erkennung, Reparaturmechanismen) für technische Anwendungen zu nutzen.

September 2005 Roman Kernchen

Gentechnik

Die Gentechnik beschäftigt sich mit der technischen Manipulation der molekularen Grundlagen des Lebens. Sie ist keine eigenständige Wissenschaft, sondern eine Arbeitsmethode der Molekularbiologie oder, noch weiter gefaßt, der Biotechnologie. Die Verfahren der Gentechnik beziehen sich auf die Erbsubstanz aller Lebewesen, das Molekül Desoxyribonukleinsäure (DNS).

Die DNS ist in jeder Zelle eines Organismus enthalten. Sie beinhaltet Informationen, die auf komplizierte Weise gezielt in die Synthese der körpereigenen Proteine (Eiweiße) umgesetzt werden. Diese wiederum bestimmen entscheidend den Aufbau sowie die Stoffwechselfunktionen und damit sämtliche stofflich-körperlichen Charakteristika des Organismus.

Das Grundprinzip der DNS-Struktur ist immer gleich, bei Mikroorganismen wie bei Menschen, Tieren oder Pflanzen. Wesentliche Bestandteile sind vier als Nukleotide bezeichnete Moleküle. Die Abfolge dieser in der DNS aufgereihten Grundbausteine ist der Schlüssel für den Bau der Körpereiweiße. Als Gen wird der Abschnitt der DNS bezeichnet, der die Information für die Zusammensetzung eines einzigen solchen Proteins enthält und damit verantwortlich für eine bestimmte Eigenschaft des Organismus ist. Ein Gen kann aus vielen tausend Nukleotiden bestehen. Die Gesamtzahl aller Gene eines Lebewesens wird Genom genannt. Das menschliche Genom enthält über 100 000 Gene. Seine Entschlüsselung, d.h. die Aufklärung, wie ein einzelnes Gen aussieht und für welches Merkmal es verantwortlich ist, wird weltweit intensiv betrieben.

Jeder DNS-Einzelstrang ist nach genauen Regeln mit einem komplementären Strang zu einer Doppelhelix genannten spiralförmigen Struktur verbunden. Diese öffnet sich bei jeder Zellteilung wie ein Reißverschluß. Anschließend wird jeder der beiden Einzelstränge durch sukzessives Aneinanderfügen von Grundbausteinen wieder zu einer mit der Ausgangsform identischen Doppelhelix ergänzt. Dieses Verhalten ist auch die Grundlage für die Vererbung. Allerdings ist die Natur bei der Weitergabe der Erbinformation von einer Generation zur nächsten nicht ganz exakt, sondern läßt einen gewissen Anteil an Fehlern, sog. Mutationen, zu. Nur so können neue Eigenschaften entstehen. Die klassischen Züchtungsverfahren beruhen auf der wiederholten Kreuzung von Lebewesen mit in einer gewünschten Richtung veränderten Eigenschaften.

Die Gentechnik greift künstlich in diese Abläufe ein. Ungefähr seit Mitte der 70er Jahre ist man in der Lage, die DNS gezielt in Einzelstücke zu zerlegen und diese wieder zusammenzusetzen. Die auf diese Weise neu formierten Gene können vermehrt (kloniert) werden, bis sie in einer für die Weiterverarbeitung erforderlichen Menge vorliegen. Sie werden dann in den eigentlichen Zielorganismus transferiert, der auf diese Weise vorbestimmte neue Eigenschaften erhält. Für diese Zwecke werden im wesentlichen keine mechanischen Werkzeuge, sondern komplizierte und ständig weiterentwickelte biochemische Verfahren eingesetzt. Diese beruhen beispielsweise auf dem Einsatz von Enzymen, welche die DNS an bestimmten Stellen durchtrennen können.

Die Gentechnik ermöglicht eine starke Beschleunigung der mit klassischer Züchtung im Prinzip ebenfalls erreichbaren Entwicklungen. Darüber hinaus ist damit aber auch die Schaffung von Organismen möglich, die unter natürlichen Randbedingungen nicht hätten entstehen können. So ist die Gentechnik im Prinzip in der Lage, Erbanlagen aller Lebewesen miteinander zu kombinieren und die von der Natur gesetzten Schranken zwischen den Arten zu durchbrechen. Diese Tatsache begründet zusammen mit anderen ökologischen bzw. gesundheitlichen Bedenken die starke öffentliche Kritik an diesem hochinnovativen Technikfeld.

Auf der anderen Seite stehen die enormen Chancen, die mit der Nutzung der Gentechnik verbunden sind. Schon heute hat sie eine große Bedeutung für die biologische Grundlagenforschung. Vor allem zur Aufklärung der Wechselwirkung zwischen Körperzellen und ihrer Umwelt hat sie bereits wesentlich beigetragen. Für die Zukunft verspricht man sich weitere wesentliche Impulse im Bereich der Medizin. So kann man Bakterien dazu bringen, die Produktion medizinischer Wirkstoffe zu übernehmen. Pathogene Mikroorganismen können besser verstanden und ihre Schwachstellen gezielt bekämpft werden. Langfristig erwartet man durchgreifende Erfolge bei der Abwehr von Erbkrankheiten. Für die Lebensmittelversorgung sind z.B. Nutztiere mit größeren Erträgen oder gegen unwirtliche Umweltbedingungen resistente Nährpflanzen interessant. Direkte Auswirkungen auf die Wehrtechnik sind vor allem im Bereich des Schutzes vor biologischen und chemischen Kampfstoffen zu erwarten, und zwar sowohl im medizinischen Sektor als auch bei der Sensorik bzw. Aufklärung.

Die prinzipiellen theoretischen Grundlagen der Gentechnik sind heute zum großen Teil verstanden. Von einer umfassenden praktischen Verwirklichung der angedeuteten Möglichkeiten ist man allerdings noch weit entfernt. Die auf diesem Gebiet weltweit intensiv bearbeiteten Probleme sind wissenschaftlich-technischer Art, hängen aber auch mit dem enormen Ausmaß des in der Natur vorliegenden Untersuchungsmaterials zusammen. Zunehmend gelingt es, einzelne Arbeitsschritte nicht mehr in lebenden Organismen (z.B. Bakterien), sondern unter kontrollierten Bedingungen in Reaktionsgefäßen ablaufen zu lassen. Die aus der Informationsvielfalt resultierenden Probleme sollen durch den Einsatz automatisierter Prozesstechnologien gelöst werden, z.B. auf der Basis mikrotechnischer Prinzipien. Wesentlichen Einfluß erwartet man sich dabei von der geeigneten Nutzung modernster Datenverarbeitungsverfahren. Aufgrund der hier zu erwartenden weiteren Fortschritte und der vielversprechenden Anwendungsmöglichkeiten wird die Gentechnik sicher zu den herausragenden Technologien des 21. Jahrhunderts gehören.

Januar 1999 Jürgen Kohlhoff

Bionik

Der Begriff Bionik charakterisiert ein interdisziplinäres Forschungsgebiet an der Schnittstelle von Biologie und Technik. Die Bionik hat das Ziel, aus biologischen Funktions-, Struktur- und Organisationsprinzipien Lösungsmöglichkeiten für technische Probleme abzuleiten.

Obwohl es auf den ersten Blick sehr viele Analogien zwischen Natur und Technik gibt, zeigt sich bei genauerer Analyse, daß eine direkte Kopie von natürlichen Objekten durch technische Mittel kaum möglich ist. Sie scheitert häufig schon daran, daß es sich bei biologischen Systemen in der Regel um individuelle Kompromißlösungen handelt, bei denen jeder Bestandteil in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen hinsichtlich Funktion, Material, Ort und Größenordnung einzigartig ist. Ein wesentlicher Grundsatz der Bionik ist daher auch nicht die möglichst genaue Imitation natürlicher Vorbilder, sondern das Verstehen und die technische Umsetzung der grundlegenden Prinzipien der durch die Evolution optimierten natürlichen Lösungen.

Ein heute schon fast als klassisch zu bezeichnendes Teilgebiet der Bionik befaßt sich mit strukturellen und mechanischen Aspekten. In dieser sog. Struktur- oder Konstruktionsbionik werden biologische Formen und Feinstrukturen auf Probleme der Architektur, des Bauwesens, des Fahrzeugbaus, der Feinwerktechnik und des Maschinenbaus übertragen. Die Konzepte in diesem Bereich basieren auf der Hypothese, daß biologische Systeme eine optimale Struktur haben, d.h. für die vorgesehene Funktion hat die Natur im Verlaufe der Evolution unter minimalem Materialaufwand einen sinnvollen Kompromiß hinsichtlich Stabilität und Oberflächengestaltung erreicht. Ein häufig genanntes Beispiel bionischer Strukturen sind große freitragende Kuppelhallen und Zeltdachkonstruktionen, die sich an pflanzlichen Vorbildern orientieren. Insbesondere aus wehrtechnischer Sicht interessant sind Flugzeug- und Schiffskörperumhüllungen, bei denen die strömungsoptimale Oberflächenstruktur bestimmter Tierhäute nachgebildet wird.

Eine große Rolle spielt die Übernahme biologischer Prinzipien im Bereich der Robotik. So orientieren sich aktuelle Konzepte von Laufmaschinen, die sich besonders gut zur Fortbewegung im unwegsamen Gelände eignen, an biologischen Vorbildern. Ein weiterer Schwerpunkt der sog. Biomechanik ist die Untersuchung des menschlichen Sinns für Kräfte beim Greifen und Zusammenfügen von Objekten. Die Bandbreite reicht hier von der Manipulation eines rohen Eies bis zur Handhabung eines Stahlstücks. Von der Übertragung der entsprechenden taktilen Fähigkeiten auf Automaten ist man allerdings noch weit entfernt.

Für die sog. Energiebionik stehen die Probleme der Wandlung und Speicherung von Energie im Vordergrund des Interesses. Schon seit langem bekannte Beispiele in der Natur finden sich in Form von Elektroaktivität bei Fischen oder beim aktiven Ausstrahlen von sichtbarem Licht durch verschiedene Tiere und niedere Pflanzen (Biolumineszenz). Obwohl es weitgehend gelungen ist, die diesen komplexen Phänomenen zugrundliegenden physikalischen und chemischen Basisprozesse zu verstehen, sind bis zur Übertragung der entsprechenden Prinzipien auf technische Systeme noch umfangreiche Forschungs-

arbeiten zu leisten. Dies gilt in besonderem Maße auch für die Photosynthese, d.h. die Umwandlung von Sonnenenergie in speicherbare Biomasse.

Den auch aus wehrtechnischer Sicht aktuellsten Zweig der bionischen Forschungen bildet die sog. Informationsbionik, häufig noch unterschieden in die Bereiche der Erfassung (Rezeptorbionik, Biosensorik) und der Speicherung und Verarbeitung von Informationen (Neurobionik, Biokybernetik). Für die enormen Fähigkeiten natürlicher Systeme im Umgang mit Informationen gibt es eine Vielzahl von Beispielen. So ist die Leistung des visuellen Systems des Menschen, das von der Aufnahme der Information im Linsensystem des Auges bis zur Bildverarbeitung im Gehirn reicht, auch durch modernste Bildverarbeitungssysteme noch nicht annähernd erreichbar. Ein großer Leistungsabstand zwischen natürlichen und technischen visuellen Systemen zeigt sich auch bei Insekten, wo es bisher nur erste Ansätze zum Nachbau des Facettenauges durch Multidetektoranordnungen gibt.

Von großem Interesse ist die Analyse und technische Nutzung von tierischen Sinnesleistungen, die häufig denen des Menschen weit überlegen sind. Es zeigt sich z.B., daß die erstaunliche Navigationsfähigkeit von Zugvögeln (Stare finden ihren Nistplatz nach dem Überwintern aus mehr als 1000 km Entfernung wieder) auf der sich ergänzenden, sehr redundanten Nutzung unterschiedlicher Sensorkanäle basiert (Erdmagnetfeld, Geruch der Landschaft, Anordnung der Sterne, Sonnenstand, Bildkorrelation in der Flugendphase).

In letzter Zeit haben die Anstrengungen zur Erforschung von Prozessen und Strukturen, die bei der Übertragung, Speicherung und Verarbeitung von Information auf neuronaler Ebene zu finden sind, stark zugenommen. So erweisen sich bereits heute die hochparallelen und -vernetzten Organisationsformen biologischer Informationsverarbeitungssysteme als konzeptbestimmend für die Architektur moderner Rechnersysteme (Neuronale Netze). Allerdings besteht hinsichtlich der Funktionsweise des Neurons als dem Basisbaustein aller Nervensysteme noch ein erheblicher Untersuchungsbedarf. Erst wenn hier grundlegende Ergebnisse vorliegen, werden sich „echte“ Neurocomputer realisieren lassen.

Trotz vieler erfolgreicher Anwendungsbeispiele dürften sich bionische Prinzipien für die Entwicklung technischer Systeme erst dann im großen Umfang durchsetzen, wenn viele noch offene Grundsatzprobleme zum Verständnis der biologischen Vorbilder geklärt sein werden. Hierzu gehören in erster Linie die theoretische Beschreibung und die rechnergestützte Simulation der Evolutionsstrategien, die zur optimalen Adaption an veränderte Umgebungsbedingungen führen. Wie für jedes sich dynamisch entwickelnde Forschungsgebiet gilt jedoch auch für die Bionik, daß sich erst bei der Untersuchung von solchen grundsätzlichen Fragen neue Ideen ergeben und Innovationen ableiten lassen.

Juli 1997 Thomas Kretschmer

Biomimetische Werkstoffe

Die permanente Auslese im Laufe der natürlichen Evolutionsprozesse hat dazu geführt, daß die heute auf der Erde existierenden Lebensformen Lösungen anbieten, die für bestimmte Funktionen und Umweltbedingungen als äußerst zweckmäßig bzw. sogar optimal anzusehen sind. Insbesondere im Werkstoffbereich gibt es eine Vielzahl von Beispielen für natürliche Konzepte, die hinsichtlich ihrer Eigenschaften jedem synthetischen Material überlegen sind. So handelt es sich z.B. bei Knochen um komplexe Faserverbundstrukturen, die aufgrund ihrer Bestandteile und ihres mikroskopischen Aufbaus hinsichtlich der für das jeweilige Lebewesen typischen mechanischen Belastungen optimiert sind.

Der direkte Einsatz von Naturwerkstoffen steht insbesondere aus Gründen der Umweltentlastung und Ressourcenschonung häufig im Vordergrund des öffentlichen Interesses. Ihr eigentliches technische Potential liegt jedoch in der indirekten Nutzung als Vorbild für neue synthetische Materialien und Strukturen. Dieser heute durch die Begriffe „Biomimetik" (engl. mimetic = nachahmend) oder „Bionik" (Wortschöpfung aus Biologie und Technik) charakterisierte Weg geht davon aus, biologische Systeme technisch nachzugestalten.

Auf den ersten Blick gibt es eine Vielzahl von potentiellen Kandidaten für die Übertragung natürlicher Lösungen auf technische Systeme. Allerdings zeigt sich häufig, daß eine direkte Kopie schon an der nicht möglichen Skalierbarkeit scheitert. Ein wesentlicher Grundsatz der modernen Bionik ist daher nicht die Herstellung möglichst genauer Kopien natürlicher Vorbilder, sondern das Verstehen der ihnen zugrundeliegenden Prinzipien, um zu technisch sinnvollen Nachahmungen zu kommen.

Ein aktuelles Thema der Werkstoffbionik ist die Analyse und Nachbildung des natürlichen Verbundwerkstoffes Holz. Er besteht aus spiralförmig gewundenen Zellulosefasern, die in eine Ligninmatrix eingebettet sind. Aus der Analyse der Strukturmechanik von Bäumen lassen sich gut verwendbare Erkenntnisse für die möglichst optimale Herstellung von Bauteilen aus faserverstärkten Verbundwerkstoffen ableiten. Der Holzfaserverlauf um einen eingewachsenen Ast stellt eine durch die Natur festigkeits- und gewichtsoptimierte Konstruktion dar, die als Vorbild zum Design von Bauteilen dienen kann. So kann man z.B. in Analogie zu natürlichen Wachstumsprozessen Objekte im Computer virtuell aufwachsen lassen.

Einen wesentlichen Schwerpunkt der Forschungsarbeiten der Werkstoffbionik bildet die Untersuchung und Nachbildung der molekularen Struktur von Naturwerkstoffen. Die hierfür erforderlichen systematischen Untersuchungen im molekularen Bereich erfordern die Anwendung der modernsten physikalischen und chemischen Analysemethoden.

Interessant ist, daß viele Organismen zur Herstellung natürlicher Strukturen mit hervorragenden mechanischen Eigenschaften (Gehäuse, Schalen, Panzer, Krallen, Zähne) mit den einfachen Ausgangsstoffen auskommen, die in ihrer Umgebung verfügbar sind. Aus Mineralien wie Kalziumkarbonat, Kalziumphosphat, Siliziumoxid oder Eisenoxid entstehen in komplexen Kristallisationsprozessen weitgehend fehlerfreie Verbundwerkstoffe.

Im Prinzip handelt es sich hier um Nanostrukturen, weil das Gefüge auf molekularer Ebene erzeugt wird.

Da die Natur auf biologischem Wege praktisch kaum homogene Materialien produziert, liegt das technologische Hauptpotential der Werkstoffbionik im Bereich der Verbundwerkstoffe. Hier bietet neben der Nachbildung natürlicher Strukturprinzipien insbesondere die Anwendung biomimetischer Prozeßtechnologien die Möglichkeit für neuartige Werkstoffkombinationen, die auf herkömmliche Weise bisher nicht herzustellen waren. Darüber hinaus bringt des Processing im molekularen Bereich auch eine Verbesserung der Eigenschaften konventioneller Materialien. Denkbar sind auch Mischstrategien, bei denen man biomimetische Mechanismen in den Herstellungsprozeß herkömmlicher Werkstoffe, z.B. Keramiken, integriert. So ist es auch möglich, Biomoleküle als Kerne für Kristallisationsprozesse zu benutzen.

Biologisch initiierte Prozesse laufen nahe bei Raumtemperatur ab und sind thermisch kaum zu beschleunigen. Daher sind die Geschwindigkeiten und Abscheideraten im allgemeinen sehr gering. Hier zeigt sich ein grundlegendes Problem der künstlichen Nachbildung biologischer Systeme und damit auch eine der Grenzen für die großtechnische Herstellung Biomimetischer Werkstoffe. Während die Zeit in der Natur nur eine untergeordnete Rolle spielt, ist sie für industrielle Produktionsprozesse ein wesentlicher Kostenfaktor. Das zukünftige Potential dieses neuen Werkstoffkonzeptes dürfte daher entscheidend davon abhängen, inwieweit bionische Synthesepfade unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu realisieren sind.

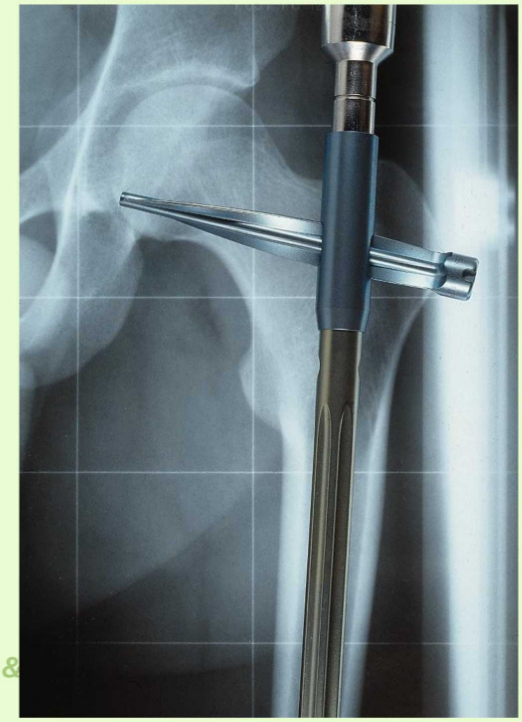
Wie in der gesamten Materialforschung findet auch in der Werkstoffbionik die Nutzung von nichtmechanischen funktionalen Eigenschaften immer größeres Interesse. Im Prinzip gibt es eine Fülle von physikalisch/chemischen Effekten in der Natur, die sich als Vorbilder für technische Systeme anbieten, wie z.B. die Elektroaktivität bei Fischen oder die Lumineszenz verschiedener Tiere und niederer Pflanzen. Häufig bevorzugt die Natur auch multifunktionale oder sogar "intelligente" Lösungen. Obwohl es bis heute meistens gelungen ist, die diesen komplexen Phänomenen zugrundeliegenden physikalischen und chemischen Basisprozesse theoretisch zu verstehen, sind bis zur praktischen Nachahmung dieser Prinzipien in Biomimetischen Werkstoffen noch umfangreiche Forschungsarbeiten zu leisten.

Mai 1996 Thomas Kretschmer

Leben & Natur



Natur
Leben & Natur
Leben & Natur
Leben & Natur
Leben & Natur
Leben &



Umwelt- und Medizintechnik

Biomonitoring

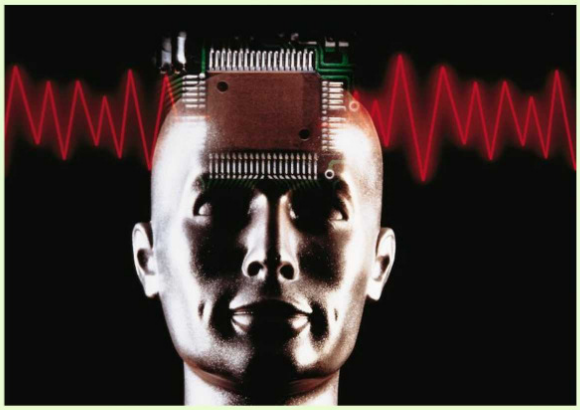
2009

2008

Gehirn-Computer-Schnittstelle

2007

Tissue Engineering



2006

2005

2004

2003

2002

Human Factors Engineering

2001

Werkstoff-Recycling

2000

1999

1998

Implantatmaterialien

Nachwachsende Werkstoffe

1997

1996

Biomonitoring

In der allgemeinsten Form lässt sich der Begriff „Biomonitoring" am besten mit „Bioüberwachung", d.h. Überwachung biologischer Systeme, übersetzen. In der Praxis steht er für die Anwendung einer Gruppe von Verfahren zur Bestimmung von Ablagerungen, die durch Schadstoffeinflüsse in Organismen auftreten können, und den sich daraus ergebenden Wirkungen. Eine herausragende Bedeutung hat das so genannte Human-Biomonitoring, bei dem die Untersuchung von menschlicher Körperflüssigkeit und von Gewebe zur Bestimmung der inneren Schadstoffbelastung im Vordergrund steht. Die hier eingesetzten Verfahren haben sich insbesondere in der Arbeitsmedizin zur wirksamen Überwachung der Beschäftigten und zur Entwicklung von Vorsorgestrategien sowie in der Umweltmedizin seit vielen Jahren etabliert.

Das Human-Biomonitoring hat sich zunächst überwiegend auf den reinen Nachweis von Schadstoffen und ihren Stoffwechselprodukten in biologischem Material, das so genannte Dosismonitoring, beschränkt. Heute gibt es jedoch darüber hinaus zunehmend die Möglichkeit, die messbaren Wirkungen der Schadstoffbelastung im Organismus zu registrieren und zu überwachen. Dieses so genannten Effektmonitoring berücksichtigt, dass viele Gefahrstoffe, insbesondere viele krebserregende Stoffe, erst im Organismus in biologisch wirksame Stoffwechselprodukte umgewandelt werden. Dabei handelt es sich häufig um besonders reaktionsfähige Moleküle, die nur in geringer Menge gebildet werden und aufgrund ihrer Reaktivität nicht direkt chemisch-analytisch nachweisbar sind. Allerdings lassen sich Reaktionsprodukte dieser Stoffe mit Proteinen und DNA indirekt als Maß für die lokal auftretende Konzentration dieser Moleküle bestimmen. Ein Beispiel aus der Praxis ist die Bestimmung von Reaktionsprodukten krebserregender Substanzen, wie z.B. aromatischer Amine oder Nitroverbindungen, mit dem Blutfarbstoff Hämoglobin.

Der wesentliche Vorteil des Effektmonitorings gegenüber dem Dosismonitoring besteht darin, dass durch die Berücksichtigung des Schädigungsprinzips besser auf die zu erwartende Wirkung eines inkorporierten Schadstoffes geschlossen werden kann. Allerdings ist beim Effektmonitoring die Spezifität für die nachzuweisenden Substanzen in der Regel geringer, da bei vielen Reaktionsprodukten nicht eindeutig feststellbar ist, welche Substanz den aufgetretenen Effekt verursacht hat.

Generell sind die Fortschritte im Bereich des Biomonitoring eng mit der Entwicklung der Analysetechnik verbunden. So ist es mit den gegenwärtig zur Verfügung stehenden Methoden der instrumentellen Analytik möglich, viele Schadstoffe bis in den Bereich umweltmedizinisch relevanter Konzentrationen zu erfassen. Das Spektrum der in Betracht kommenden Substanzen umfasst u.a. Metalle, organische Lösungsmittel, Pflanzenschutzmittel, aromatische Amine, Nitroverbindungen und Kohlenwasserstoffe. Es wird jedoch noch ständig erweitert. So fehlen z.B. heute noch für viele Pflanzenschutzmittel geeignete Methoden für ein Monitoring der inneren Belastung. In diesem Zusammenhang müssen auch vielfach Stoffwechselwege von Schadstoffen im Menschen erst noch aufgeklärt werden. Die Zielsetzung ist dabei, durch parallele Analyse einer Vielzahl von Stoffwechselprodukten diejenigen herauszufinden, bei denen ein besonders enger Zusammenhang mit dem Gesundheitsrisiko besteht. Neben geeigneten Stoffwechselpro-

dukten sollen bei entsprechenden Untersuchungen auch Unterschiede zwischen einzelnen Individuen hinsichtlich der Empfindlichkeit für bestimmte Schadstoffe aufgeklärt werden.

Der sehr dynamische technologische Fortschritt auf dem Gebiet der Mikrosystemtechnik hat zur Entwicklung von miniaturisierten, tragbaren bzw. sogar implantierbaren Biomonitoringsystemen geführt. Eine wichtige Rolle spielen hier die so genannten Biochips mit der Fähigkeit zum Nachweis einer großen Anzahl von biologischen und biochemischen Substanzen auf engstem Raum. In Verbindung mit Mikrofluidiksystemen, bei denen flüssige biologische Proben in mikroskaligen Kanälen, Pumpen und Reaktionsräumen bearbeitet werden, ergibt sich so zunehmend die Möglichkeit einer quantitativen Vor-Ort-Analyse. Darüber hinaus erlauben die Fortschritte bei der Leistungsfähigkeit von Mikrocontrollern und -prozessoren eine immer leistungsfähigere Signalanalyse bei gleichzeitiger Reduktion des Energieverbrauchs. Hierdurch ergibt sich wiederum die Möglichkeit der Integration von Elektronik direkt am Sensor. Um die Daten einzelner Sensoren zu verknüpfen oder in einer zentralen Einheit zu speichern und auszuwerten, werden heute vermehrt telemetrische Lösungen eingesetzt.

Zur Gewährleistung aussagekräftiger Ergebnisse werden an das Biomonitoring bereits heute hohe methodische Anforderungen gestellt. Dies gilt sowohl hinsichtlich der eingesetzten Analyseverfahren als auch der Auswahl des biologischen Probenmaterials und des Zeitpunkts der Probenentnahme. Vorraussetzung für eine weitere positive Entwicklung des Biomontoring ist vor allem die weitere Standardisierung und Vereinheitlichung der Verfahren, um eine möglichst gute Vergleichbarkeit von Analyseergebnissen zu gewährleisten.

Darüber hinaus gibt es in jüngster Zeit eine zunehmende Tendenz, die o.g. Definition des Begriffs Human-Biomonitoring auf die generelle Erfassung und Überwachung des physiologischen Zustands eines Individuums zu erweitern. In diesem Sinne wird z.B. auch die Überwachung des Blutzuckergehaltes mit Glukosesensoren oder der Herzströme mittels eines EKG-Monitors als Biomonitoring verstanden. Diese Erweiterung ist nicht zuletzt auf den Masseneinsatz von tragbaren Geräten zur Überwachung von Körperfunktionen zurückzuführen, der in den letzten Jahren u.a. durch die immer kostengünstigere Herstellung von mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) für Druck-, Dehnungs- und Beschleunigungssensoren sowie von Chemosensoren ermöglicht wurde.

Januar 2009 Roman Kernchen

Gehirn-Computer-Schnittstellen

Als Gehirn-Computer-Schnittstelle (engl. Brain-Computer-Interface = BCI) bezeichnet man die direkte Verbindung zwischen Gehirn und Rechner ohne Einschaltung weiterer Körperteile. Als Signalgeber werden derzeit entweder die elektrische Aktivität oder die lokal unterschiedliche Blutversorgung des Gehirns genutzt. Die entsprechenden Messsignale werden im Rechner mit Hilfe komplexer mathematischer Routinen analysiert und in Steuersignale umgewandelt. Ihre vorerst wichtigste Anwendung werden Gehirn-Computer-Schnittstellen in der Unterstützung körperlich schwer behinderter Menschen finden, z.B. als Kommunikationsmittel.

Die Auslegung von BCIs basiert darauf, dass schon die Vorstellung eines Verhaltens oder einer Körperbewegung in bestimmten Hirnregionen messbare Veränderungen der Hirnaktivität auslöst. Beispielsweise führt die Vorstellung, eine Hand oder einen Fuß zu bewegen, zur Aktivierung des für die bewusste Steuerung von Bewegungen zuständigen Gehirnareals (so genannter motorischer Kortex). In einem Trainingsprozess lernen sowohl Rechner als auch Mensch, welche Visualisierungen mit welchen Veränderungen der Hirnaktivität korreliert sind. Diese Information kann dann in Steuersignale für unterschiedliche Anwendungen umgewandelt werden. Eine einfache Signalvariante besteht z.B. darin, dass der Benutzer sich vorstellt, entweder die linke Hand oder den rechten Fuß zu bewegen. Diese Visualisierungen erzeugen an unterschiedlichen Stellen des Kortex Signale. Jüngere Forschungsergebnisse zeigen, dass auch die willentlich erzeugten Signale anderer Hirnareale als des motorischen Kortex, die überhaupt nicht mit der Bewegung von Körperteilen befasst sind, zur Steuerung einer Schnittstelle dienen können.

Gehirn-Computer-Schnittstellen können sowohl invasiv als auch nichtinvasiv ausgelegt sein. Im nichtinvasiven Fall werden sie ohne die Notwendigkeit eines chirurgischen Eingriffs auf die Kopfhaut aufgesetzt oder aufgelegt. Hierbei werden die mit der Gedankenaktivität einhergehenden elektrischen Signale oder die vom erhöhten Blutfluss verursachte lokale Temperaturerhöhung gemessen. Das direktere Signal ist das elektrische, da es unmittelbar zusammen mit der Gedankenaktivität auftritt. Die heute wichtigste Methode zu seiner Erfassung ist die Elektroenzephalographie (EEG), die in der medizinischen Diagnostik schon seit vielen Jahrzehnten eingesetzt wird. Die durch den erhöhten Stoffwechsel induzierte Wärmeerzeugung hingegen zeigt eine deutliche Zeitverzögerung zum auslösenden Denkprozess und ist daher weniger zur Steuerung von Technik geeignet.

Die Zahl der Befehle, die eine Gehirn-Computer-Schnittstelle zuverlässig unterscheiden kann, hängt wesentlich von der Qualität des Basissignals des Gehirns ab. Messungen auf der Kopfhaut haben prinzipiell eine nur sehr eingeschränkte Genauigkeit. Außerdem behindert hier das Hintergrundrauschen eine Signalauswertung deutlich. Seit einiger Zeit werden deshalb im Tier- und Menschenversuch auch invasive Schnittstellen erforscht. Hierbei handelt es sich um Elektroden, die unter der Schädeldecke in die Oberfläche der Hirnrinde eingepflanzt werden und dort dauerhaft verbleiben. Von den einzelnen Elektroden gehen Kabel zu einem Sammelstrang, der an einer unkritischen Stelle durch den

Schädelknochen ins Freie tritt und dort in einem Steckkontakt endet. Neuere Elektroden bündeln bis zu hundert Einzelnadeln auf einem etwa daumennagelgroßen Chip. Hierdurch wird eine viel genauere räumliche und zeitliche Auflösung von Gehirnsignalen und damit eine differenziertere Steuerung des Computers möglich. Dies wiederum erfordert vom Menschen eine sehr gut trainierte und disziplinierte gedankliche Steuerung. Derzeit werden von durchschnittlich trainierten Menschen mit einer Buchstabiermaschine etwa 15 Zeichen pro Minute geschrieben.

Für BCIs gibt es vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Hauptsächlich erforscht werden sie derzeit als Hilfsmittel für Menschen mit schweren körperlichen Behinderungen. Hierzu gehört insbesondere das so genannte Locked-In-Syndrom, bei dem die Kranken bei erhaltenem Bewusstsein meist vollständig unfähig sind, sich sprachlich oder durch Bewegungen verständlich zu machen. Eine weitere Möglichkeit ist die Behandlung von Patienten, die nach Schlaganfall oder Schädigung des Rückenmarks durch Unfall oder Erkrankung massive irreparable Bewegungs- und Artikulationseinschränkungen zeigen. In Verbindung mit einer Buchstabiermaschine können hier Gehirn-Computer-Schnittstellen eine Kommunikation mit der Außenwelt ermöglichen und sollen mittelfristig auch eine Basis für die Mobilität von Behinderten darstellen. So strebt man z.B. eine direkte Anbindung an Prothesen an, die von willentlichen Gedankenimpulsen gesteuert werden.

Bei fast allen bislang entwickelten BCIs ist die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine nur in einer Richtung möglich. So lernt der Mensch zwar, dem Rechner Kraft seiner Gedankenaktivität unterschiedliche Signale zu geben. Die Antwort des Computers wird bislang jedoch meist über konventionelle Sinnesorgane vermittelt, in der Regel als optische oder akustische Signale bzw. durch eine elektrische Reizung der Haut. Weitere Fortschritte erhofft man sich von einer direkten Rückkopplung einer Reizantwort über elektrische Impulse in das Gehirn. Allerdings wird derzeit davon ausgegangen, dass bis zu einer voll funktionsfähigen Zwei-Wege-Schnittstelle noch Jahrzehnte an Forschung zu investieren sind. So ist z.B. eine Vielzahl von biologischen wie mentalen Faktoren, die mit der Aktivität des Gehirns als Sender von Steuerimpulsen und Empfänger von Antwortsignalen zusammenhängen, weitgehend ungeklärt. Entsprechend dürfte auch die direkte Manipulation von Lebewesen mittelfristig sicher nicht zu realisieren sein, obwohl die rudimentäre Möglichkeit zur Fernsteuerung der Fortbewegung von Ratten (z.B. „gehe vorwärts“ oder „gehe zurück“) bereits erfolgreich umgesetzt wurde.

September 2007 Stefan Reschke

Tissue Engineering

Unter Tissue Engineering (die deutsche Umschreibung Zell- und Gewebetechnik ist wenig gebräuchlich) versteht man die Anwendung von ingenieur- und biowissenschaftlichen Prinzipien und Methoden zur Entwicklung von biologischem Gewebeersatz. Ziel ist die Wiederherstellung, Erhaltung oder Verbesserung der Organfunktionen von Lebewesen, insbesondere von Menschen. Im Prinzip versucht man, aus relativ kleinen Zellmengen dauerhaft funktionsfähiges Gewebematerial herzustellen, das defekte oder fehlende Gewebe- oder Organteile ersetzen kann. Am weitesten fortgeschritten ist dabei die Herstellung von lebendem Hautersatz für Patienten mit tiefen und großflächigen Hautdefekten. Aber auch die Herstellung von Knorpel- und Knochentransplantaten sowie von Ersatzgewebe für Herzklappen wird bereits erfolgreich praktiziert. Weitere Herausforderungen sind die Herstellung von Leberersatz zur Blutreinigung außerhalb des Körpers sowie die Entwicklung von Harnblasen- oder Nierenersatz. Obwohl es schon seit über 50 Jahren Methoden gibt, Zellen aus tierischem oder menschlichem Gewebe zu isolieren und unter Kulturbedingungen am Leben zu erhalten, haben erst die Möglichkeiten der modernen Zellbiologie zum derzeitigen Aufschwung dieses Technologiegebietes geführt.

Wesentliche Voraussetzung für das Tissue Engineering ist die Herstellung von Implantaten mit speziellen Eigenschaften, die im Körper wie selbstverständlich vorkommen, außerhalb des Organismus aber nur unvollständig geschaffen werden können. Erster Schritt ist hierbei in der Regel die Isolierung und Auswahl geeigneter Zellen aus kleinen Gewebeentnahmen. Diese werden in Zellkulturen unter Beibehaltung der physiologischen Bedingungen (z.B. Temperatur, Sauerstoffgehalt) in einem flüssigen Nährmedium in geeigneten Zuchtbehältern gehalten, um eine möglichst schnelle Zellvermehrung zu erreichen. Trotz der Bemühungen um naturnahe Lebensbedingungen verlieren jedoch die Zellen bei ihrer Kultivierung spezifische Eigenschaften. So zeigen z.B. kultivierte Leberzellen nach ihrer Isolierung nur noch einen Bruchteil ihrer ursprünglichen Entgiftungsleistung. Nach der Vermehrung werden die Zellen in einer flüssigen Lösung auf ein geeignetes Trägergerüst aufgebracht. Im Idealfall stammen die Zellen dabei vom Patienten selbst, um Abstoßungsreaktionen des Immunsystems nach ihrer Transplantation zu vermeiden. Sind genügend funktionsfähige Zellen auf diesem Gerüst ausgebildet und in das Gerüst eingewachsen, wird das entstandene künstliche Gewebe in den Patienten implantiert. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Entwicklung so genannter Leitschienen, die direkt implantiert werden und im Körper durch den entsprechenden Gewebetyp besiedelt werden können.

Von zentraler Bedeutung beim Tissue Engineering sind die Trägermaterialien, die den Zellen außerhalb des Organismus eine gewebetypische Umgebung bieten und den exakten Aufbau des Gewebes außerhalb des menschlichen Körpers unterstützen bzw. teilweise auch steuern sollen. Entsprechende Trägersubstanzen dürfen beim Patienten keine immunologische Abwehrreaktion auslösen. Idealerweise dienen sie der Anregung weiteren Wachstums und bleiben nur solange erhalten, bis sich die Zellen ein natürliches Trägergerüst geschaffen haben. Als synthetische Gerüstmaterialien wurden hier zunächst biologisch abbaubare Polyester favorisiert. Vom menschlichen Körper werden diese Sub-

stanzen in der Regel zwar gut vertragen, allerdings heften sich an ihrer Oberfläche Zellen schlecht an und sie werden nicht kontinuierlich abgebaut. Günstigere Eigenschaften zeigen hier z.B. synthetische wasserhaltige Gele, die in ihrer räumlichen Struktur der natürlichen Beschaffenheit des Raums zwischen den Gewebezellen ähneln.

Eines der wichtigsten Probleme des Tissue Engineering besteht in der Notwendigkeit einer schnellen und effizienten Blutversorgung des außerhalb des Organismus hergestellten lebenden Gewebeersatzes nach dessen Transplantation in den Körper. In der Regel ist ein solches Gewebe nicht mit Blutgefäßen umgeben, die nach der Verpflanzung seine Versorgung z.B. mit Nährstoffen oder Hormonen ermöglichen könnten. Während ihrer Züchtung wurde diese Versorgung durch ein umgebendes Kultivierungsmedium gewährleistet. Nach der Transplantation ist ein solches Gewebestück hingegen zunächst ausschließlich auf die Versorgung durch Diffusion von Nährstoffen aus der Umgebung angewiesen. Diese Diffusion reicht jedoch in der Regel nicht aus, um größere Gewebeteile zu versorgen. Daher versucht man derzeit, durch biochemische Stimulation ein beschleunigtes Einwachsen von Blutgefäßen in transplantiertes Gewebe zu erreichen.

Eng verbunden mit dem Tissue Engineering ist die so genannte Regenerative Medizin, wobei hierbei stärker die Unterstützung der natürlichen Heilungsprozesse durch Injektion von gezüchteten Zellen im Mittelpunkt steht. Beide Gebiete werden durch die Möglichkeiten der Verwendung von noch nicht spezialisierten Zellen des Körpers, den sogenannten Stammzellen geprägt. Theoretisch ist es möglich, im Labor aus embryonalen Stammzellen jeden gewünschten Zelltyp in größeren Mengen zu erzeugen. Neben den mit der Gewinnung embryonaler Stammzellen verbundenen ethischen Bedenken ist jedoch auch die Entschlüsselung der jeweiligen Bedingungen und Faktoren schwierig, die eine solche Zelle zu einer Herz-, Nerven-, Haut- oder Knorpelzelle werden lassen. Probleme ergeben sich zudem durch das große Potenzial von Zellteilung und Gewebewachstum embryonaler Stammzellen und der daraus resultierenden Tumorgefahr. Aber auch die Verwendung von Stammzellen bereits ausgewachsener Organismen (die so genannten adulten Stammzellen) zur Herstellung von Ersatzgewebe ist denkbar. Mit dem Einsatz von Stammzellen beim Tissue Engineering verbinden sich ehrgeizige Visionen. Beispiele sind die Züchtung unterschiedlichster Gewebe aus gleichen Ausgangszellen nach dem Baukastenprinzip oder die Herstellung komplexer Organe (z.B. Herz). Hierzu sind allerdings noch große Forschungsanstrengungen notwendig.

Juni 2006 Roman Kernchen

Human Factors Engineering

Der aus den USA stammende Begriff „Human Factors Engineering“ beschreibt einen derzeit stark an Bedeutung gewinnenden Wissenschaftszweig, der sich mit der Optimierung der Wechselwirkung zwischen technischen Systemen im weitesten Sinne und den diese bedienenden Menschen befaßt. Ziel ist ein Systemdesign, das sowohl das Fehlerpotential während des Betriebs als auch das Gefährdungsrisiko der Bediener möglichst gering hält. Gleichzeitig soll ein für den Nutzer ermüdungsarmes Arbeiten bei einem Optimum an Effizienz gewährleistet sein. Das in Frage kommende Anwendungsgebiet ist außerordentlich breit und reicht z.B. von der Gestaltung von Küchen-, Büro- und Produktionsarbeitsplätzen über Fahrzeugausstattungen bis hin zu multimedial erfahrbaren virtuellen Welten im Computer.

Sehr engen Bezug gibt es zwischen den Zielen und Methoden des Humans Factors Engineering und dem bereits seit über hundert Jahren in Europa entwickelten Forschungsansatz der Ergonomie bzw. Arbeitswissenschaft zur Strukturierung von Arbeitsabläufen und -umgebungen. Die Ergonomie entwickelte sich zunächst arbeitgeber- und damit leistungsorientiert zu einer Normierungsdisziplin für Bewegungs- und Zeitabläufe einschließlich der entsprechenden Optimierung des Arbeitsplatzes. Auch die sog. Anthropotechnik, bei der die Anpassung des Menschen an die Technik im Vordergrund steht, ist hier zu erwähnen.

Grundlage aller modernen Ansätze zur Untersuchung des Beziehungsgeflechts Mensch-Maschine sind die als Human Factors bezeichneten individuellen und kollektiven menschlichen Fähigkeiten und Eigenschaften. Hierzu gehören physische Charakteristika wie Körpergröße und -gewicht, physiologische Merkmale wie Kraft, Ausdauer oder Sehschärfe sowie psychologische Aspekte bzw. Verhaltenmuster. Auch spezielle kulturelle Prägungen sind gegebenenfalls einzubeziehen.

Die Erforschung all dieser Aspekte sowie deren Beeinflussung bzw. Formbarkeit durch Ausbildung und Training, aber z.B. auch durch Streßsituationen, bildet einen wesentlichen Bestandteil des Human Factors Engineering. Ein weiterer Untersuchungsgegenstand ist die Analyse der Verläßlichkeit des Menschen in Mensch-Maschine-Systemen. Besonderes Interesse gilt hierbei den Erscheinungen von Er- und Übermüdung mit ihren psycho-physiologischen Folgen, sowie deren Ursachen. Hierbei spielen viele individuell unterschiedlich ins Gewicht fallende Faktoren eine Rolle, wie beispielsweise seelisch-emotionale Tagesverfassung, Ernährung, Umgebungstemperatur und -lärm, aber auch körpereigener Stoffwechsel oder Lebensalter. Diese „weichen“ Faktoren sind signifikant für das Abweichen vom sog. Normverhalten und deshalb besonders wichtig.

Dieses Wissen um die menschlichen Faktoren nutzt man als Basis für den Entwurf fehlertoleranter technischer Systeme. In diesem Bereich liegt ein Schwerpunkt auf der Entwicklung geeigneter Mensch-Maschine-Schnittstellen. Die Bandbreite reicht hier beispielsweise von der ergonomischen Verbesserung einer Drehbank oder einfacher Ein- und Ausgabetools für Computer und Industriemaschinen bis hin zur Konzeption hochkomplexer multimedialer Mensch-Avionik-Schnittstellen in modernen Kampfflugzeugen.

Im Idealfall soll dadurch ein intuitives Verständnis für die Handhabung erreicht werden, was die Fehlerrate reduzieren hilft. Jedoch finden zunehmend auch nicht ganz so offensichtliche Aspekte wie z.B. die Wartungsfreundlichkeit eines technischen Systems Beachtung und schlagen sich im Design einfach aufgebauter und logisch strukturierter Systeme mit leichtem Zugang nieder.

Neben solchen stark durch Hardware bestimmten Gesichtspunkten spielt für weite Bereiche in der Anwendung computergestützter Systeme die sog. Software-Ergonomie eine maßgebliche Rolle. Diese beschäftigt sich disziplinübergreifend mit der benutzergerechten Gestaltung der Teile eines interaktiven computerbasierten Systems, die von Software gesteuert und an sog. Benutzungsoberflächen wirksam werden. Dabei nimmt derzeit die Informationsdarstellung auf Displays und ihre Manipulation durch Eingabegeräte in verschiedenen Interaktionsformen eine zentrale Rolle ein. Hinzu kommt die aufgabenangemessene bzw. -angepaßte sowie organisationsgerechte Auslegung der Interaktionsmöglichkeiten.

Die beiden relativ eigenständigen Gebiete Hard- und Software-Ergonomie wachsen, vor allem im Bereich der Hochtechnologien, zunehmend zusammen. Der schnelle Fortschritt in Informations- und Kommunikationstechnik erlaubt bereits heute diesbezüglich keine scharfe Unterscheidung mehr. Insbesondere im Bereich neuartiger multimedialer Schnittstellen, in denen Teile einer Mensch-Maschine-Schnittstelle von der Software simuliert werden, ist ein intensiver Überlapp zu erkennen. Diese Synthese initiiert derzeit ein neues Forschungsgebiet, das sich als „Ergonomie in der Virtuellen Realität" bezeichnen läßt.

Generell zeichnet sich ab, daß die zukünftige Forschung und Entwicklung im Bereich des Human Factors Engineering immer mehr auf Modellbildung und Simulation der menschlichen Faktoren, der geplanten technischen Umgebung des Menschen sowie dessen Interaktion mit ihr im Computer basieren wird. Dabei gewinnt die Modellierung des Verhaltens von einzelnen Menschen, Menschengruppen und Organisationen in unterschiedlichsten Situationen immer stärker an Bedeutung. Auch hier werden die bereits oben genannten „weichen" Faktoren eine zentrale Rolle spielen.

Februar 2001 Stefan Reschke

Werkstoff-Recycling

Die Verbesserung der Umweltverträglichkeit gehört heute zu den wichtigsten Zielen der Forschung und Entwicklung im Werkstoffbereich. Dabei orientiert sich die Bewertung ökologischer Auswirkungen zunehmend an dem übergeordneten Leitbild ganzheitlicher Ökobilanzen. Diese sollen, soweit das überhaupt möglich ist, alle Phasen des Werkstofflebens in die Beurteilung einbeziehen. Damit ist auch eine einseitige Betonung der Weiterverwertbarkeit zu vermeiden, da sie möglicherweise mit überproportionalen ökologischen Schäden bei der Herstellung oder während der Nutzung erkauft werden müßte.

Trotzdem bleiben Recycling-Aspekte in diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung. Hier gibt es verschiedene Verfahrensformen, welche die vorhandene Materialstruktur mehr oder weniger aufbrechen. Vom Prinzip her besonders interessant ist die direkte Wiederverwendung als Produkt oder Bauteil in einem neuen industriellen Erzeugnis. Diese scheitert jedoch bisher noch oft an Qualitätsproblemen oder an mangelnder Akzeptanz, z.B. aufgrund optischer Mängel. Unter rohstofflicher Verwertung versteht man die Wiederverwendung nach der Umwandlung in Grundstoffe, beispielsweise unter Einwirkung von Wärme, Druck oder zugeführten Reaktanden. Hier gibt es in der Praxis Probleme mit der Entsorgung der oft in großen Mengen anfallenden und nicht wieder nutzbaren Rückstände. Zu den Verwertungsstrategien im Kunststoffbereich gehört darüber hinaus auch das Energie-Recycling, eine am Energiegehalt des Polymers orientierte Weiterverwertung durch Verbrennen.

Von besonderem Interesse ist das sog. Werkstoff-Recycling, also die Weiterverwendung des Werkstoffes in neuen Produkten. Es steht vom benötigten Energieaufwand her im Prinzip zwischen dem Produkt- bzw. Bauteil- und dem Rohstoff-Recycling.

Im Bereich der klassischen Materialien gibt es vor allem bei Metallen und Gläsern bereits gut funktionierende Stoffkreisläufe. Keramiken spielen hier praktisch keine Rolle. Wesentliche Ursachen dafür sind ihre mangelnde Umformbarkeit auch bei hohen Temperaturen und ihre Resistenz gegen chemische Einflüsse. Außerdem eignen sie sich gerade aufgrund ihrer Inertheit besonders gut für eine Endlagerung. Auch Verbundwerkstoffe gelten wegen ihrer unterschiedlichen Komponenteneigenschaften immer noch als wenig recyclingfähig. Allerdings gibt es hier bereits eine Reihe erwähnenswerter Fortschritte, z.B. was die Verfahrenstechnik zur Auflösung der Werkstoffverbindungen oder die Weiterverwendung ohne eine solche Zerlegung angeht.

Im Mittelpunkt der Bemühungen stehen solche Werkstoffe, bei denen das Recycling noch deutliche Verbesserungspotentiale aufweist und gleichzeitig besondere wirtschaftliche Vorteile verspricht, also insbesondere Polymere. Hier sind in Zukunft spürbare Fortschritte zu erwarten, die im Sinne des „Material-Tailoring“ zu Werkstoffkonzepten führen, welche auf das Anforderungsprofil der Kreislauffähigkeit abgestimmt sind.

Dabei bieten die drei Kunststoff-Hauptgruppen Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere unterschiedliche Möglichkeiten. Thermoplaste lassen sich durch Einschmelzen umformen und können direkt wiederverwendet werden. Duroplaste dagegen sind in einer chemischen Reaktion zum Fertigprodukt ausgehärtet und können ebenso wie

Elastomere nicht eingeschmolzen werden. Ein wesentliches übergreifendes Problem ist darüber hinaus in der Vielfalt der eingesetzten Kunststofftypen zu sehen. Von besonderer Bedeutung für eine sinnvolle Weiterverwertung ist daher die Entwicklung geeigneter technischer Trennverfahren.

Verfahren, die für die Trennung Dichteunterschiede oder die unterschiedliche elektrostatische Aufladbarkeit der verschiedenen Kunststoffsorten nutzen, sind auf eine relativ enge Größenverteilung der zu trennenden Teilchen angewiesen, d.h. der eigentlichen Trennung muß ein Zerkleinerungsprozeß mit anschließender Reinigung und Trocknung vorgeschaltet werden.

Anders ist es bei echten Erkennungsprozessen, bei denen aufgrund spektroskopischer Eigenschaften, des Wärmeabsorptionsvermögens oder einer optisch-mechanischen Mustererkennung auf der Basis der äußeren Form eine Unterscheidung der verschiedenen Komponenten gelingt. Beispiele sind die Anwendung der Röntgenfluoreszenzanalyse (z.B. über Metalldotierung), der IR-Spektroskopie und der Massenspektroskopie in Kopplung mit der Pyrolyse. Hierdurch lassen sich größere Kunststoffteile sortenrein und ohne vorheriges Zerkleinern aussortieren. Allerdings genügt selten eine einzige Erkennungsmethode. Erst die Kombination verschiedener Analyseprinzipien erlaubt die nötige hohe Trennsicherheit.

Technische Grenzen des Recyclings ergeben sich in der Praxis aus der von Anwendungsstufe zu Anwendungsstufe zunehmenden Vermischung, Verschmutzung, Gefügeänderung, Alterung oder Ermüdung des Werkstoffes. Dazu kommen die unerwünschten Einflüsse durch nicht umwelt- oder recyclinggerechte Additive und Füllstoffe. Der Begriff des „Down-Cycling" oder auch der „Verwertungskaskade" kennzeichnet diesen Prozeß. Neben der Suche nach Folgeanwendungen, bei denen das benötigte Eigenschaftsspektrum nahe am Restwert des möglichst wenig verschlechterten Recyclats liegt, konzentrieren sich die Entwicklungsbemühungen heute jedoch auch auf das sog. „Up-Cycling", also eine gezielte Verbesserung der Recyclateigenschaften zur Sekundärnutzung auf höherem Niveau. Beispiele für solche Ansätze gibt es bei den Thermoplasten, z.B. durch gezielte Legierungsbildung oder Füllstoffbeimengung. Als Ergebnis sind Verbesserungen der Verarbeitbarkeit oder der Eigenschaften zu erwarten.

Januar 2000 Jürgen Kohlhoff

Nachwachsende Werkstoffe

Die Menschheit hat eine uralte Tradition in der direkten Nutzung nachwachsender Materialien wie Holz, Pflanzenfasern, Seide, Leder und Horn. Durch den zunehmenden Einsatz von Kohle und Erdöl als Basisrohstoff für die moderne Chemie wird die Bedeutung nachwachsender Roh- und Werkstoffe jedoch seit einigen Jahrzehnten zunehmend zurückgedrängt. Erst in letzter Zeit rückt insbesondere aus Gründen der Umweltentlastung und Ressourcenschonung die Nutzung von Naturstoffen wieder stärker in den Vordergrund des Interesses, da hier viele der üblichen Probleme bei der Herstellung und Entsorgung synthetischer Werkstoffe entfallen.

Nach wie vor weit verbreitet und vielseitig verwendbar ist der natürliche Verbundwerkstoff Holz. Er besteht im Prinzip aus spiralförmig gewundenen Zellulosefasern, die in eine Ligninmatrix eingebettet sind. Aufgrund der Unterschiedlichkeit der Holzarten und ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften gibt es für Holz ein breites Spektrum von Verwertungsmöglichkeiten. Für den direkten Einsatz von Massivholz als Werkstoff im Bauwesen und in der Möbelindustrie spielen in erster Linie die hervorragenden strukturellen Eigenschaften eine Rolle. Unverändert wichtig bleibt Holz als Ausgangsmaterial für eine Vielzahl von weiteren Leichtbauwerkstoffen wie Spanplatten, Faserplatten und Sperrholz.

Ganz neue Aspekte für die Nutzung von Holz könnten sich durch ein „Veredelungsverfahren" ergeben, das sich noch im frühen Forschungsstadium befindet. Hierbei wird ein Bauteil aus Holz schrittweise in eine Keramik überführt, bei völliger Beibehaltung der charakteristischen Porenstruktur der verwendeten Holzart. Durch Erhitzen des Werkstücks im Vakuum wird zunächst das Wasser ausgeschwitzt und anschließend die Holzstruktur pyrolysiert. Das verbleibende Kohlenstoff-Netzwerk wird dann in ein Bad aus heißer Siliziumschmelze getaucht. Es entsteht ein hochtemperaturfestes SiC-Keramik-Bauteil mit guten mechanischen Eigenschaften, das nicht mehr nachbearbeitet werden muß.

Eine seit langem genutzte Gruppe nachwachsender Werkstoffe sind die Pflanzenfasern. Insbesondere die Leinfaser (Flachs) war lange Zeit die bedeutendste Textilfaser und wurde erst durch leichter zu verarbeitende Materialien wie Baumwolle und Synthesefasern verdrängt. Erst in letzter Zeit ist aufgrund der spezifischen Trage- und Qualitätseigenschaften sowie des generellen Trends zu Naturprodukten wieder ein Ansteigen des Bedarfs an Textilien aus diesem Material zu beobachten.

Immer wichtiger werden die Anwendungen von natürlichen Werkstoffen im Bereich der technischen Fasern. So können Flachsfasern dort Vorteile bieten, wo der Werkstoff Hitze, Abrieb oder direktem Kontakt mit der Umwelt ausgesetzt ist. Damit sind Materialien wie Asbest oder Synthesefasern substituierbar, die unter gewissen Bedingungen gesundheitsgefährdend sind. Auch der Automobilbau ist ein interessantes Anwendungsfeld für Naturfasern. Hier werden bereits heute Formteile aus Flachs als Verkleidungsteile oder zur Schalldämmung eingesetzt.

Eine Reihe von aktuellen Entwicklungsarbeiten zur Verwendung natürlicher Fasern gibt es im Bereich der Verbundwerkstoffe. Manche Pflanzenfasern wie Hanf, Flachs, Chinaschilf oder Sisal haben durchaus das Potential, in Verbundwerkstoffen mit Glasfasern und bei manchen Anwendungen sogar mit Kohlenstoff- und Aramidfasern zu konkurrieren. Interessante Konzepte gehen von der Einbettung von Naturfasern in Matrices aus Biomasse aus. Hiermit werden bereits mechanische Kennwerte erreicht, die denen von Glasfaserverbundwerkstoffen nahekommen.

Im Prinzip handelt es sich bei Naturfasern selber um Verbundstrukturen aus Zellulose-Mikrofasern, eingebettet in Polysacchariden und Lignin. Ein Problem, das ihre Nutzungsmöglichkeit einschränkt, besteht in ihrer Wasserreaktivität, so daß es bei Wasseraufnahme zu einer starken Quellbeanspruchung der Matrix kommt.

Der natürliche Massenrohstoff Stärke bildet eine wichtige Komponente für eine Vielzahl von Industrieprodukten, vor allem in der Papier-, Textil- und Chemieindustrie. Im Werkstoffbereich gibt es seit einiger Zeit eine Reihe von Entwicklungen von Spezialpolymeren, die teilweise oder sogar fast vollständig auf Stärke basieren. Sie entsprechen in ihren physikalischen und mechanischen Eigenschaften weitgehend gebräuchlichen Massenkunststoffen wie Polyethylen, Polypropylen oder Polystyrol. Ihr wesentlicher Vorteil liegt jedoch in der Entsorgung, da sie kompostierbar oder schadstoffarm verbrennbar sind. In ihrer relativ geringen Resistenz gegenüber natürlichen Umwelteinflüssen und der dadurch bedingten beschränkten Lebensdauer liegt jedoch auch ein wesentlicher Nachteil dieser Werkstoffe, so daß sie in absehbarer Zukunft nur für spezielle Anwendungen insbesondere im Verpackungsbereich eine Rolle spielen dürften. Auch hinsichtlich der Produktionskosten sind auf nachwachsenden Rohstoffen basierende Polymere derzeit gegenüber herkömmlichen Kunststoffen noch nicht konkurrenzfähig.

Im Gegensatz zu den Strukturwerkstoffen befindet sich die technische Nutzung funktionaler Eigenschaften von natürlichen Substanzen noch weitgehend im Forschungsstadium. In der Regel sind hier die zugrundliegenden biologischen Mechanismen noch nicht hinreichend verstanden. Dennoch gibt es bereits eine Reihe von vielversprechenden Ergebnissen, wie z.B. die in den letzten Jahren gefundenen biologischen Makromoleküle, welche ggf. als optoelektronische Informationsspeicher eingesetzt werden können. Langfristig dürften insbesondere die Bereiche Sensorik und Elektronik von der Übernahme solcher nachwachsender Komponenten profitieren.

Derzeit noch schwer abzuschätzen ist die Bedeutung der Gentechnik für die weitere Entwicklung der nachwachsenden Werkstoffe. Hier dürfte wohl weniger die Schaffung vollkommen neuer Materialien im Vordergrund stehen als die Beschleunigung des Pflanzenwachstums oder die Anpassung pflanzlicher Inhaltsstoffe wie Öl, Fett, Stärke und Zellulose an die Erfordernisse der weiterverarbeitenden Industrie.

September 1997 Thomas Kretschmer

Implantatmaterialien

Zu den Implantatmaterialien zählt man alle Werkstoffe, die sich für den Einsatz innerhalb des menschlichen Körpers eignen. In Betracht kommen sowohl Polymere als auch Keramiken, Gläser, Metalle oder Verbundwerkstoffe. Trotz der beachtlichen Fortschritte bei der Transplantation natürlicher Körperbestandteile scheint die Bedeutung künstlicher Implantatmaterialien noch zu steigen. Gründe hierfür sind sowohl der Mangel an natürlichen Transplantaten als auch die mit deren Verwendung verbundenen immunologischen Schwierigkeiten.

Aufgrund ihrer komplexen Einsatzbedingungen und ihrer unmittelbaren Bedeutung für die Gesundheit des Menschen gehören die Implantatmaterialien zu den anspruchsvollsten Hochtechnologien im Bereich neuer Werkstoffe. Das gilt sowohl für ihre Entwicklung als auch für die Fertigung, die besonderen Anforderungen gerecht werden muß. Hier geht es vor allem um die genaue Einhaltung vorgegebener Prozeßparameter und die Kontrolle der Bauteile durch modernste Verfahren der Werkstoffprüfung.

Die Auswahl des jeweils geeigneten Werkstoffs wird neben der speziellen medizinischen Funktion stets durch die grundsätzliche Forderung nach Bioverträglichkeit bestimmt, d.h. die Wechselwirkung des Materials mit dem Empfängerorganismus muß untoxisch, steuerbar und vorbestimmbar sein. Über die mechanischen Eigenschaften hinaus sind also vor allem gewollte oder ungewollte Reaktionen mit der physiologischen Umgebung von Bedeutung. Hier unterscheidet man inerte Werkstoffe, die vom Immunsystem völlig ignoriert werden, von oberflächen- bzw. bioaktiven Materialien, die einen innigen Verbund mit der Umgebung eingehen, und resorbierbaren Werkstoffen, die durch den Stoffwechsel abbaubar sind.

Heute sind bereits für eine große Zahl von Anwendungen geeignete Implantatmaterialien verfügbar. Das Spektrum reicht von Augenlinsen, Herzklappen, Knochen, Zähnen, Bändern, Gewebe und Haut bis zu Arzneimittelspeichern oder Dosierungsimplantaten. Ein besonderer Bedarf besteht neben dem Ersatz von Knochen und der Fixierung von Knochenfrakturen auch im Bereich der künstlichen Gefäße sowie bei Kathedern mit langen Verweilzeiten. Für diese Anwendungen muß vor allem eine Gerinnungsreaktion des Blutes an der künstlichen Oberfläche vermieden werden. Eine Lösung kann hier die Beschichtung mit natürlichen Substanzen aus Gefäßwandzellen oder die Anlagerung ganzer Zellen auf der Oberfläche sein.

Ein weiterer wichtiger Bereich ist die Entwicklung von künstlichen Organen. Neben der Bioverträglichkeit sind hier spezifische Anforderungen zu erfüllen. So wäre z.B. für eine künstliche Bauchspeicheldrüse eine außerordentliche Korrosionsbeständigkeit des Materials erforderlich.

Zu den am weitesten verbreiteten Implantatwerkstoffen gehören heute Metallegierungen wie Chrom- und Kobaltstähle, Titan-Aluminium-Vanadium oder Chrom-Nickel. Zunehmend werden auch Keramiken verwendet, welche beispielsweise in Form von Aluminium- oder in neuerer Zeit Zirkoniumoxid für Zähne, Teile des Kiefers und des Schädels oder Hüft-, Knie-, Fuß- und Handgelenke eingesetzt werden. Zu den Vorteilen

der Implantate aus Keramik gehören ihre hohe Druckfestigkeit sowie ihre chemische Beständigkeit und toxikologische Unbedenklichkeit. Spezifische Probleme gibt es immer noch mit der Ermüdungsfestigkeit.

Besonderes Interesse gilt den bioaktiven Keramiken und Gläsern. Neben bestimmten Glaskeramiken sind hier z.B. Calciumphosphate von Bedeutung, die dem anorganischen Teil der Knochen ähneln. Sie können eine ausgezeichnete Bindung zum Knochen eingehen und werden als Oberflächenbeschichtungen für Implantate in der Orthopädie und Dentalchirurgie eingesetzt. Verbesserungswürdig ist ihre Haftung an Trägermaterialien aus Metallen oder Kunststoffen. Besondere Relevanz hat die Entwicklung von Verbundstrukturen aus bioaktiven Materialien für die knöcherne Verankerung mit inerten Werkstoffen z.B. für Schleimhautdurchführungen.

Bei der Verwendung von Polymeren für Implantate gibt es spezifische Probleme mit der notwendigen Sterilisation. Diese erwachsen sowohl aus der hohen Temperaturempfindlichkeit vieler Polymere als auch aus der Tatsache, daß Krankheitserreger einen prinzipiell ähnlichen makromolekularen Aufbau haben, der ja im Zuge der Desinfektion gerade zerstört werden soll.

Von besonderem Interesse sind resorbierbare Polymere für Systeme zur Arzneimitteldosierung oder für temporäre Implantate, deren Nutzung eine zweite Operation z.B. zur Entfernung eines Nagels überflüssig machen soll. Die wichtigsten organischen Werkstoffe für diesen Einsatz sind Glycolide und Lactide, die auf Milchsäuren bzw. Glycolsäuren basieren. Deren Abbauzeiten können durch Bildung geeigneter Copolymere individuell eingestellt werden. Sie reichen von wenigen Wochen bei Nahtmaterialien bis hin zu mehreren Monaten bei Implantaten für die Fixierung von Knochenbrüchen. Neben der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften z.B. durch Faserverstärkung oder geeignete Orientierung der Moleküle während des Fertigungsprozesses gelten die Bemühungen hier insbesondere weiteren Fortschritten bei der Steuerbarkeit des Abbaus.

Trotz aller bereits erzielten Erfolge gibt es viele Anwendungsmöglichkeiten, für die die geeigneten Implantatmaterialien bis heute fehlen. Hilfreich wäre z.B. die Einsetzbarkeit bestimmter elektrisch leitfähiger Polymere für implantierbare Biosensoren oder von Formgedächtnismaterialien für die Nutzung in der Chirurgie. Wichtige Lösungsansätze für die Qualifizierung dieser und anderer Werkstoffe verspricht man sich von neuen Erkenntnissen über die molekularen Grundlagen zellbiologischer Abläufe. Diese sollen den direkten Einbau organisch relevanter Substanzen in den Werkstoff ermöglichen und könnten damit zu entscheidenden Fortschritten bei der weiteren Entwicklung maßgeschneiderter Implantatmaterialien beitragen.

Juni 1997 Jürgen Kohlhoff

Wirtschaft & Gesellschaft



Gesellschaft

Wirtschaft & Gesellschaft

Wirtschaft & Gesellschaft

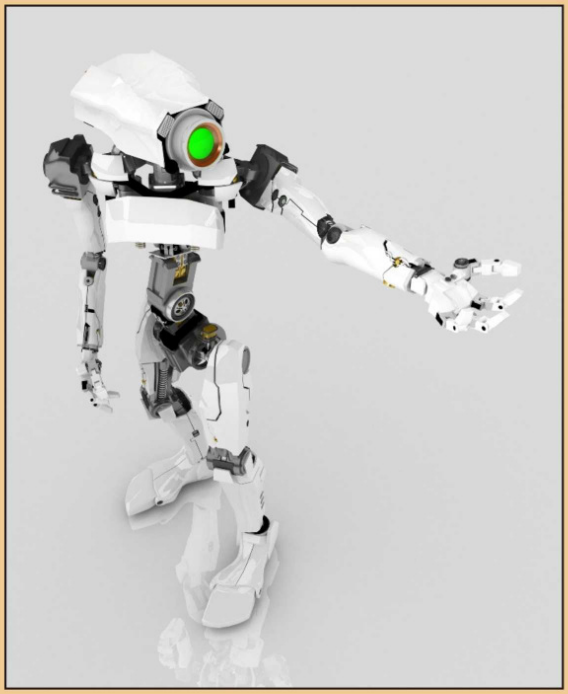


Wirtschaft

Wirtschaft & Gesellschaft

Produktion und Infrastruktur

Rettungsroboter	2009	
	2008	
	2007	Kleinstsatelliten
	2006	
	2005	
	2004	
Industrielle Logistik	2003	
	2002	
Serviceroboter	2001	
	2000	
	1999	
	1998	
Raumfahrttechnik	1997	Integrierte Verkehrskonzepte
Luftfahrttechnik		Schienen- und Straßenverkehrstechnik
Verkehrstechnik	1996	Produktion- und Managementtechnologien



Rettungsroboter

Der Begriff „Roboter“ ist in der Öffentlichkeit oft klischeehaft mit der Vorstellung von voll autonom, d.h. ohne menschliche Anleitung, handelnden künstlichen Wesen verknüpft. Diese so genannten Humanoide haben keine Ähnlichkeit mit den in der Regel statisch installierten Manipulatoren, die als Industrieroboter in industriellen Fertigungsprozessen bereits seit vielen Jahren zum Einsatz kommen. Zwischen diesen beiden Polen hat sich der Bereich der so genannten Serviceroboter in letzter Zeit zu einem außerordentlich dynamischen Gebiet entwickelt. Inzwischen gibt es eine Vielzahl von mehr oder weniger selbstständig agierenden Systemen in den unterschiedlichsten Anwendungen, wie z.B. Haushalt, Landwirtschaft und Medizin. Zu einem wichtigen Anwendungsfeld für Roboter hat sich in den letzten Jahren das Rettungswesen entwickelt.

Zur Rettung von Menschen kamen Roboter in größerem Umfang erstmals nach dem Attentat auf das WTC in New York im September 2001 zum Einsatz. Seither hat sich ihr Einsatzspektrum ständig erweitert. So helfen sie bei der Bergung von U-Boot-Besatzungen, dem Aufspüren von Waldbränden oder liefern Lagebilder von Unfallorten. Unbemannte Fluggeräte werden entwickelt, die dank ummantelter Rotoren auch innerhalb von Ortschaften starten und landen können, um Unfallopfer abzutransportieren. Auch gibt es Konzepte für Roboter mit Raupenfahrwerk und Greifarmen, die Verletzte aufnehmen und über schwieriges Terrain evakuieren sollen.

Bereits seit Jahren testen Universitäten im Rahmen eines internationalen Wettbewerbs (RoboCup Rescue) kompakte Roboterkonzepte, die speziell für die Suche nach verschütteten Personen entwickelt werden. Systeme für diese Aufgabe müssen eine Reihe spezifischer Fähigkeiten erfüllen. So müssen sie von einer Person tragbar sein und am Einsatzort durch enge Spalten passen, was ihre Größe und Gewicht auf die Dimension eines Staubsaugers begrenzt. Zugleich müssen sie autonom Hindernisse (Schutt, große Trümmerteile) überwinden und in Umgebungen mit Wänden, Treppen und zerstörtem Mobiliar manövrieren. Dies erklärt die oft exotisch anmutenden Fahrzeugkonzepte, die von adaptiven Ketten- und Radgeometrien bis hin zu einer weitgehend dynamischen Anpassung der Fahrzeugzelle gehen. So bestehen z.B. einige Exemplare aus schlangenähnlichen Modulketten von Raupenantrieben und überwinden engste Passagen und schroffeste Untergründe.

Eine wichtige Forderung bei Rettungsrobotern bildet die Standardisierung der Ausrüstung. So sollten zur Erzielung einer hohen Einsatzverfügbarkeit wichtige Systemkomponenten, wie z.B. Energieversorgung oder Sensorik, mit geringem Aufwand und bei laufendem System (hot plug) austauschbar sein. Weiterhin sollten die Systeme kälte- und hitzeresistent sein. So versagten z.B. wegen Überhitzung durch den von der Sonne aufgeheizten Erdboden eine Reihe der beim WTC-Einsatz benutzten Rettungsroboter. Auch Temperatursensoren sind unabdingbar. Sie dienen zusammen mit möglichen ABC-Sensoren zur Beurteilung der Situation im eingestürzten Gebäude.

Beim Sucheinsatz innerhalb von Trümmerhalden sind Rettungsroboter zur eigenen Positionsbestimmung und Routenaufzeichnung auf inertiale Navigationssysteme angewiesen,

da in der Regel die Nutzung von Satellitenavigation innerhalb geschlossener Räume nicht gewährleistet ist. Zur Hindernisvermeidung und zur Personensuche erfassen die Roboter ihre Umgebung mittels elektrooptischer Sensoren. Wärmeregistrierende IR-Kameras erlauben Fahrten in Dunkelheit oder bei reduzierter Sicht und erleichtern das Auffinden menschlicher Körper. Farbbild-Kameras erlauben es, an den durch Staub meist einheitlich grau eingefärbten Einsatzorten Erkennungsmerkmale wie rote Lippen, Hautpartien, aber auch Blut wahrnehmen zu können. Das dazu benötigte Licht wird zur Vermeidung von Explosionen durch Funkenschlag von LED-Lampen erzeugt. Ausgeklügelte Algorithmen zur Verarbeitung der Sensordaten in Echtzeit erreichen eine hohe Zuverlässigkeit bei der Identifikation von Menschen. So können z.B. selbst menschliche Gesichter zwischen Portrait-Fotos oder auch nur teilweise sichtbare Körper, bis hin zu einzelnen Fingerspitzen zwischen Möbelteilen, detektiert werden. Zusätzlich werden Mikrophone eingesetzt, um akustische Signale zu erfassen.

Wird ein Überlebender gefunden, kann eine erste Notration an Wasser und Nahrung, eventuell auch Wärme, aus einer Nutzlastbucht ausgegeben werden oder eine mitgeschleppte Zugangsleitung eine Notversorgung des Verschütteten bis zur Bergung sichern. Der Kontakt zum Opfer wird über eine bidirektionale Audioverbindung des Roboters hergestellt. Zur Aufrechterhaltung der drahtlosen Kommunikation innerhalb des kompakten Trümmerhaufens werden auf dem Weg ins Gebäudeinnere Funkverstärker abgesetzt. Die automatische Überwachung der Signalstärke verhindert, dass der Roboter außer Reichweite der Leitstelle gerät.

Ein wichtiger Punkt ist die generelle Herstellung von Kommunikationsverbindungen zwischen Robotern, deren Führungspersonal und den übrigen Rettungskräften. Hier zeichnen sich einerseits Lösungen in Form lokal beschränkter drahtloser Netzwerke (WLAN) durch unbemannte Flugsysteme ab. Zum Anderen gibt es Ansätze, die auf verstreut angebrachten RFID-Chips basieren. Solche nur wenige Millimeter große Chips beziehen ihre Energie bei Abfrage eines Senders aus dessen Radiowellen. Sie wurden in realitätsnahen Experimenten erfolgreich untersucht und kamen in vereinfachter Form bereits vor einigen Jahren bei Rettungseinsätzen nach dem Wirbelsturm Katrina in New Orleans zum Einsatz.

Generell kann festgestellt werden, dass aus technologischer Sicht dem Bau leistungsfähiger Rettungsroboter nur wenig entgegen steht. Die zukünftige Verfügbarkeit solcher Systeme bei Rettungseinsätzen hängt eher von Fragen der Organisation und Koordination der beteiligten Institutionen sowie der Bereitstellung der erforderlichen finanziellen Mittel ab.

September 2008 Guido Huppertz

Kleinstsatelliten

Die meisten heute verwendeten Satelliten (TV, Kommunikation, Navigation, Erdbeobachtung) wiegen mehrere Tonnen. Daneben gibt es eine Vielzahl kleinerer Systeme, die bei einer Masse unterhalb ca. einer halben Tonne als Minisatelliten (auch Klein- oder Kompaktsatelliten) und im Massenbereich von 10–100 kg als Mikrosatelliten bezeichnet werden. Eine relativ neue Entwicklungslinie bilden die so genannten Kleinstsatelliten mit Massen unter 10 kg. Diese weisen nicht mehr den in der klassischen Satellitentechnik üblichen Aufbau aus diskreten Subsystemen auf, sondern sind meist integriert konstruiert. Hier unterscheidet man generell zwischen Nano- (1–10 kg), Pico- (0,1–1 kg) und Femtosatelliten (unter 100 g). In jüngster Zeit wurden bereits mehrere Nano- und Picosatelliten erfolgreich gestartet. Sie werden meist von Universitäten betrieben und dienen überwiegend der Technologieentwicklung und -erprobung.

Die Realisierung solcher Kleinstsatelliten wurde erst durch die vielfältigen Fortschritte in der Mikrosystemtechnik und bei Leichtbau- und Funktionswerkstoffen möglich, die ihrerseits erheblich von der Dynamik der Nanotechnologie profitierten. Der standardisierte mikrosystemtechnische Aufbau wird hier zukünftig eine parallele Massenfertigung ermöglichen, was Kosten und Zeitbedarf für Entwicklung und Herstellung erheblich senkt. Auch der Start von Kleinstsatelliten in den Orbit ist äußerst preiswert. Im Allgemeinen werden sie als „Huckepack" solchen Missionen beigefügt, bei denen die Nutzlast der Rakete nicht voll ausschöpft wird. Im Prinzip kann aber auch eine größere Zahl von Kleinstsatelliten mit einer Trägerrakete gestartet werden.

Kleinstsatelliten ermöglichen wegen ihrer standardisierten Konstruktion sowie der geringeren Lebensdauer von allenfalls wenigen Jahren den schnelleren Einsatz neuer Technologien. Typischerweise ist ihre Elektronik moderner und leistungsfähiger, allerdings weniger gut getestet als die herkömmlicher Satelliten. Durch das große Oberfläche-Volumen-Verhältnis reicht bei einem Picosatelliten die Belegung der Gehäuseoberfläche mit Solarzellen zur Stromversorgung aus. Die Solarzellen dienen gleichzeitig als Strahlungsabschirmung.

Die Mikrosystemtechnik ermöglicht die Realisierung komplexer Funktionen durch Matrixanordnung einfacher Elemente. Die Steuer- und Ausleseelektronik kann gleichzeitig integriert hergestellt werden, was ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis sowie „intelligentere" Sensoren und Aktoren ergibt, die gleichzeitig kleiner und energiesparender ausgeführt werden können. Insgesamt sind viele Funktionalitäten auf dem gleichen Chip möglich. Außerdem stellt die Mikrosystemtechnik innovative Antriebstechnologien zur Verfügung, wie etwa Felder kleinster Einzelschuss-Treibladungen (digitale Düsen). Verschiedene Bahn- und Lageregelungsverfahren lassen sich masse- und energiesparend realisieren. Sehr effektive Hochfrequenzschalter und Mikrooptiken verbessern die Fähigkeiten bei Radaraufklärung und Kommunikation. Für den Bordrechner wird neben der Entwicklung strahlungs- und temperaturunempfindlicher mikrotechnischer Schaltungen auch der Einsatz von frei programmierbaren Logikschaltkreisen (FPGAs) untersucht, die ein Umkonfigurieren im Orbit und damit sogar eine Testmöglichkeit für unterschiedliche Software bieten. Neue Technologien in der Photovoltaik werden eine Erhöhung der der-

zeit noch recht geringen elektrischen Leistung ermöglichen. So entwickelt die NASA entfaltbare oder aufblasbare Strukturen aus einem mit integrierten flexiblen Dünnschichtsolarzellen und flexiblen Schaltkreisen beschichteten Kunststoff, der bei UV-Lichteinwirkung aushärtet. Die Struktur umschließt den Satelliten vollständig wie ein Ballon.

Langfristig könnte die Integration sogar so weit führen, dass „Siliziumsatelliten" entwickelt werden, bei denen Silizium als Strukturmaterial, zur Strahlungsabschirmung, als Material für die Thermalkontrolle und Optiken, als Substrat für Elektronik und Mikrosystemtechnik sowie (in der Form von porösem Silizium) als Treibstoff für den Antrieb dient. Letztlich könnte so eine Art „Satellite-on-a-Chip" möglich werden.

Aufgrund ihrer eingeschränkten Leistungsfähigkeit ist der Einsatz von Kleinstsatelliten am ehesten für Spezialaufgaben sinnvoll. Hier können sie den universeller einsetzbaren Großsatelliten durchaus überlegen sein, etwa durch ein optimales Blickfeld oder eine genauere Anpassung spektraler Kanäle an die Aufgabe. Auch sind durch den Start einer großen Anzahl von Kleinstsatelliten Konstellationen möglich, die sehr häufige Überflüge und damit eine hohe zeitliche Auflösung der gewonnenen Daten gestatten.

Für Aufklärung und Kommunikation kann die geringe Leistung von Kleinstsatelliten durch die Bildung von Satellitenschwärmen ausgeglichen werden, die als verteilte Antennen, also als „zweidimensionale Satelliten" mit großem Apertur-Masse-Verhältnis fungieren. Dabei wird daran gedacht, einen größeren Muttersatelliten mit einem Schwarm umgebender Pico- oder Femtosatelliten, ggf. durch Kabel verbunden, auszurüsten. Neben Erd- und Weltraumbeobachtung sowie Kommunikation entstehen darüberhinaus neue Aufgaben für Kleinstsatelliten, wie z.B. die Inspektion von Raumfahrzeugen im Orbit oder die Erprobung von Technologien und Bauteilen. Militärische Nutzer streben insbesondere die Fähigkeit an, Satelliten situationsabhängig schnell starten zu können, was sich mit Kleinstsatelliten möglicherweise realisieren lässt. Interessant ist weiterhin ihre schwere Entdeckbarkeit, insbesondere in höheren Umlaufbahnen, die im Prinzip verdeckte Weltraumoperationen ermöglicht.

Generell werden Kleinstsatelliten große Satelliten auch zukünftig nur teilweise ersetzen können. Es wird aber eine deutliche Zunahme ihres Leistungsvermögens erwartet, außerdem erschließen sie zusätzliche Weltraumnutzungsmöglichkeiten. Daher ist von ihrer Entwicklung ein weiterer Schub in der Bedeutung der Raumfahrt für unseren Alltag zu erwarten.

November 2006 Matthias Grüne

Industrielle Logistik

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht umfasst der Bereich der Logistik die marktorientierte Planung, Steuerung, Abwicklung und Kontrolle des gesamten Material- und Informationsflusses zwischen verschiedenen Unternehmen sowie innerhalb eines Unternehmens. Logistiksysteme haben die Grundaufgabe, die benötigten Objekte in den angeforderten Mengen in der richtigen Zusammensetzung zur richtigen Zeit am richtigen Ort bereitzustellen. Ein Kernelement der modernen Logistik bildet die so genannte Logistische Kette (Supply Chain), die vom Rohstoffproduzenten und Zulieferer über Hersteller, Spediteur und Händler bis zum Endverbraucher reicht. Ziel dieses ganzheitlichen Ansatzes ist die optimale Gestaltung von Planung, Organisation und Steuerung aller hierfür erforderlichen Strukturen und Prozesse.

In der industriellen Anwendung hat sich eine Reihe von Konzepten herausgebildet, die sich jeweils auf Teilbereiche der logistischen Kette beziehen. So besagt z.B. das Kanban-Prinzip, dass grundsätzlich alle Bestände, die bei der Produktion verbraucht werden, so schnell wie möglich ersetzt werden sollen. Das Quick-Response-Prinzip legt wiederum den Schwerpunkt auf die schnelle Reaktion der Produzenten auf Kundenbedürfnisse. Als herausragendes Konzept der jüngsten Vergangenheit gilt das Just-in-Time-Prinzip, welches als wesentliches Element der so genannten Lean Production insbesondere in der Automobilindustrie seit über zehn Jahren angewendet wird. Mit diesem Produktionsansatz konnte durch Dezentralisierung sowie Automatisierung des Materialflusses eine erhebliche Senkung des Zeit- und Kostenaufwandes in Entwicklung und Produktion erreicht werden.

Im Rahmen des Just-In-Time-Konzepts wird der Zuliefererprozess einer Produktion so optimiert, dass der richtige Baustein zur richtigen Zeit den Warenausgang einer Einheit der Logistikkette verlässt, um dann zum genau festgelegten Zeitpunkt am Wareneingang der nächsten Einheit zur Verfügung zu stehen. Die Objekte müssen nicht zwischengelagert werden und die Gesamtdurchlaufzeit minimiert sich. Daher kommt dem Transportsystem hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Flexibilität eine Schlüsselrolle zu.

Das ursprüngliche Just-In-Time-Konzept kann nur funktionieren, wenn der Produktionsprozess durch einen relativ gleichbleibenden Materialdurchsatz, geringe Umrüstzeiten der Produktionsanlagen sowie hohe Zuverlässigkeit bei den beteiligten Akteuren gekennzeichnet ist. Da es relativ starr und fehleranfällig ist, hat es in letzter Zeit an Bedeutung verloren. Heute versucht man zunehmend, die strenge Terminbindung aufzulockern und grössere Zeitpuffer einzubauen. Generell hat die Just-In-Time-Philosophie jedoch entscheidend dazu beigetragen, die Bedeutung des Faktors Zeit innerhalb der Steuerung von logistischen Prozessen bewusst zu machen.

Als das derzeit übergreifendste Konzept der Logistik gilt das so genannte Supply-Chain-Management (SCM). Es integriert die Planung, Simulation, Optimierung und Steuerung der Waren-, Informations- und Geldströme entlang der gesamten Wertschöpfungskette vom Rohstofflieferanten bis zum Endkunden. Damit werden sämtliche Aufgaben logistischer Koordination in einem einzigen Netzwerk zusammengefasst. Um dieses logistische

Netzwerk effizient zu steuern, wurde eine Vielzahl an Informationsverarbeitungs- und Kommunikationsinstrumentarien entwickelt. Hier gibt es einerseits die große Gruppe der so genannten Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme (PPS). Andererseits werden spezielle Optimierungswerkzeuge zur Lösung spezifischer Teilprobleme der Logistikkette sowie Simulationswerkzeuge, die eine vertiefte Analyse der Prozesse entlang der Lieferkette ermöglichen, entwickelt.

Bei den klassischen PPS handelt es sich zumeist um integrierte Softwarepakete, die einen zentralen Datenbestand verwalten, der allen Anwendern zur Verfügung steht. In hierarchisch gegliederter Form wird der gesamte Produktionsprozess von der Angebotsbearbeitung bis hin zum Versand erfasst. Die Systeme basieren auf genau festgelegten betriebswirtschaftlichen Kennzahlen, z.B. Mengenangaben der benötigten Teile, Zeitangaben wie Lieferzeit oder Plangrössen wie Kapazitätsauslastung der Fertigungsanlagen. Ein Nachteil der PPS liegt in ihrer streng hierarchischen Struktur, die auch bei kleinsten Änderungen z.B. bei den Produktionsbedingungen einen kompletten Neuentwurf erfordern. Nachteil ist auch, dass sie sich nicht an den tatsächlich aktuellen Zahlen, sondern an den Durchschnittswerten vergangener Abläufe orientieren.

Zur Überwindung der Defizite der PPS wurden in jüngster Zeit ergänzende Konzepte entwickelt, mit deren Hilfe sich komplexe logistische Planungsschritte besser an die realen Bedingungen anpassen lassen. Diese so genannten Advanced Planning Systems (APS) berücksichtigen aktuelle Absatz-, Kapazitäts- und Beschaffungsanforderungen und können sich darüber hinaus sogar auftretenden Engpasssituationen anpassen, indem sie Alternativlösungen bereithalten. Fällt z.B. ein Zulieferer aus, kann trotzdem ein Liefertermin festgelegt werden, da das System Daten über alternative Beschaffungsquellen vorhält und in den Planungsprozess einbeziehen kann.

Eine wesentliche Voraussetzung der APS ist die schnelle elektronische Übermittlung der aktuellen Kennzahlen zwischen den beteiligten Akteuren. Hier werden bis heute noch vielfach die klassischen betrieblichen EDI-Systeme (Electronic Data Interchange) eingesetzt. Diese haben den Nachteil, dass sie in der Regel nur für eine festgelegte Gruppe von Geschäftspartnern nutzbar sind und für neue Akteure erhebliche Investitionen in die technische Infrastruktur bedeuten können. Daher dürften sie zunehmend durch internetbasierte Kommunikationstechnologien ersetzt werden, die durch einheitliche Protokolle auf einfachem Wege den Datenaustausch zwischen verschiedenen Informationssystemen gewährleisten.

Generell gilt, dass die zunehmende Globalisierung der ökonomischen Strukturen und Prozesse immer stärker zur Vernetzung von Unternehmen einer Lieferkette über Landesgrenzen hinaus führen wird. Daher wird in den nächsten Jahren weltweit die Bedeutung der hierfür erforderlichen Logistikverfahren und -standards enorm wachsen. Dies gilt auch für den Bereich der militärischen Logistik, wo es bereits heute vielfältige Verflechtungen zwischen militärischen und industriellen Logistikketten gibt.

April 2003 Denise Köppen

Serviceroboter

Der Begriff „Roboter“ wurde in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts von einigen Science-Fiction-Autoren geprägt. Aus dieser Zeit stammt die heute immer noch überwiegende Vorstellung von künstlichen, aber menschenähnlichen Wesen. In der Praxis haben sich mit den seit über 50 Jahren kommerziell verfügbaren Industrierobotern jedoch zunächst Systeme durchgesetzt, die schon allein aufgrund ihrer Abmessungen und ihrer Ortsfestigkeit alles andere als menschenähnlich erscheinen. Während hier am Anfang einfache Handhabungssysteme z.B. zum Schweißen und Lackieren im Vordergrund standen, ist seit ungefähr 20 Jahren ein starker Trend zur Erweiterung des Einsatzgebietes in die Montage- und Bearbeitungstechnik hinein festzustellen. Auch mobilen Systemen für Transportaufgaben kommt eine steigende Bedeutung zu. Wesentliche Entwicklungsbemühungen zielen auf die Implementierung von Fernwartungs-Kapazitäten (Teleservice). Zur Zeit sind allein in Deutschland ungefähr 100 000 und damit deutlich mehr Industrieroboter im Einsatz als noch vor wenigen Jahren.

Neben den Weiterentwicklungen innerhalb des industriellen Produktionsbereiches wachsen Roboter inzwischen auch in neue Anwendungsgebiete hinein. Eine herausragende Rolle spielt dabei der Dienstleistungssektor, der weltweit seit Jahren ein im Vergleich zu anderen Wirtschaftszweigen überproportionales Wachstum aufweist. Hier stehen heute Systeme am Anfang ihrer praktischen Einsetzbarkeit, die den ursprünglichen Vorstellungen von menschenähnlichen Maschinen zum Teil wieder näher kommen. Bei diesen sog. Servicerobotern handelt es sich nach einer gängigen Definition um frei programmierbare Bewegungseinrichtungen, die teil- oder vollautomatisch Dienstleistungen verrichten. Sie dienen also nicht der industriellen Fertigung.

Einsatzmöglichkeiten für Serviceroboter werden in den verschiedensten Bereichen gesehen, von der Medizin und dem Strahlen- und Katastrophenschutz über das Baugewerbe und das Hotel- und Gastronomiewesen bis hin zu den Bereichen Haushalt, Hobby und Freizeit. Dort werden Maschinen benötigt, die mobil und auch für nichtrepetitive Funktionen in komplexen Einsatzsituationen geeignet sind.

Zunächst werden sich Serviceroboter für Tätigkeiten durchsetzen, die für Menschen schmutzig, schwer, gefährlich oder einfach nur unkomfortabel sind. So gibt es heute bereits Prototypen und erste Anwendungen für Reinigungsroboter (z.B. autonome Staubsauger), im Transportwesen, im Straßenbau, in der Wertstoffsortierung, für die Inspektion von Abwasserkanälen, in der Krankenpflege oder zur Unterstützung von chirurgischen Eingriffen. Mittelfristig sollten sie auch als Kofferträger in Hotels oder als multifunktionale Haushaltsgehilfen anzutreffen sein.

Eine wesentliche Randbedingung für die weitere Entwickung von Servicerobotern ist die Tatsache, daß für ihre Bedienung normalerweise keine spezialisierten Experten zur Verfügung stehen. Hinzu kommt, daß ihre Umwelt weniger klar definiert ist als für konventionelle Industrieroboter und sie daher viel autonomer handeln müssen. Dies gilt insbesondere für das Erkennen und Umgehen von Hindernissen. Neben den drei Basisfunktionen automatischer Systeme (Sensorik, Echtzeit-Informationsverarbeitung und Aktorik)

und der Mobilität wird für einen Serviceroboter also die Wissensverarbeitungs- und Lernfähigkeit zur bestimmenden Größe.

In Bezug auf die Fortbewegung gibt es praktikable Lösungsansätze, z.B. durch den Einsatz von Ketten- oder Radantrieben. Insbesondere für unebenes Gelände oder zum Besteigen geneigter Flächen bieten sich sog. Laufmaschinen an, möglicherweise versehen mit Saugnäpfen an den einzelnen Füßen. Deren Realisierbarkeit steigt mit den Fortschritten bei den verfügbaren Rechenleistungen und mit den neuen Erkenntnissen über die Steuerung komplexer Systeme. Erste Prototypen existieren bereits.

Größere Probleme gibt es mit der notwendigen Erhöhung des Autonomiegrades. Wesentliche Schlüsseltechnologien sind hier die Mustererkennung, die Datenverarbeitung in Echtzeit sowie Entscheidungsunterstützungsverfahren. Wirklich spektakuläre Durchbrüche hat es dabei in den letzten Jahren nicht gegeben, auch nicht in den zugrundeliegenden Informationstechnologien (z.B. Wissensbasierte Systeme, Neuronale Netze, Fuzzy-Systeme). Von grundlegender Bedeutung ist darüber hinaus die Weiterentwicklung sog. Weltmodelle, die dem Roboter erst die Interpretation der ihm zur Verfügung stehenden Umfeldinformationen ermöglichen. Wichtige Fortschritte erwartet man außerdem von den aktuellen Arbeiten auf den Gebieten der Sensorik und der Aktorik. Eine eigenständige Navigation auch über größere zurückgelegte Strecken hinweg kann durch die Kombination inertialer Systeme mit Satellitennavigation erreicht werden.

In verschiedenen Technologiebereichen gibt es dabei offensichtliche Parallelitäten zu militärischen Entwicklungen (z.B. Suchkopftechnologien) und speziell zur militärischen Robotik. Dort kommt allerdings als entscheidende Randbedingung noch hinzu, daß militärische Systeme in einer nichtkooperativen Umgebung arbeiten und als Spezialisten z.B. auf dem Gefechtsfeld für in der Regel noch schwierigere bzw. ganz anders geartete Aufgaben konzipiert werden müssen.

Für den zivilen Bereich gilt jedenfalls die allgemeine Einschätzung, daß es langfristig mehr Service- als klassische Industrieroboter geben wird. Wie weit diese Entwicklung tatsächlich geht, hängt neben technischen Randbedingungen vor allem von der Akzeptanz derartiger Systeme beim Verbraucher ab. Hier spielen nicht nur wirtschaftliche, sondern auch psychologische Aspekte eine nicht zu unterschätzende Rolle, z.B. das Sicherheitsbedürfnis des Menschen vor möglichen Fehlfunktionen. Aus technischer Sicht ist es jedenfalls nicht ausgeschlossen, daß in fernerer Zukunft in jedem Haushalt mindestens ein „Personal Robot" zur Grundausstattung gehört, so wie es heute mit dem „Personal Computer" schon fast der Fall ist.

Januar 2001 Jürgen Kohlhoff

Raumfahrttechnik

Die Entwicklungsdynamik der zivilen Raumfahrttechnik wurde seit Ende der fünfziger Jahre wesentlich durch den von nationalem Prestigedenken geprägten Wettbewerb zwischen den Großmächten bestimmt. Erst seit Ende des Kalten Krieges treten hier zunehmend die Aspekte des wissenschaftlichen und ökonomischen Nutzens in den Vordergrund. Insbesondere über Sinn und Zweck der mit sehr hohen Kosten verbundenen bemannten Weltraumfahrt wird seit einiger Zeit eine sehr kontroverse öffentliche Debatte geführt. Inzwischen ist es relativ unstrittig, daß bemannte Weltraummissionen im erdfernen Weltraum aus reinen Kosten-Nutzen-Überlegungen nicht zu begründen sind, sondern daß nur übergeordnete politische und kulturelle Motive als Begründung für zukünftige Weltraum-Großprojekte wie bemannte Mondstationen oder Marsmissionen herangezogen werden können. Selbst im erdnahen Bereich erzwingen die hohen Entwicklungs- und Betriebskosten der bemannten Raumfahrt die Konzentration auf einige wenige internationale Programme.

Neben den Planungen zu einer bemannten Marsmission und einer Reihe von extraterrestrischen Grundlagenprojekten, die Fragen der Entstehung, des Wesens und der Zukunft des Weltalls untersuchen, dient die Mehrzahl der derzeitigen Raumfahrtaktivitäten überwiegend zur Schaffung einer erdnahen Infrastruktur. Hier hat der Bereich der satellitengestützten Telekommunikation schon einen hohen Grad der Kommerzialisierung erreicht, der durch die ständig steigenden Marktbedürfnisse weiter zunehmen wird. Obwohl auch terrestrische Glasfasernetze an Bedeutung gewinnen werden, bieten Kommunikationssatelliten die inhärenten Vorteile einer schnellen Implementierung und hohen Flexibilität. Neben den herkömmlichen geostationären Systemen werden derzeit mehrere Konzepte für Kommunikationssatelliten in niedrigeren Umlaufbahnen (bis 2000 km) diskutiert bzw. stehen sogar kurz vor der Realisierung, auf deren Grundlage eine weltweite verzögerungsfreie mobile Sprachkommunikation mit Handgeräten möglich sein wird.

Eine immer bedeutendere Rolle mit hohem Wachstumspotential spielen die satellitengestützten Navigationsdienste. Hier ist inzwischen das ursprünglich für militärische Zwecke konzipierte, weltweit verfügbare amerikanische Global Positioning System (GPS) als gemeinsame Referenz für die Navigation von Land-, Luft- und Seefahrzeugen weit verbreitet.

Ein weiterer wichtiger Anwendungsbereich für erdnahe Satelliten ist die Überwachung, und Erforschung der terrestrischen Umwelt. Hier basiert die Datenerfassung bisher vorwiegend auf Einzelsatelliten für spezielle Missionen und hat nur in wenigen Teilgebieten, vor allem bei der Wettervorhersage, einen zufriedenstellenden Reifegrad erreicht. Zum Aufbau eines langfristig gesicherten und lückenlosen globalen Erdbeobachtungs- und Überwachungssystems ist noch eine Vielzahl von weiteren Beobachtungsplattformen erforderlich, deren Daten koordiniert aufbereitet, verarbeitet und ausgewertet werden müssen.

Noch weitgehend in den Anfängen steckt die Nutzung der speziellen physikalischen Bedingungen des Weltraums (z.B. Mikrogravitation, Vakuum) für wissenschaftliche und industrielle Zwecke. Die derzeitigen Experimente konzentrieren sich in erster Linie auf die Bereiche Materialwissenschaften, Physik der Flüssigkeiten sowie Biowissenschaften und sind vorwiegend der reinen und anwendungsorientierten Grundlagenforschung zuzuordnen. Eine nennenswerte Nutzung des Weltraums zur kostendeckenden Produktion von Industrieprodukten bzw. -vorprodukten ist derzeit nicht erkennbar.

Die Zukunft der Weltraumfahrt wird entscheidend von der Entwicklung der Kosten für Transportsysteme und Plattformen abhängen. Unter den Anbietern von Raumtransportern herrscht international ein harter Wettbewerb. Im Einsatz sind überwiegend mehrstufige Verlustraketen. Hinzu kommen für den Bereich der erdnahen bemannten Raumfahrt Systeme mit teilweise wiederverwendbaren Komponenten. Eine zweite Option, die bisher lediglich als theoretisches Konzept vorliegt, geht von wiederverwendbaren Raumtransportern aus, die von Flughäfen starten und landen können. Als Antrieb ist eine Kombination von luftatmenden Triebwerken und Raketentriebwerken vorgesehen. Bei Orbitalsystemen und Raumstationen führt die Entwicklung von den derzeit noch üblichen konventionellen „Wegwerflösungen“ zunehmend zu wartbaren, wiederbetankbaren, rekonfigurierbaren und erweiterbaren Systemen. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist die Fähigkeit zur Durchführung der notwendigen Manöver und Arbeiten im Orbit durch Menschen und Roboter.

August 1996 Thomas Kretschmer

Luftfahrttechnik

Aufgrund der extremen Leistungsanforderungen an Systeme und Bedienung gilt die Luftfahrttechnik schon seit langem als wesentlicher Träger des technologischen Fortschritts. Wichtige Innovationen sind hier durch die Schaffung der Voraussetzungen für eine effizientere Koordinierung des Luftverkehrs mit anderen Verkehrsmitteln und -systemen und für eine optimierte Einsatzplanung und -steuerung zu erwarten. So werden z.B., wie in anderen Bereichen der Verkehrstechnik auch, neuartige bzw. weiterentwickelte satellitengestützte Kommunikations- und Navigationsverfahren (z.B. Global Positioning System = GPS) eine große Rolle spielen.

Daneben gelten die Bemühungen vor allem der Weiterentwicklung der Luftfahrzeuge selbst. Sie zielen sowohl auf die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit als auch auf die Verringerung der Umweltbelastung durch Abgas und Lärm. Dabei dürfte die Entwicklung eher evolutionär verlaufen. Revolutionäre neue Konzepte wie Riesenflugzeuge mit einer Kapazität von bis zu 800 Personen, die z.B. eine nahezu rumpflose Flügelform haben könnten, werden heute wieder skeptischer beurteilt. Schwierigkeiten werden hier nicht nur in wirtschaftlicher, sondern auch in technischer Hinsicht gesehen.

Eine wichtige Rolle spielt die Senkung des Treibstoffverbrauchs, die in erster Linie durch die Verringerung der Strukturgewichte zu erreichen ist. Vielversprechend ist insbesondere die Verwendung von Aluminium-Lithium-Legierungen, die bei geringerem spezifischem Gewicht eine größere Festigkeit als andere Aluminium-Legierungen haben. Sie werden heute bereits an den Vorder- und Hinterkanten der Airbus-Typen 330 und 340 eingesetzt.

Daneben ist in Zukunft mit einer deutlichen Erhöhung des Anteils an faserverstärkten (insbesondere kohlenstoffaserverstärkten) Polymeren bei Verkehrsflugzeugen zu rechnen. Sie haben eine hohe Festigkeit pro Gewichtseinheit und sind durch Variation der Anzahl von Fasern und Schichten sowie der Faserausrichtung optimal an die jeweils auftretenden Lastverteilungen anzupassen.

Neue Werkstoffe werden auch eine wesentliche Rolle bei der Weiterentwicklung der Triebwerke für Luftfahrzeuge spielen, wo sie über eine Erhöhung der Einsatztemperaturen zur Steigerung der Wirkungsgrade und damit zur Verringerung des Treibstoffverbrauchs beitragen sollen. Hier denkt man vor allem an die Nutzbarmachung hochtemperaturfester Materialien wie Keramiken oder von kohlenstoffaserverstärktem Kohlenstoff. Demselben Zweck dienen konstuktive Maßnahmen wie die Erhöhung des Nebenstromverhältnisses in sog. High-Bypass-Triebwerken. In Propeller-Turbinen-Luftstrahltriebwerken ist die Nutzung prinzipiell hoher Nebenstromverhältnisse bereits seit langem Stand der Technik, die technischen Voraussetzungen für die Anwendung der Propeller für den Schnellflug im hohen Unterschallbereich bestehen allerdings erst seit einigen Jahren. Dazu wird heute eine neue Generation sog. Propfan-Triebwerke entwickelt.

Zukünftige Triebwerke werden außerdem eine größere Zahl von Komponenten mit einstellbarer bzw. variabler Geometrie haben, mit denen die Leistungsfähigkeit in verschie-

denen Einsatzsituationen oder Geschwindigkeitsbereichen optimiert werden kann. Entsprechende Maßnahmen können z.B regelbare Einspritzsysteme oder verstellbare Turbinen einschließen, aber auch neuartige Düsen für die Schubvektorsteuerung zur nichtaerodynamischen Lenkung.

Von wesentlicher Bedeutung für die Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Flugzeugen ist auch die Verringerung des Luftwiderstandes, der durch Reibung an den Oberflächen der Flügel entsteht. Die dafür verantwortlichen Turbulenzen könnten in Zukunft dadurch reduziert werden, daß man die Luft durch winzige Löcher absaugt oder die Strömung z.B. mittels mikroskopisch kleiner Klappen gezielt beeinflußt. Hier wird ein wichtiges Einsatzfeld der sog. Intelligenten Werkstoffe und Strukturen gesehen, welche durch die Integration von Sensor- und Aktorfunktionen in den Strukturwerkstoff charakterisiert sind.

Auch die zunehmend aerodynamisch instabile Auslegung der Flugzeugzellen führt zur Einsparung von Treibstoff. Daraus resultiert die Notwendigkeit zur künstlichen Stabilisierung durch aktive Flugsteuerung. Ermöglicht wird diese Entwicklung durch die verstärkte Computerunterstützung bei der Flugsteuerung und -regelung und durch die damit zusammenhängende Digitalisierung der avionischen Ausstattung. Der dadurch bedingten Steigerung der Komplexität und damit der Anforderungen an die Besatzung kann nur durch eine zunehmend intelligente Cockpitausstattung begegnet werden. Hier gibt es z.B. Überlegungen zu sog. Glascockpits, bei denen die gesamte Umgebung des Piloten als Display wirkt, einschließlich der Scheiben. Zur Steuerung primärer, d.h. flugrelevanter Funktionen sollen in Zukunft auch Spracheingabesysteme verwendet werden.

August 1996 Jürgen Kohlhoff

Schienen- und Straßenverkehrstechnik

Im Vergleich der verschiedenen Verkehrsmittel zu Land, zu Wasser und in der Luft hat in Deutschland der Schienen- und Straßenverkehr die bei weitem größte Bedeutung. Hier wurde die Entwicklung in den letzten Jahrzehnten wesentlich durch die geographischen und wirtschaftlichen Randbedingungen (z.B. hohes Aufkommen an Transitverkehr, dezentrale Wirtschaftsstruktur) geprägt. Als Folge verfügt Westdeutschland über ein dichtes Netz an Schienen- und Straßenfernverbindungen, die bisher allerdings vor allem in Nord-Süd-Richtung verlaufen. Die derzeitigen Planungen sehen vor, auch in Ostdeutschland eine entsprechend gute Schienen- und Straßeninfrastruktur zu schaffen. Schon aufgrund der dichten Besiedlung und der damit verbundenen Probleme ist damit zu rechnen, daß nach Befriedigung dieses Nachholbedarfs bis auf einige Ausnahmen kaum noch neue bodengebundene Verkehrswege erschlossen werden. Allerdings werden die bestehenden Trassen weiter ausgebaut, gegebenfalls werden sogar beide Verkehrsträger entlang einer gemeinsamen Trasse geführt.

Die derzeit aus technologischer Sicht dynamischste Entwicklung im bodengebundenen Fernverkehr gibt es im Bereich der Schienensysteme. Nachdem sich das Verkehrsmittel Bahn hinsichtlich Technik, Komfort und Effizienz über viele Jahrzehnte kaum verändert hat, gibt es in letzter Zeit eine Vielzahl von neuen innovativen Lösungen. Hier sind vor allem die zuerst in Japan und anschließend in einigen europäischen Staaten (Frankreich, Deutschland, Italien, Spanien) realisierten Hochgeschwindigkeitsverbindungen zu erwähnen, die je nach Ausbaustufe Geschwindigkeiten bis zu über 300 km/h erlauben. Für diese Systeme müssen mit enormen Anfangsinvestitionen völlig neue Trassen und spezielle Infrastruktureinrichtungen geschaffen werden. Wesentlich kostengünstiger sind Lösungen, bei denen sich auf modernisierten bestehenden Schienenwegen höhere Reisegeschwindigkeiten (bis zu 250 km/h) durch den Einsatz von sog. Neige-Zügen erreicht lassen. Trotz der vielen unterschiedlichen nationalen Entwicklungslinien in Europa gibt es eine Reihe von Bestrebungen, zumindest langfristig zu einem übergreifenden europäischen Hochgeschwindigkeitsnetz zu kommen. So werden z.B. die neuesten Triebwagengenerationen mit Antrieben ausgestattet, die auf die unterschiedlichen nationalen Stromsysteme umgestellt werden können.

Generell zeigt sich, daß die konventionelle Rad-Schiene-Technik noch ein beträchtliches Potential aufweist. Sogar Geschwindigkeiten bis zu 500 km/h werden prinzipiell noch für möglich gehalten. Damit steht sie zumindest für mittlere Entfernungen in direkter Konkurrenz zu den völlig neuartigen Konzepten, bei denen die Züge berührungslos über Schienen geführt werden. Hier ist neben Luftkissensystemen in erster Linie die Magnet-Schwebetechnik zu nennen, bei der das Fahrzeug von magnetischen Kräften angehoben, geführt und angetrieben wird. Da es völlig neue Bahntrassen erfordert, dürfte sich dieses Konzept vor allem für hochbelastete Verbindungen zwischen Ballungszentren als echte Alternative zu Mittelstrecken-Flugverbindungen eignen. Die weltweit einzigen protoypischen Entwicklungen für Magnet-Schwebebahnen gibt es derzeit in Japan und Deutschland. Für beide Varianten sind Mitte des nächsten Jahrzehnts erste Strecken geplant. Ein genereller Nachteil dieser Technik ist die fehlende Anbindung an die bestehenden Schie-

nensysteme, so daß es sich um „Insellösungen“ handelt. Auch für den Gütertransport kommt sie nicht in Betracht.

Eine wesentliche Belastung der Straßennetze insbesondere im Fernverkehr bildet der Gütertransport. Weitere starke Zuwachsraten werden prognostiziert. Da eine wesentliche Kapazitätserweiterung des schienengebundenen Güterfernverkehrs nicht realistisch ist, dürften hier in erster Linie organisatorische Maßnahmen wie integrierte Straßen-Schienen-Transportsysteme Abhilfe schaffen.

Die weitaus größten Anforderungen an die Verkehrsinfrastruktur gibt es in den Ballungsgebieten, wo insbesondere in den letzten Jahren der motorisierte Personen- und Güterverkehr sprunghaft zugenommen hat. Da auch hier kaum noch neue Straßen gebaut werden können, ist damit zu rechnen, daß insbesondere der relativ ineffiziente Individualverkehr durch administrative Maßnahmen zunehmend eingeschränkt wird. Dies setzt allerdings die Bereitstellung von leistungsfähigen Öffentlichen Nahverkehrssystemen sowie die geeignete Organisation der Schnittstellen zum Individualverkehr (Parkraum, Übergänge) voraus. Solche Konzepte werden derzeit vielerorts geplant bzw. erprobt.

Trotz der Renaissance des Schienenverkehrs dürfte das Kraftfahrzeug zum Transport von Personen und Gütern auf absehbare Zeit seine dominierende Stellung behaupten. Daher gibt es vielfältige Anstrengungen, den durch den starken Anstieg des Automobilbestandes erwachsenen Problemen für Umwelt, Sicherheit und Verkehrsfluß zu begegnen.

Die durch steigende Ozonwerte und Luftverschmutzung bestimmten Schadstoffgrenzwerte werden nur noch mit Maßnahmen wie Abgasrückführung und Partikelfilter erfüllbar sein. Im Vordergrund des derzeitigen Interesses steht eine weitere Absenkung des Kraftstoffverbrauchs und der Übergang auf nicht-fossile Antriebe. Hierzu kommen Techniken wie Direkteinspritzung, Stop-Start-Systeme und Verbrennungs-Elektromotor-Hybridsysteme in Betracht. Auch die Verwendung von Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium, Magnesium und Polymeren trägt zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs bei. Zur Lösung der Entsorgungsproblematik wird ein möglichst vollständiges Recycling der im Automobilbau verwendeten Werkstoffe angestrebt.

Zur Steigerung der Sicherheit im immer dichter werdenden Verkehr tragen sowohl fahrzeugtechnische Maßnahmen bei, wie z.B. Abstandssensoren, Airbags und erhöhter Seitenschutz, als auch die Verbesserung des Informationsangebotes für den Fahrer durch Navigationshilfen und elektronische Leitsysteme.

August 1996 Thomas Kretschmer

Integrierte Verkehrskonzepte

Gut ausgebaute und funktionsfähige Verkehrssysteme sind wesentliche Bestandteile moderner Industriegesellschaften. Die zunehmende Arbeitsteilung und der steigende Güteraustausch erzeugen nicht nur einen wachsenden Transportbedarf, sondern werden durch hinreichende Verkehrsangebote erst möglich. Entsprechend erhöhen die wachsenden Ansprüche der Bürger nach Mobilität einerseits die Anforderungen an die Verkehrssysteme und sind andererseits ein Resultat des Angebots an Verkehrsmitteln.

Bestimmt durch dieses Wechselspiel war in den modernen Industriestaaten die Entwicklung des Verkehrs in den letzten Jahrzehnten durch eine lange, relativ ungehemmte Wachstumsphase gekennzeichnet, bei der die verschiedenen Transportmittel in direkter Konkurrenz zueinander standen. Aufgrund seiner vielfältigen Vorteile insbesondere hinsichtlich der Befriedigung der Bedürfnisse nach Flexibilität und individueller Mobilität ist hier das Automobil zum dominierenden Verkehrsmittel geworden. Schon seit langem zeichnet sich ab, daß diese Entwicklung vor allem in Ballungsgebieten zu nicht mehr hinnehmbaren Belastungen von Bevölkerung und Umwelt führt, die nur mit neuartigen Verkehrskonzepten zu vermeiden sind. Radikallösungen wie die sog. Autofreie Stadt, die zunächst in vielen Analysen und Studien erwogen wurden, sind politisch kaum durchsetzbar und könnten schon aus Kostengründen höchstens sehr langfristig wirksam werden. Wesentlich realistischer erscheint eine Reihe von Maßnahmen, die unter dem Stichwort vom sog. Integrierten Verkehrskonzept eine aus ökonomischer und ökologischer Sicht vernünftige Aufgabenteilung zwischen den verschiedenen Verkehrsmitteln ermöglichen soll.

Grundvoraussetzung hierfür ist ein wesentlich verbessertes Angebot im Bereich der sog. kollektiven Verkehrsmittel, d.h. in erster Linie Bahn und Bus. Ein wichtiger Schritt ist dabei der weitere Ausbau des Fernstreckennetzes für Hochgeschwindigkeitszüge, die für mittlere Entfernungen hinsichtlich Zeitbedarf und Komfort sowohl dem Automobil als auch dem Flugzeug überlegen sind. Die derzeit laufenden Planungen gehen von einem europäischen Hochgeschwindigkeitsnetz aus, durch das zumindest alle zentraleuropäischen Metropolen und Ballungszentren mit Reisegeschwindigkeiten bis zu 300 km/h verbunden werden. Darüber hinaus gibt es eine Reihe von Projekten, durch geeignete Ausstattung und Fahrplangestaltung die Bahn als rollendes Hotel zu präsentieren und so z.B. wieder für Über-Nacht-Reisen attraktiver zu machen.

Das Angebot der öffentlichen Nah- und Regionalverkehrsnetze hat sich in Deutschland in den letzten Jahren durch die Einführung einer Reihe großflächiger Verkehrsverbünde deutlich verbessert. Die meisten Großstädte und Ballungszentren verfügen inzwischen über ein relativ gut ausgebautes Schienenverkehrsnetz. Während über viele Jahre der Bau von eisenbahnähnlichen U- und S-Bahnsystemen mit eigenem Gleiskörper dominierte, gibt es in letzter Zeit eine gewisse Tendenz zu straßenbahnähnlichen Lösungen, für die deutlich geringere Investitionsmittel erforderlich sind.

Einen wesentlichen Nachholbedarf hat der Öffentliche Nah- und Regionalverkehr allerdings im Hinblick auf Komfort und Kundenfreundlichkeit. Hier kommt zukünftig insbe-

sondere der Gestaltung des Übergangs zwischen Individual- und Kollektivverkehr am Rande der Ballungsgebiete eine große Rolle zu. So gibt es Konzepte für neuartige Parksysteme, bei denen der Fahrer sein Fahrzeug an ein vollautomatisches System übergibt und nichts mehr mit dem eigentlichen Parkvorgang zu tun hat. Auch an die geeignete Ausstattung dieser Park&Ride-Bereiche mit Infrastruktureinrichtungen (Geschäfte, Restaurants) wird gedacht.

Im Bereich des Güterfernverkehrs erweisen sich Schienensysteme schon seit langem für feste Punkt-Punkt-Verbindungen, wie sie z.B. zwischen verschiedenen Standorten von Firmen bestehen, dem Transport auf der Straße überlegen. Das Haupthindernis für eine verstärkte Nutzung der Schiene für den Transport von Gütern über mittlere und große Entfernungen ist der relativ große Aufwand für das Sortieren (Rangieren) und die Bündelung (Zugbildung). Hier gibt es inzwischen innovative Konzepte, die den Güterverkehr auf der Straße und der Schiene möglichst intelligent und kooperativ verknüpfen. Gedacht wird z.B. an ein Netz aus Güterverteilzentren, die als zentrale Anlaufstelle des LKW-Verkehrs innerhalb einer Region fungieren und über gut ausgebaute Schienenwege verbunden sind. Die möglichst optimale Sortierung und Bündelung der Güterströme erreicht man durch den Einsatz von intelligenten Verkehrsleit- und Flottenmanagement-Systemen, die jedes einzelne Kraftfahrzeug zum richtigen Zeitpunkt in das Verteilzentrum lotsen. Ein weiteres Konzept, das speziell für den Stückguttransport innerhalb von Ballungsgebieten interessant ist, geht von Schienen-Ringverbindungen aus, die von in kurzen Abständen verkehrenden Zügen bedient werden. An den Haltepunkten eines solchen Logistiksystems können Container auf- und abgeladen werden, wiederum gesteuert durch ein geeignetes Computersystem.

Aus technologischer Sicht könnten solche Konzepte durchaus kurzfristig realisiert werden, da im Bereich des straßengebundenen Gütertransportes der Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnologien schon relativ weit fortgeschritten ist. Hierzu zählen Maßnahmen wie die computergestützte Erfassung der relevanten Daten, die Echtzeit-Kommunikation mit einer Flottenzentrale oder der Einsatz von Satellitennavigation.

Wesentlich weiter von der Realisierung entfernt sind Verkehrsmanagementsysteme für den Personenindividualverkehr. Hier dürfte auf absehbare Zeit das Schwergewicht weniger bei zentralistischen Lösungen zur Steuerung der einzelnen Fahrzeuge als bei der Unterstützung des einzelnen Fahrers mit geeigneten Informationen über die Verkehrslage liegen. Lediglich bei der Parkplatzsuche, die speziell in Innenstädten einen Großteil des Gesamtverkehrs ausmacht, bieten sich zentrale Verkehrsleitsysteme an.

August 1996 Thomas Kretschmer

Verkehrstechnik

Das Streben nach Mobilität gehört zu den Grundbedürfnissen des modernen Menschen. Darüber hinaus bildet die zum Transport von Personen und Gütern erforderliche Infrastruktur eine wesentliche Basis jeder Industriegesellschaft. Daher gehört die Entwicklung effizienter Verkehrs- und Logistiksysteme zu den wichtigsten gesellschaftlichen und technischen Zukunftsaufgaben.

Bis in die jüngste Vergangenheit ist es oft zu einem Verdrängungswettbewerb zwischen den Hauptverkehrsträgern Kraft-, Schienen-, Luft- und Wasserfahrzeug gekommen, der häufig zu Lasten der Umwelt gegangen ist. Erst in in letzter Zeit setzt sich immer mehr die Erkenntnis durch, daß eine sinnvolle Koordination und optimale logistische Verknüpfung der Verkehrsmittel notwendig ist. Ein solches umfassendes Verkehrssystem der Zukunft reicht vom Individualverkehr im Pkw, über den öffentlichen Personenverkehr im Nah- und Fernbereich auf Schiene und Straße sowie durch Flugzeug und Schiff bis hin zum Gütertransport zu Lande, zu Wasser und in der Luft.

Eine wichtige technologische Voraussetzung für diese Entwicklung ist die breite Einführung von Elektronik und Informationstechnik auf allen Ebenen der Verkehrstechnik. Wie schon im Bereich der Luftfahrt, die hier eine Vorreiterrolle gespielt hat, setzt sich der Trend zur durchgehenden Elektronisierung von Regel-, Steuer- und Bedienungsfunktionen in den Fahrzeugen fort. Speziell im Bereich der Landfahrzeuge (in erster Linie Straße, aber auch Schiene) wird die elektronische Ausstattung der Fahrzeuge in ihrer Komplexität der modernen Avionik immer ähnlicher. Eine gewisse Analogie zum modernen Luftverkehr zeigt sich auch bei der informationstechnischen Ausstattung des Landverkehrs. Insbesondere für den Straßenverkehr wird weltweit derzeit eine Vielzahl von rechnergestützten Verkehrsleit-, Fahrerinformations- und Fahrzeuglenksystemen entwickelt und realisiert. Neben der in vielen Jahren gewachsenen Verkehrswegeinfrastruktur, die in vielen Bereichen bereits überlastet ist, dürfte sich damit zumindest mittelfristig eine Informationsinfrastruktur für den Straßenverkehr etablieren, die noch eine gewisse Kapazitätserweiterung der vorhandenen Straßennetze ermöglicht. Langfristig kommt allerdings schon aus ökologischen Gründen nur eine vernünftige Aufgabenteilung der verschiedenen Verkehrsträger in Betracht.

Hierbei dürfte auch auf absehbare Zeit das Auto für die meisten individuellen Verkehrsaufgaben dominieren. Seine Stärken reichen von der Punkt-Punkt-Verbindung, über den individuellen Fahrplan und den großen Aktionsradius bis zur Erfüllung des emotionalen Fahrvergnügens. Obwohl auch für konventionelle Verbrennungsmotoren noch ein beträchtliches Potential zur Verbesserung von Effizienz und Schadstoffemission vorliegt, hängt die sehr langfristige Zukunft dieses Verkehrsmittels schon aus ökologischen Gründen unmittelbar von der Entwicklung und Einführung neuer Antriebskonzepte ab, die sich zumindestens teilweise auf der Nutzung elektrischer Energie abstützen.

Als das optimale Verkehrsmittel zum Transport vieler Menschen und großer Gütermengen auf definierten Punkt-Punkt-Verbindungen gilt die Eisenbahn. Während ihre Leistungsfähigkeit in der Vergangenheit stark durch die Antriebskraft (zunächst Dampfma-

schine, dann Elektromotor) bestimmt war, stehen heute Aspekte der Laufdynamik, Energiemanagement und Automatisierung im Vordergrund. Durch die Entwicklung und Realisierung einer Vielzahl innovativer Lösungen, wie z.B. Hochgeschwindigkeitszüge, Neigetechnik, Magnet-Schwebesysteme oder fahrerlose Züge erlebt die Bahn derzeit weltweit eine Renaissance. Auch kombinierte Schienen-Straßen-Konzepte werden diskutiert, wie z.B. Dual-Mode-Fahrzeuge für Bahn- und Busbetrieb.

Die Entwicklung im Bereich des Schiffsverkehrs ist durch neue Systemkonzepte geprägt, die unter Begriffen wie „Schiff der Zukunft", „Intelligentes Schiff" oder „Techno-Superliner", eine Vielzahl von innovativen Lösungen im Schiffbau zusammenfassen. Sowohl neue Schiffsformen, wie z.B. Oberflächeneffekt-Fahrzeuge, als auch neue (elektrische) Antriebe sind möglich.

Der Bereich der Luftfahrt gilt aufgrund der extremen Leistungsanforderungen an Systeme und Bedienung schon immer als Spitzentechnik und wird diese Stellung auch zukünftig behalten. Hier gewinnen ökologische Gesichtspunkte zunehmend an Bedeutung, so daß die Suche nach leistungsfähigen Triebwerken mit günstigem Treibstoffverbrauch und geringer Schadstoffemission einen wesentlichen Schwerpunkt der Entwicklungsanstrengungen ausmacht. Auch die Verbesserung der aerodynamischen Eigenschaften und die Verwendung neuer Leichtbauwerkstoffe für die Flugzeugzellen dienen in erster Linie diesem Ziel.

August 1996 Thomas Kretschmer

Produktions- und Managementtechnologien

Die Produktions- und Managementtechnik umfaßt die Entwicklung und Anwendung der grundlegenden Verfahren und Technologien, die im Zusammenhang mit den verschiedenen an der Produktherstellung beteiligten industriellen Funktionsbereichen stehen. Hierzu gehören in erster Linie die Bereiche Entwurf, Fertigung, Logistik und Qualitätskontrolle. Aber auch übergeordnete Managementfragen sowie Aspekte der betrieblichen Organisation spielen eine Rolle.

Seit den achtziger Jahren konzentriert sich ein großer Teil der Anstrengungen in der Industrie darauf, den gesamten Produktherstellungsprozeß möglichst optimal zu gestalten, um auf diese Weise die Investitionen in die teuren Produktionsanlagen besser nutzen zu können und die Auswirkungen auf die Umwelt möglichst gering zu halten. Wichtige übergeordnete Ziele sind dabei ein hoher Qualitätsstandard der Produkte, die Einsparung von Energie und Rohstoff, eine Verkürzung von Durchlaufzeiten sowie die Flexibilisierung der Fertigungsprozesse.

Der aus technologischer Sicht herausragende Trend der Produktions-und Managementtechnik ist die zunehmende Automatisierung der Abläufe durch den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien. So gehört bereits heute die Rechnerunterstützung bei der Konstruktion (CAD), Fertigung (CAM) und Qualitätskontrolle (CAQ) zum Stand der Technik für moderne Produktionssysteme.

Die ferne Zukunft wird häufig durch den Begriff der rechnerintegrierten Fertigung (CIM) charakterisiert. Dies bedeutet, daß die gesamte Fabrik, d.h. Konstruktion, Fertigung und Verwaltung, zu einer Funktionseinheit verbunden wird. Aufgrund der komplexen Systemzusammenhänge stehen allerdings hierfür ganzheitliche Lösungsansätze noch aus, so daß die Realisierung des CIM-Konzepts heute zunehmend skeptisch beurteilt wird. Sie dürfte sich, falls überhaupt, in evolutionären Schritten vollziehen.

Zunächst führt der Einsatz von CAD/CAM zu vollständigen Fertigungszellen, welche die Ausführung einer bestimmten Zahl von Operationen erlauben. Der nächste Schritt besteht darin, mehrere derartige Fertigungszellen zu verbinden. Dies bedeutet, daß die Beförderungssysteme zwischen den Zellen sowie die Versorgung der Zellen mit Werkstoffen und Werkzeug automatisiert und durch Rechner überwacht werden. Der nächste Schritt dürfte darin bestehen, die Bearbeitungsmaschinen mit Sensoren auszustatten, um jederzeit Betriebsparameter (z.B. Scherkräfte, Schwingungen u.ä.) zu erfassen und automatisch die erforderlichen Bearbeitungsparameter (z.B. Schneidgeschwindigkeit, Zuführung usw.) zur Erzielung optimaler Ergebnisse anpassen zu können. Beim letzten Schritt werden schließlich auch die Rohproduktzuführung, der Zusammenbau vollständiger Teile sowie die Verpackung und der Transport der Endprodukte automatisch ausgeführt.

Das wesentliche Kennzeichen für die Fabrik der Zukunft ist der durchgängige Informationsfluß in einem die ganze Produktion umspannenden Informationsnetz. Hier sind die Teilbereiche Entwicklung, Konstruktion und Fertigungsplanung ebenso einzubeziehen wie der eigentliche Produktionsbereich, damit der schnelle Übergang von der Produktidee zum Produkt gewährleistet ist. Dabei bilden geeignet konzipierte Kommunikations-

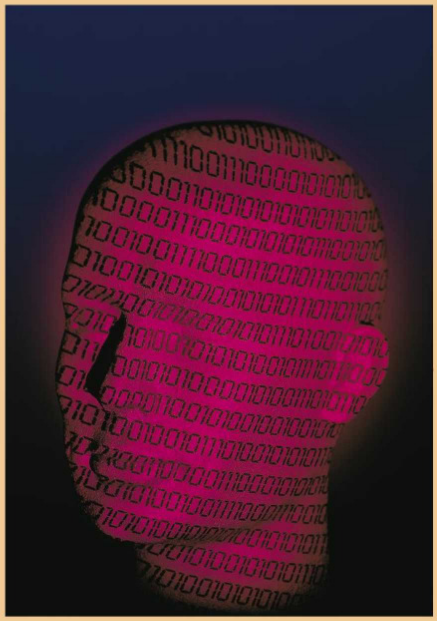
netze bzw. Datenbusse die Nervenstränge zum Austausch der Informationen zwischen Menschen, Rechnern, einzelnen Fertigungsmitteln und ganzen Produktionssystemen.

Die zur Realisierung von solchen rechnerunterstützten Produktionssystemen erforderlichen Informationsnetze sind in der Regel für den innerbetrieblichen Aufbau von CIM-Insellösungen bereits heute vorhanden. An den Schnittstellen zur überbetrieblichen Informationsübertragung (z.B. über ISDN) zwischen verschiedenen Unternehmen bzw. verschiedenen Standorten gibt es jedoch noch Defizite.

Ein großer Vorteil von automatischen Produktionseinheiten ist ihre Flexibilität, die im Gegensatz zur früheren Fließbandfertigung einheitlicher Massenprodukte eine schnelle Umstellung auf andere Produkte erlaubt. Ferner hat sich gezeigt, daß insbesondere Kleinserien schneller und zu niedrigeren Kosten hergestellt werden können als früher. Es gibt sogar schon Erfahrungen, daß sich eine automatische Fertigung zuerst bei der Herstellung komplexer Gegenstände in kleinen Serien, z.B. in der Luftfahrt- und Rüstungsindustrie lohnt. Viele strategische Analysen in den USA stufen den Bereich der Flexiblen Fertigung als eine der aus nationaler Sicht bedeutendensten Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts ein.

August 1996 Thomas Kretschmer

Wirtschaft & Gesellschaft



Wirtschaft & Gesellschaft

Gesellschaft

Wirtschaft & Gesellschaft

Wirtschaft & Gesellschaft



Wirtschaft

Wirtschaft & Gesellschaft

Virtuelle Welt

2009

2008

2007

Augmented Reality

Medienkonvergenz

2006

Ambient Intelligence

2005

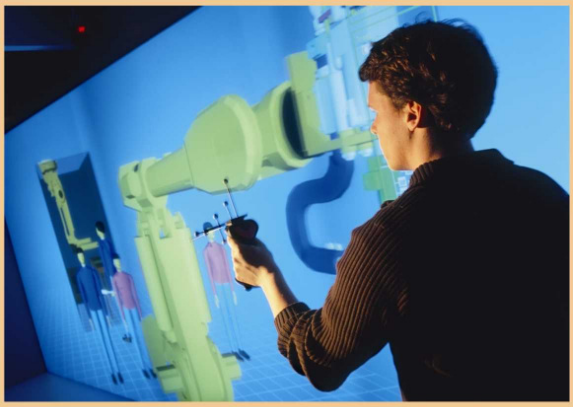
Geoinformationssysteme

E-Learning

2004

2003

Finite-Elemente-Methode



2002

2001

2000

Simulationstechnik

1999

1998

Multimedia

1997

Computergestützte Planung, Steuerung und Fertigung

1996

Augmented Reality

Als Augmented Reality (AR, deutsch: Erweiterte Realität) wird ein neuer Ansatz für Benutzerschnittstellen von Informationssystemen bezeichnet, bei dem die vom Menschen wahrgenommene Realität durch computergenerierte Informationen erweitert wird. Die AR steht im Gegensatz zur so genannten Virtuellen Realität, bei der vom Computer eine vollständig künstliche Umgebung geschaffen wird, in der ein Benutzer agieren kann. In den meisten Fällen werden die über AR übermittelten Informationsinhalte visuell eingeblendet. Es können allerdings auch andere Sinne, wie z.B. der Hör- oder Tastsinn, genutzt werden. Ein wesentliches Merkmal von AR ist, dass hier die computergenerierten Informationen nicht beliebig der realen Umgebung überlagert werden, wie dies z.B. bei Fahrerinformationssystemen im Auto durch Projektion auf die Windschutzscheibe erfolgt. Stattdessen werden bei der AR die virtuellen Objekte hinsichtlich ihrer Positionierung mit der realen Umgebung in Bezug gesetzt. So kann z.B. für einen Beobachter in einem realen Zimmer auf einem realen Tisch durch den Computer eine virtuelle Vase erzeugt werden, die ihre Position bezüglich des Tisches nicht verändert, wenn er sich durch das Zimmer bewegt.

Zur Herstellung von visuellen AR-Systemen sind Technologien zur Bilderzeugung, zur Bilddarstellung und zur korrekten Ausrichtung der virtuellen in Bezug auf die realen Objekte erforderlich. Die Bilderzeugung erfolgt durch ein grafikfähiges Computersystem, das die virtuellen Objekte berechnet und sie mit der realen Umgebung kombiniert. Bilddarstellungssysteme können z.B. als tragbare Geräte in Brillenform oder als Bildschirme realisiert werden. Die Darstellung des Bildes kann einerseits direkt auf optischem Wege geschehen, z.B. durch den Einsatz eines teilweise transparenten Spiegels. Hierdurch ist die natürliche Umgebung immer noch sichtbar, während das computergenerierte Bild gleichzeitig zum Betrachter reflektiert werden kann. Im Gegensatz hierzu verwenden videobasierte Darstellungssysteme eine Videokamera, um die reale Umgebung aufzunehmen. Das Videobild wird anschließend mit dem computergenerierten Bild kombiniert. Ein wesentlicher Vorteil der optischen Verfahren im Vergleich zu videobasierten Systemen ist die Möglichkeit einer natürlichen Sicht der realen Umgebung ohne Einschränkung der Auflösung oder des Gesichtsfeldes. Nachteilig ist, dass gegebenenfalls das Auge der Betrachter die virtuellen und realen Objekte nicht gleichzeitig fokussieren kann.

Die korrekte Anpassung der virtuellen Objekte an die reale Umgebung erfordert die kontinuierliche Überwachung der Position des Benutzers und dessen Blickrichtung. Dies kann zum einen unter Anwendung optischer Methoden erfolgen. Hierzu werden z.B. Markierungen in Form von Leuchtdioden oder Reflektoren in der Umgebung angebracht. Der Benutzer trägt dann optische Sensoren, um die Lage dieser Markierungen zu bestimmen. Hieraus kann anschließend auf die Position und Blickrichtung des Benutzers geschlossen werden. Derartige Systeme können eine hohe Genauigkeit erreichen. Bei einem Einsatz von AR in einer nicht-präparierten Umgebung, z.B. außerhalb von Gebäuden, müssen jedoch andere Verfahren genutzt werden. Möglichkeiten hierfür bietet die Nutzung von Trägheitssensoren zur Bestimmung von Blickrichtung und Position oder der Satellitenna-

vigation zur Positionsbestimmung. Beide Verfahren weisen allerdings gewisse Einschränkungen auf, z.B. hinsichtlich ihrer Genauigkeit.

Generell besitzen AR-Benutzerschnittstellen den Vorteil, dass der Anwender nicht zwischen seiner natürlichen Sicht und dem Blick auf einen Computerbildschirm wechseln muss, sondern dass beide Ansichten im korrekten Zusammenhang gleichzeitig integriert werden. Dementsprechend gibt es für die AR ein vielfältiges Spektrum an möglichen Einsatzgebieten. So können z.B. im medizinischen Bereich Röntgen- oder Ultraschallaufnahmen direkt zum Körper des Patienten in Bezug gesetzt werden, was sowohl das Stellen von Diagnosen als auch das Durchführen von Operationen erleichtert, z.B. in der minimal-invasiven Chirurgie. Im militärischen Bereich können AR-Systeme zukünftig das Lagebewusstsein von Soldaten verbessern, z.B. durch die Kenntnis aufgeklärter Positionen gegnerischer Scharfschützen oder der Lage von Minenfeldern. Mechaniker können AR bei der Reparatur oder Wartung von komplexen Maschinen einsetzen. Eingeblendete Informationen und Instruktionen erlauben auf diese Weise eine genauere Beschreibung einzelner Arbeitsschritte. Im privaten Bereich können z.B. Touristen durch virtuelle Beschriftungen an Gebäuden auf spezielle Informationsangebote aufmerksam gemacht werden. Auch die Erleichterung der Navigation in fremden Städten durch geeignete Wegbeschreibungen ist möglich.

Die Entwicklung von AR-Systemen befindet sich derzeit noch im Anfangsstadium. So fehlen im Hinblick auf mobile Anwendungen noch geeignete Geräte mit hinreichend geringem Gewicht, kleinen Abmessungen und niedrigem Stromverbrauch. Einen interessanten neuen Ansatz auf dem Gebiet der optischen Bilddarstellungssysteme gibt es im Bereich der Sichtbrillen. Bei diesem System werden die virtuellen Objekte nicht auf einen Schirm, sondern mit einem schwachen Laser direkt auf die Retina im Auge des Betrachters projiziert. Diese Vorgehensweise ermöglicht kompaktere und leichtere Geräte bei einem gleichzeitig reduzierten Stromverbrauch. Außerdem erlauben sie eine höhere Helligkeit, einen besseren Kontrast und ein breiteres Sichtfeld. Nachdem sie anfänglich nur die Möglichkeit zur monochromen Darstellung besaßen, existieren mittlerweile auch erste farbfähige Systeme. Weitere Fortschritte sind u.a. im Bereich der Bestimmung von Position und Blickrichtung des Benutzers zu erwarten. Zukünftige AR-Systeme in nichtpräparierten Umgebungen könnten z.B. auf der automatischen Erkennung und Verfolgung geeigneter Merkmale dieser Umgebungen basieren.

April 2006 Klaus Ruhlig

Medienkonvergenz

Der Begriff Medienkonvergenz beschreibt die Annäherung bzw. das Verschmelzen verschiedener Einzelmedien, wie z.B. Fernsehen, Hörfunk, Internet, Zeitung oder Bücher. Aus inhaltlicher Sicht handelt es sich um die zeitgleiche Verbreitung von Informationen über verschiedene Medien, wobei die einzelnen Angebote aufeinander Bezug nehmen. So unterstützen z.B. Bücher, DVDs, Computerspiele und Internetpräsenz die Vermarktung von Kinofilmen. Ein weiteres Beispiel stellen TV-programmbegleitende Internetangebote dar, die von der Bereitstellung zusätzlicher Informationen und E-Commerce-Angeboten bis hin zu diversen Unterhaltungsmöglichkeiten (Chat, Entertainment) reichen. Aus technologischer Sicht handelt es sich um die Konvergenz der den jeweiligen Einzelmedien zugrundeliegenden Technologien, d.h. in erster Linie Netze, Dienste und Endgeräte. Wesentliche Voraussetzung hierfür ist die zunehmende Digitalisierung aller Informationen, unabhängig davon, ob es sich um Daten, Texte, Sprache, Bilder oder Videos handelt.

Die Konvergenz der Netze basiert darauf, dass die Übertragung jeder Art von digitalisierten Informationen über jedes Kommunikationsnetz grundsätzlich möglich ist. Daher ist der Aufbau eines komplett neuen, einheitlichen Netzes nicht notwendig; er wäre auch aufgrund unterschiedlicher Infrastrukturen und konkurrierender wirtschaftlicher Interessen kaum realisierbar. Bereits vorhandene Netze auf der Basis von Kabeln, Mobil- und Satellitenfunk werden zunehmend parallel und kombiniert genutzt und können so als ein virtuelles Netz verstanden werden. Die breitbandige Übertragung auch über weite Distanzen wird physikalisch durch Satelliten- und Glasfaserkommunikation realisiert, welche zum Teil bis zum Endgerät reichen. Zur parallelen oder gemeinsamen Nutzung dieser Netze ist eine Vereinheitlichung der Netzprotokolle, die u.a. die Adressierung der Geräte und die Logistik des Datentransports regeln, erforderlich. Hier kristallisiert sich als wichtigster Integrationsfaktor zwischen den verschiedenen Netzen gegenwärtig das global verbreitete Internetprotokoll (IP, aktuell Version 4, zukünftig Version 6) heraus, das für nahezu alle Dienste und Anwendungen genutzt werden kann. Ob es sich durchsetzt, hängt davon ab, inwieweit Qualitätsverbesserungen z.B. hinsichtlich Verfügbarkeit, Informationssicherheit und verzögerungsfreier Sprachkommunikation integrierbar sind.

Bekannte Dienste sind u.a. Telefonie, Fernsehen, Hörfunk, aber auch das Internet. Bis in die jüngste Vergangenheit verfügten sie über speziell zugeschnittene Netze und eigenständige Endgeräte. Eine Konvergenz wird hier erst durch ihre Entkopplung von der Netzinfrastruktur und den Endgeräten ermöglicht. Heutzutage reichen die Dienste von der schmalbandigen, zeitsensiblen Telefonie bis hin zu Fernsehen, Video on Demand und Videokonferenzen, die alle breitbandige Netze erfordern. Da nahezu jede dieser Netzinfrastrukturen die unterschiedlichen Anforderungen der verschiedensten Dienste erfüllt, kann auf diesen Netzen eine Vielzahl von Angeboten zur Verfügung gestellt werden. Dies ermöglicht die Entwicklung neuartiger Dienste wie Musikdownload-Portale und Internet-Auktionsforen, aber auch die Angebotserweiterung durch Kombination bisheriger Dienste. Durch die Nutzung der IP-Technologien für die Telefonie (Voice over IP) werden die Daten- und Sprachkommunikation miteinander verbunden. Ein weiteres Bei-

spiel ist der netzübergreifende Dienst einer Adressverwaltung, der in Kombination mit einem Standortdienst den Anwender informieren kann, wenn sich z.B. Freunde oder Familienmitglieder in der Nähe befinden. Der Standortdienst erhält seine Informationen entweder direkt von den jeweiligen Personen durch Angabe ihres Aufenthaltsortes oder mit Hilfe von Mobilfunk- oder GPS-Standortsbestimmungssystemen.

Heute sieht sich der Medienkonsument einer Vielzahl von Endgeräten ausgesetzt, wie z.B. Telefone, Fernseher, Computer, Handys oder PDA's (Personal Digital Assistant), deren Funktionen größtenteils durch die technischen Realisierungsmöglichkeiten begrenzt werden. Die Umsetzung von Medienkonvergenz erfordert nun, dass diese mehrere Funktionalitäten übernehmen und nicht mehr an ausgewählte Dienste gebunden sind. In Folge dessen verschwimmen die Grenzen zwischen den einzelnen Geräten immer weiter. Entsprechende Entwicklungen zeigen sich u.a. bei Mobiltelefonen, die zusätzlich als PDA, MP3-Player, Radio oder Fotoapparat sowie in Zukunft auch als Fernsehgerät oder GPS-Empfänger genutzt werden können. Würde die Konvergenz in diesem Sinn fortschreiten, stände am Ende ein universelles Endgerät, das für sämtliche Formen moderner Informationsübertragung einsetzbar ist. Allerdings würde die Realisierung durch eine Reihe von ungeklärten Fragen erschwert, wie z.B Größe des Gerätes, Kompatibilität der Funktionalitäten, Zuverlässigkeit und Bedienbarkeit. Daher hat man sich von dieser Idee entfernt. Es wird erwartet, dass der Trend in Richtung spezialisierter Endgeräte geht, die den Nutzerbedürfnissen und Situationen angepasst sind. Dies bedeutet, dass nicht mehr technische Randbedingungen, sondern die Nutzer die Anzahl verschiedener Endgeräte und die darauf realisierte Zusammenstellung von Diensten (Bundling) bestimmen.

Generell werden die vielfältigen wirtschaftlichen Auswirkungen der unter dem Begriff Medienkonvergenz zusammengefassten Entwicklungen weiter zunehmen. So ist z.B. damit zu rechnen, dass die heute noch existierenden Branchengrenzen zwischen Telekommunikations-, Informations-, Medien- und Unterhaltungsindustrie immer mehr verschwinden werden. Hierdurch dürfte sich in diesen Bereichen der weltweite Trend zur Unternehmenskonzentration weiter verstärken, mit allen Konsequenzen hinsichtlich Meinungsvielfalt und Wahlfreiheit der Verbraucher. Andererseits wird sich aber auch das Angebot entlang der medialen Wertschöpfungskette, die von der Produktion der Inhalte über das Marketing, der Bereitstellung, der Übertragung bis zum Empfang und Service reicht, ständig erweitern.

März 2006 Birgit Weimert

Ambient Intelligence

Der Begriff Ambient Intelligence (deutsch: etwa Umgebungs-Intelligenz) steht für das Konzept der Integration verschiedener Technologien zu einer den Menschen umgebenden Gesamtheit von intelligenten Unterstützungssystemen. Dazu soll eine Vielzahl von Sensoren, Funkmodulen und Computerbausteinen massiv vernetzt werden und über intuitiv bedienbare Schnittstellen mit dem Menschen kommunizieren. Die zugrundeliegende Technik soll dabei nahtlos in die Alltagsumgebung integriert und nahezu unsichtbar sein. Die Umgebung wird so fähig, die Anwesenheit unterschiedlicher Individuen zu erkennen und mit diesen in intelligenter Weise zu interagieren, um sie durch bedarfs- und situationsgerechte Hilfestellungen bei allen Handlungen zu unterstützen. Im Prinzip stellt Ambient Intelligence eine Vision für eine Informationsgesellschaft dar, die schwerpunktmäßig auf eine benutzerfreundliche und menschzentrierte Informationsverarbeitung, die den Alltag verbessern hilft, ausgerichtet ist.

Das Konzept der Ambient Intelligence steht in enger Beziehung zu den verwandten Forschungsansätzen des Ubiquitious (allgegenwärtigen) bzw. Pervasive (alles durchdringenden) Computing und stellt als umfassende Vision den Menschen als Nutzer dieser Technologien in den Mittelpunkt. Der Begriff wurde vor allem in Europa geprägt und steht in engem Zusammenhang mit dem Forschungsprogramm „Information Society Technologies“ im 6. Rahmenprogramm der EU. Die Forschung konzentriert sich dabei in erster Linie auf die Entwicklung von Architekturen und Anwendungen und weniger auf die Entwicklung der technischen Grundbausteine.

Anwendungsfelder für Ambient Intelligence werden vor allem bei Reise, Auto und Verkehr, Haus und Büro, Medizin, Umweltmonitoring sowie sicherheitstechnischer Überwachung erwartet. Als erste Vorstufe kann der bereits heute mögliche Einsatz von informationstechnischen Fahrzeug-Unterstützungssystemen gesehen werden. So können Autos mit fahrzeugspezifischen Kommunikationsdiensten ausgestattet werden, die es ihnen erlauben, sich bei einem Unfall selbstständig mit Notfall- oder Sicherheitsdiensten in Verbindung zu setzen.

Als weiteres frühes Anwendungsgebiet von Ambient Intelligence kann das in Pilotprojekten untersuchte so genannte Intelligente Haus angesehen werden. Dessen Einrichtungen wie Heizung, Licht oder Belüftung aber auch Haushaltsgeräte oder Rollläden sind zwar noch mit mobilen Computern (z.B. PDAs = Personal Digital Assistants) zu bedienen, können sich aber bereits adaptiv auf die Bedürfnisse der Bewohner einstellen. Ein so ausgestattetes Haus erhöht den Komfort und die Sicherheit der Bewohner, trägt zur automatischen Energieeinsparung bei und kann über relevante Ereignisse informieren sowie Telekommunikationsverbindungen mit anderen Menschen herstellen.

Die wichtigste technologische Grundlage für die Vision der Ambient Intelligence ist der anhaltende Fortschritt in der Miniaturisierung elektronischer Komponenten und die damit einhergehende Effizienzsteigerung bei der Informationsverarbeitung. Diese Entwicklung wird in vernetzten, wenige Kubikmillimetern großen dreidimensionalen Mikrosystemen münden, die immer komplexer und zunehmend autark werden. Für diese

wurde bereits der Begriff „Electronic Grain“ (e-Grain = elektronisches Körnchen) geprägt. Damit wird es möglich, kostengünstige vernetzte Mikrosysteme in Alltagsobjekte wie Möbel, Kleidung, Spielzeug oder sogar Farbpartikel in Tapeten bzw. Wandanstrichen (intelligent wallpapers , electronic paint) zu integrieren. Diese Gegenstände und Dinge erhalten so eine funktionale elektronische Identität und wandeln sich von passiven zu aktiven, kommunikationsfähigen Objekten, die in die bestehende lokale und globale Vernetzung eingebunden werden. Das dingliche Umfeld wird dadurch sensibel und kann sich der jeweiligen Situation und den aktuellen Bedürfnissen des Menschen anpassen und so dessen Leistungsfähigkeit und Lebensqualität steigern.

Mögliche zukünftige Basistechnologien der Ambient Intelligence könnten die Nano- und Molekularelektronik sein. Als deren Vorteil wird insbesondere erwartet, dass solche Bauelemente preiswert chemisch produziert werden können und im Einsatz wenig Energie verbrauchen. Erste Logikschaltkreise auf dieser Basis wurden bereits demonstriert. Eine weitere ebenso wichtige Grundlage ist die Weiterentwicklung der Mensch-Computer-Interaktion zu einer echten Mensch-Computer-Kooperation. Hier wird die Ein- und Ausgabe von Information intuitiv und unter Einbeziehung aller menschlichen Sinne erfolgen. Damit sind Nutzerschnittstellen wie Sprach- und Gestenerkennung ebenfalls von entscheidender Bedeutung für die Realisierung der Vision. Durch die Einbeziehung des Internet als Informationsquelle kann auch globales Kontextwissen die lokal gewonnenen Daten ergänzen.

Ein wichtiges bisher noch weitgehend ungelöstes technisches Detailproblem bei der Realisierung einer Ambient Intelligence ist die autonome Energieversorgung aller Komponenten. Nur ein kleiner Teil der Systeme kann leitungsgebunden mit Energie versorgt werden, während die Vielzahl der in das Umfeld integrierten Mikrosysteme ohne externe Energieversorgung arbeiten muss. Hierfür werden Lösungsvorschläge wie Solarenergie oder die Umwandlung von Umgebungswärme oder -vibrationen in elektrische Energie diskutiert. Ebenfalls noch weitgehend offen ist, wie ein adaptives, lernfähiges Verhalten für ein komplexes System mit so vielen interagierenden Komponenten erreicht werden kann. Erschwert wird eine Lösung noch durch die je nach Kontext wechselnden Rollen und Ziele. Dieser Problembereich ist Gegenstand vieler Forschungsvorhaben.

Generell stellt sich für eine so weitreichende informationstechnische Durchdringung des menschlichen Alltags auch immer die Frage nach der Akzeptanz eines solchen Systems. Besonders kritisch ist hier vor allem ein ausreichend sicherer Daten- und Persönlichkeitsschutz zu sehen, insbesondere vor dem Hintergrund einer völligen Kontrollierbarkeit des wahrgenommenen Umfeldes und damit der Gefahr der Manipulierbarkeit. Hier muss ein akzeptabler Kompromiss zwischen Sicherheit und Komfort eines kontrollierten Umfeldes und der menschlichen Entscheidungsfreiheit, die unter Umständen auch irrationales oder sogar riskantes Verhalten beinhaltet, gefunden werden. Ein möglicher Lösungsansatz könnte ein „Identitätsmanager“ sein, der in nachvollziehbarer, intuitiv bedienbarer Weise ein selbstbestimmtes Agieren in der intelligenten Umgebung steuert.

März 2005 Henner Wessel

Geoinformationssysteme

Als Geoinformationssysteme (GIS) bezeichnet man rechnergestützte Systeme zur Erfassung, Verwaltung, Speicherung, Analyse, Transformation und Präsentation von Informationen, die einen konkreten Raumbezug aufweisen. Sie werden zur Lösung verschiedenster Aufgaben in den Geowissenschaften, im Vermessungswesen, in der Kartographie, in der Raumordnung bzw. -planung sowie im Umweltschutz eingesetzt.

Im Prinzip verhält sich ein GIS zu einer konventionellen Landkarte aus Papier wie eine Datenbank zu einem Karteikasten. Entsprechend kann es wie die Landkarte als Modell der natürlichen Umwelt angesehen werden. Allerdings sind Karten auf die Darstellung einzelner Aspekte oder Themen beschränkt, d.h. jedem auf der Karte abgebildeten Punkt wird eine Information zugeordnet. So stellen z.B. topographische Karten ausschließlich geographische Merkmale wie Flüsse, Seen oder Berge eines bestimmten Gebietes dar.

Die so genannten thematischen Karten bilden unter Bezugnahme ausgewählter geographischer Merkmale bestimmte Themenaspekte ab, z.B. die Bevölkerungsverteilung in einer bestimmten Region. Jedoch sind hier die Darstellungsmöglichkeiten auf einzelne Aspekte begrenzt, damit die Karte im Endeffekt noch lesbar bleibt. Im Unterschied hierzu bietet ein GIS die Möglichkeit, einem Punkt im Raum beliebig viele Informationen über die natürliche und künstliche Umwelt zuzuordnen. Durch gezielte Abfragen und Analysen innerhalb des Systems lassen sich Beziehungen und Zusammenhänge zwischen geographischen Gegebenheiten vor Ort und verschiedensten Themen z.B. wirtschaftlichen, bevölkerungsgeographischen, hydrographischen Aspekten herstellen und kombinieren. Auf dieser Basis können wichtige räumliche Zusammenhänge aufgezeigt werden, die z.B. in politische oder militärische Entscheidungsprozesse einfließen.

Hauptbestandteil eines GIS ist eine geographische Datenbank. Diese dokumentiert die Informationen über natürliche Gegebenheiten, räumliche Zusammenhänge und Strukturen einer bestimmten Region, wie z.B. Bevölkerungszahlen, Niederschlagsmengen oder Bodenbeschaffenheit. Zur anwendungsgerechten Verarbeitung der Daten werden verschiedene Programme benötigt, die in einer Methodenbank zusammengefasst werden. Die Programme der Methodenbank gewährleisten z.B. die statistische Analyse der Daten, die Umsetzung in das Datenbankformat, eine vergleichende Kombination von Daten aber auch die visuelle Aufbereitung der Daten. Zentrale Bedeutung in einem GIS hat der graphisch-interaktive Arbeitsplatz, der die Bearbeitung der Daten ermöglicht. Zum Arbeitsplatz gehören sowohl die Einrichtungen zur Digitalisierung von Daten als auch die Ausgabegeräte wie Bildschirme, Plotter und Drucker zur Visualisierung der Daten in Form von Tabellen, Grafiken, Statistiken, 2D- und 3D-Modellen.

Generell lassen sich zwei Gruppen von Geoinformationssystemen unterscheiden. Die so genannten Basis-GIS enthalten allgemeine Grundlageninformationen (Basisdaten), die für alle Geoinformations-Anwendungen benötigt werden, wie z.B. das Raumbezugssystem. Die Fach-GIS hingegen sind durch engere Themenbereiche gekennzeichnet, wie z.B. die Anforderungen der kommunalen Verwaltung, der Statistik, der Geologie oder der Bodenkunde. Die Basis-GIS werden in Deutschland in der Regel von den Vermessungs-

verwaltungen der Bundesländer zur Verfügung gestellt. Eine wichtige Rolle spielt hier das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS). Es wird derzeit überarbeitet und auf das sich in der Konzeptionsphase befindliche Amtliche Liegenschafts-Kataster-Informationssystem (ALKIS) abgestimmt. Ziel ist die Anpassung an internationale Standards und Normen und damit zukünftig eine einfachere Integration in bestehende Fachanwendungen. Im internationalen Bereich gibt es mittlerweile eine Reihe weit verbreiteter Geoinformationssysteme, die über das Internet abgerufen werden können. Zunehmend werden globale raumbezogene Datenbanken aufgebaut, die einen internationalen Austausch von räumlichen Daten ermöglichen.

Geoinformationssysteme sind heute aus vielen Bereichen des täglichen Lebens nicht mehr wegzudenken. Sie werden in der Wissenschaft und Forschung beispielsweise in der Klimaforschung, in der Medizin aber auch in Wirtschaftsunternehmen der unterschiedlichsten Branchen insbesondere bei Standortentscheidungen, im Ressourcenmanagement oder auch als Marketinginstrument eingesetzt. Eine hohe Bedeutung haben GIS in den Bereichen Umweltschutz, Katastrophenschutz und -vorsorge sowie Meeresforschung und Küstenschutz. Ihre Bedeutung für alle raumbezogenen Planungs-, Verwaltungs-, Überwachungs- und Analyseaufgaben ist in den letzten Jahren stark gestiegen. Insbesondere aus dem Bereich der öffentlichen Verwaltung sind GIS nicht mehr wegzudenken.

Auch für militärische Anwendungen spielen GIS eine immer größere Rolle, hier insbesondere als Bestandteile moderner Führungsinformationssysteme. Angestrebt wird die Integration von Geoinformationen und Aufklärungsergebnissen unterschiedlichster Art in einem gemeinsamen Lagebild für alle Führungsebenen. Ein weiteres wichtiges militärisches Einsatzfeld bildet die Logistik (z.B. das Fahrzeugflotten-Management). Für den Bereich der Bundeswehr spielt das System TOPIS (Topographisches Informationsystem der Bundeswehr) eine wesentliche Rolle, das für das Bundesgebiet die Daten des ATKIS übernimmt und durch weitere Informationen wie Höhenangaben oder Bebauungsdichte ergänzt. Generell kann trotz des hohen Bedarfs an digital verfügbaren Geoinformationen im militärischen Bereich auch in Zukunft auf die herkömmliche Papierkarte nicht verzichtet werden, um eine Rückfallposition bei möglichen Ausfällen der technischen Systeme zu haben.

Nachdem GIS ursprünglich nur als Spezialanwendungen für Experten konzipiert waren, hat sich ihr Nutzungsspektrum in den vergangenen Jahren wesentlich erweitert. Sie können inzwischen praktisch auf jedem PC-System eingesetzt werden, z.B. bei der Routenplanung oder der Nutzung von digitalen Atlanten. Darüber hinaus werden immer mehr raumbezogene digitale Daten und GIS-Anwendungen über das Internet angeboten. Mit dem weiteren Ausbau von Datenhochgeschwindigkeitsnetzen und der Zunahme multimediafähiger PCs ist ein neuer Innovationsschub für die Entwicklung von Geoinformationssystemen gerade auch im Internet zu erwarten.

September 2004 Denise Köppen

E-Learning

In der allgemeinsten Definition umfasst der Begriff E-Learning alle Lernprozesse, bei denen elektronische Medien zur Wissensvermittlung und Lernkontrolle verwendet werden. Hierzu gehört einerseits der schon seit langem praktizierte Einsatz elektronischer Lernhilfen in Form von Videos, CD-ROMs, Disketten oder Hörkassetten. Eine wesentliche Erweiterung hat dieser Bereich durch die Nutzung von Computern zur Steuerung und Integration solcher unterschiedlichen Informationsträger genommen. Die entscheidenden Vorteile dieser häufig als CUL bzw. CAL (Computer Unterstütztes Lernen, bzw. Computer Aided Learning) bezeichneten Lerntechnologie besteht in der Multimedialität (Text, Bild, Ton) des Informationsangebots und der dadurch bedingten didaktischen Möglichkeiten. Einen wesentlichen Qualitätssprung hat das E-Learning jedoch in jüngster Zeit durch die Möglichkeiten der netzbasierten Informationsübertragung zur interaktiven Vermittlung von Lerninhalten erfahren. Daher wird derzeit in manchen Publikationen sogar das Thema E-Learning mit Internet- bzw. Intranet-basiertem Lernen gleichgesetzt.

Generell unterscheidet man heute das Computer Based Training (CBT) und das Web Based Training (WBT) als die zwei Hauptformen des E-Learning. Hinzu kommt eine Reihe von speziellen anwendungsorientierten Modifikationen. Hauptmerkmal des nach wie vor am weitesten verbreiteten CBT ist die computergestützte Darstellung der Lerninhalte mittels elektronischer Speicher wie CD ROM oder DVD. Der wesentliche Vorteil liegt hier beim schnellen lokalen Zugriff auf die Inhalte. Nachteilig für den Nutzer sind die fehlenden Interaktionsmöglichkeiten mit Tutoren oder anderen Mitlernenden. Hinzu kommen die hohen Produktionskosten sowie der mangelnde Aktualisierungsgrad der Programme, die bei Veränderung der Lerninhalte in der Regel neu aufgelegt werden müssen.

Beim WBT, das zunehmend das CBT ersetzt, werden die Lerninhalte online zur Verfügung gestellt und per Webbrowser über Internet oder das hauseigene Intranet abgerufen. Aufgrund der direkten Steuerung über das jeweilige Netz lassen sich hier die Lerninhalte leicht aktualisieren. Durch die Modularisierung der Lernbausteine kann auf die Inhalte je nach Bedarf zugegriffen und damit das selbstgesteuerte Lernen des Einzelnen unterstützt werden. Der gemeinsame Zugang sowohl der Lernenden als auch der Tutoren erlaubt eine Kombination von WBT mit verschiedenen Kommunikationsformen wie E-Mail, Chat oder Diskussionsforen.

Zwei spezielle Anwendungsformen des E-Learning sind das so genannte Virtuelle Klassenzimmer (Virtual Classroom = VC) sowie das Business TV. Beim VC werden Lerninhalte im Rahmen von Online-Schulungen vermittelt, wobei Teilnehmer und Trainer in der Regel räumlich getrennt sind, aber gleichzeitig zugeschaltet werden und miteinander agieren können. Beim Business TV nutzt man firmeneigene Fernsehprogramme zur direkten Information von Mitarbeitern, Partnern, Kunden oder Lieferanten. Als E-Learning-Instrument dient es in erster Linie zur Verbreitung von Lerninhalten zur Mitarbeiterschulung und –motivation.

Zur Umsetzung von E-Learning-Lösungen kommen verschiedene Softwaretools zur Anwendung. So gibt es z.B. Spezialprogramme zur Erstellung von Lernmodulen, die ein-

zelne didaktische Elemente (z.B. Textpassagen oder Grafiken) in eine Anwendung integrieren. Sie werden als Autorenwerkzeuge bezeichnet. Zum Einsatz kommt auch Software, die zur Erstellung anderer Arten von multimedialen Inhalten verwendet werden kann, wie z.B. Programme zur Erstellung von Audio- und Videosequenzen. Zur Gestaltung interaktiver Lernanwendungen werden zunehmend Softwaretools aus dem Bereich der Simulation (Simulatoren) genutzt. Eine wichtige Rolle spielen die so genannten Lernplattformen. Diese speziellen Softwarearchitekturen integrieren auf einer Oberfläche eine Vielzahl von Teilprogrammen, die für die Erstellung und Abwicklung von netzbasierten E-Learning-Programmen erforderlich sind.

Ein wichtiges Merkmal von E-Learning-Techniken ist das Kriterium der Interoperabilität, d.h. die Möglichkeit einer nahtlosen Zusammenarbeit unterschiedlicher Systeme. Darüber hinaus ist die ständige Anpassung der Inhalte an die Bedürfnisse der Nutzer erforderlich, um E-Learning-Anwendungen flexibel und individuell zu gestalten. Dies ist nur gewährleistet, wenn einzelne Module ohne hohen Aufwand ausgetauscht werden können. Um den sich hieraus ergebenden Standardisierungsanforderungen zu genügen, haben sich weltweit mehrere Konsortien gebildet, die offene Standards zur Interoperabilität von Autorensystemen, Lernplattformen und WBT-Techniken definieren.

Das Instrument des E-Learning wird heute bereits umfassend im beruflichen Kontext zur Vermittlung fachlicher Qualifikationen genutzt, wie z.B. von Sprachkenntnissen oder Sachwissen. Zunehmend dient es auch zur Verbreitung von Erfahrungswissen, z.B. in den Bereichen Mitarbeiterführung und –motivation. Verstärkt kommt E-Learning darüber hinaus im schulischen Umfeld, in der beruflichen Erstausbildung und in der universitären Aus- und Weiterbildung zum Einsatz.

Für den gesamten Bildungsbereich gilt, dass das Lernangebot und auch die Form der Vermittlung von Lerninhalten zukünftig immer stärker an die Anforderungen der lebenslangen Weiterbildung und des selbstgesteuerten und individualisierten Lernens angepasst werden muss. Hierfür gilt E-Learning aufgrund seiner Flexibilität als geeigneter Ansatz. Jedoch hat die bisherige Erfahrung im praktischen Einsatz gezeigt, dass eine direkte Umsetzung von Lernmaterialien in elektronischer Form ohne zusätzliche personelle Betreuung des Lernenden nicht den gewünschten Erfolg zeigt. So dürften sich neben CBT und WBT als den zur Zeit noch am weitesten verbreiteten Formen des E-Learning zukünftig Mischformen durchsetzen, die eine Kombination verschiedener E-Learning-Techniken mit Präsenzseminaren und tutorieller Begleitung vorsehen. Sie werden als Blended Learning bezeichnet. Darüber hinaus werden innovative Elemente des E-Learning wie Simulationen, Lernspiele oder Virtuelle Realität an Bedeutung gewinnen, die durch interaktives Arbeiten und spielerisches Ausprobieren das Sammeln von praxisorientierten Erfahrungen ermöglichen.

April 2004 Denise Köppen

Finite-Elemente-Methode

Unter der Finite-Elemente-Methode (FEM) versteht man eines der wichtigsten Näherungverfahren zur Berechnung von Strukturen und Feldern in Naturwissenschaft und Technik. Sie basiert auf einem speziellen mathematischen Ansatz zur diskreten Beschreibung räumlicher Strukturen. Weitere derartige so genannte Diskretisierungsverfahren sind die Methode der Finiten Differenzen und der Finiten Volumen, die Finite-Integrations-Technik sowie verschiedene Randelemente-Methoden. Ausgehend vom Flugzeugbau hat sich in der Praxis die FEM zum bekanntesten und bedeutendsten dieser Verfahren entwickelt.

Der Vorteil der FEM liegt in der Modellierung des Problems und der näherungsweisen Lösung komplexer umfangreicher Differentialgleichungen, die bei der Berechnung kontinuierlicher, unter äußeren Einflüssen (z.B. Belastungen) stehender Strukturen mit schwieriger Geometrie entstehen. Diese sind in den wenigsten Fällen geschlossen lösbar. Hierzu ist die Diskretisierung, also eine räumliche und zeitliche Auflösung des Problems erforderlich, so dass die Berechnung in Einzelschritten mit ausreichender Genauigkeit erfolgen kann.

Die FEM kommt derzeit im Ingenieurwesen, beispielsweise in der Mechanik, im Bauwesen, in der Strömungsmechanik und in der Thermodynamik zum Einsatz. Weiterhin wird sie zunehmend in der Physik, z.B. zur Berechnung elektromagnetischer Felder, oder auch in der Biomechanik, z.B. zur Bestimmung von Knochen- und Gelenkbelastungen, angewandt.

Mit der FEM wird die Geometrie einer Struktur, bei der es sich z.B. um ein Bauteil, ein ganzes Flugzeug, Teile eines Skeletts oder um Felder in und um einen Körper handeln kann, in einzelne, begrenzte (finite) Elemente von einfacher Form aufgelöst. Für diese lassen sich Materialkennwerte sowie einwirkende Kräfte, Verformungen, Temperaturen usw. in einem Gleichungssystem (einer Matrizengleichung) darstellen. Da die Struktur keine Lücken aufweist, sind die Randbedingungen eines finiten Elements gleichzeitig die Randbedingungen seiner Nachbarelemente. Damit lassen sich die Einzel-Gleichungssysteme (Element-Matrices) zu einem Gesamt-Gleichungssystem (Gesamtmatrix) aggregieren, das dann gelöst werden muß. Die Grundidee der FEM besteht also darin, dass sehr komplizierte Differentialgleichungen zur Beschreibung eines physikalischen Vorgangs in ein lineares Gleichungssystem überführt werden, das allerdings oft sehr groß ausfällt.

Als weiterer Vorteil der mathematischen Modellierung mittels FEM kommt hinzu, dass damit auch die Untersuchung innerer Zustände oder Vorgänge möglich wird. Der Einblick in die Struktur wird möglich, da bei der Berechnung auch die Zustände der einzelnen finiten Strukturelemente mit anfallen. Die Modellierung erlaubt darüber hinaus die Zeitauflösung eines Vorgangs.

Der Ablauf der Problembearbeitung mit der FEM umfasst drei Schritte. Zunächst wird das Problem durch Auflösen der Struktur in diskrete finite Elemente zur Berechnung vorbereitet, wobei ein Netz über die Struktur gezogen wird. Da die Größe und Komplexität der Probleme und die Anforderungen an die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse ständig steigen, verwendet man Applikationen, die die Diskretisierung weitgehend automatisie-

ren, aber auch interaktiv eine dichtere Gestaltung des Netzes an kritischen Stellen erlauben.

Nachdem das Finite-Elemente-Netz mit Knoten und Elementen bereitgestellt ist, werden die geometrischen Daten, Materialkennwerte und Feldgrößen in Matrizengleichungen zusammengefasst und die Berechnung durchgeführt. Bei dreidimensionalen, komplexen Strukturen ergibt sich meist ein beträchtlicher Rechenaufwand. Derzeit ist der Auflösungsgrad (Verfeinerung) so, dass z.B. für die Abbildung eines Fahrzeugs 200.000 bis 300.000 Elemente berechnet werden.

In der anschließenden Auswertung werden die errechneten Zustandsgrößen benutzergerecht aufbereitet und aus ihnen sekundäre Ergebnisse gewonnen. Zuerst einmal ermöglicht die Auswertung einen Überblick über die Verteilung der Felder und erleichtert damit die Prüfung der Plausibilität der Ergebnisse. Vor allem aber soll sie helfen, kritische Stellen im System, wie z.B. Belastungsspitzen, zu erkennen. So können beispielsweise Strömungen und Transportprobleme in Form von Grafiken oder Animationen visualisiert, oder Drücke und Spannungen durch Einfärbung der Struktur dargestellt werden. An Hand dieser Erkenntnisse lässt sich z.B. eine untersuchte Struktur iterativ optimieren. In Spezialfällen, z.B. bei Stahlbetonbauten oder Fahrzeugzellen, kann aufgrund der Kenntnis der inneren Spannungen die Dimensionierung im Auswertevorgang direkt erfolgen.

Besondere Bedeutung kommt der FEM derzeit im Rahmen der computergestützten Entwicklung und Fertigungsvorbereitung industrieller Produkte zu. Insbesondere im Bereich der Festigkeits-, Verformungs-, Schwingungs- oder Fließberechnungen liefert die FEM eine wesentliche Basis für die im Computer Aided Design (CAD) zu erstellenden Strukturen.

Generell zeigt sich, dass aufgrund der zunehmenden Rechnerleistungsfähigkeit die Zahl der Anwendungsgebiete der FEM ständig zunimmt. Dabei ist ein sich wechselseitig fördernder Prozess festzustellen. Einerseits können mit dieser Methode immer komplexere Fragestellungen behandelt werden. Aus deren näherungsweiser Lösung gelangt man andererseits zum immer besseren Verständnis bestimmter physikalischer Phänomene, die wiederum die Anwendungsmöglichkeit und Aussagegenauigkeit des Verfahrens verbessern.

Juli 2002 Wolfgang Nätzker

Simulationstechnik

Simulationen befassen sich mit dynamischer Nachbildung, Untersuchung, Modifizierung oder Neugestaltung der vom Menschen mit seinen Sinnen oder mittels technischer Hilfen erfaßbaren Realität im Computer. Darüber hinaus erschließen sie in zunehmendem Maße auch Bereiche der Wirklichkeit, die auf diesem Wege nicht zugänglich sind.

Die Grundlage für jede Simulation bildet ein Modell zur Beschreibung des zu untersuchenden Objektbereiches. Dabei besteht der Hauptaufwand weniger darin, ein korrektes Modell zu formulieren, sondern in der soliden Umsetzung der wesentlichen Erkenntnisse aus jenen wissenschaftlichen Fachdisziplinen, die sich mit der zu untersuchenden Fragestellung vertieft beschäftigen. Ziel ist es, ein Repertoire experimenteller und methodenorientierter Vorgehensweisen aufzubauen. Damit sollen das Verhalten des zu simulierenden Bereiches beschrieben, Hypothesen in selbstanpassender Weise entwickelt sowie das zukünftige Systemverhalten vorhergesagt werden können. Die möglichen markanten Fehlerquellen bei der Modellbildung liegen in unvollständiger methodischer Vorarbeit und den oft notwendigen Vereinfachungen bei der Abbildung der Realität auf verfügbare Rechner.

Je nach Art der Modellierung unterscheidet man zwischen der abstrakten und der gegenständlichen Simulation. Bei der abstrakten Simulation, auch als Constructive Simulation oder analytische Simulation bezeichnet, wird das zu untersuchende Objekt vollständig im Rechner modelliert. Sie dient überwiegend der Klärung elementarer Fragen aus den Bereichen Grundlagenforschung, Planung sowie Folgenabschätzung und ist eine wesentliche Hilfe beim Erkennen von Ursachen, Wechselwirkungen und Zusammenhängen. Ferner unterstützt sie bei der Entscheidungsfindung und ersetzt oder ergänzt oft aufwendige Felduntersuchungen oder Experimente.

Ein wesentlicher Trend der abstrakten Simulation ist die Integration verschiedenartiger Ansätze, Konzepte und Softwaremodule in einen simultanen Gesamtprozeß. Ihre wichtigsten Impulse bekommt sie nach wie vor aus den Natur- und Ingenieurwissenschaften, obwohl die meßbaren Fortschritte unmittelbar an den aktuellen Stand von Hard- und Softwaretechnologie gebunden sind. Besonders rechenintensive Simulationen finden sich in Kosmologie, Biochemie oder Klimaforschung. Diese werden oft erst durch Supercomputer mit bis zu mehreren hundert Prozessoren ermöglicht, aber auch durch die gelegentlich praktizierte weltweite Vernetzung von Einzelrechnern zu Verbunden. Voraussetzung hierfür ist die sogenannte Vektorisierung der Daten und Software, also die Aufteilung in Pakete, die parallel verarbeitet werden können.

Einen sehr engen Bezug zur abstrakten Simulation hat die sog. Computational Science. Bei diesem neuen Forschungsansatz verzichtet man völlig auf experimentelle und prototypische Anordnungen. So bietet sich z.B. in der Materialforschung die Möglichkeit, die Auswahl der für spezielle Anwendungen passenden Werkstoffe und Bauteile vollständig im Rechner vorzunehmen. Hierbei reicht das Spektrum vom gezielten Werkstoffdesign auf atomarer Ebene bis hin zur Simulation des Bauteilverhaltens unter Betriebsbedingungen, wie z.B. für den Einsatz von Kompositwerkstoffen im Eurofighter.

Die gegenständliche Simulation wird hauptsächlich in der Ausbildung, also beim realitätsnahen Lernen und Üben unter pädagogisch optimierten Bedingungen, in der praxisnahen Entwicklung und Erprobung sowie auch in Gestaltung und Design angewendet. Sie ermöglicht es, Situationen mit hohem Gefahrenpotential ungefährdet zu üben, und hilft, Umwelt und Ressourcen zu schonen. Hier unterscheidet man weiter in die sog. Virtual Simulation oder bemannte Simulation, bei der Personen in einer virtuellen Realität handeln, und die sog. Life Simulation oder integrierte Simulation, bei der Personen in der realen Umwelt handeln. In beiden Bereich spielen im Gegensatz zur abstrakten Simulation die Mensch-Maschine-Schnittstellen sowie die rechnergesteuerte Peripherie (z.B. Displaytechnik, bewegte Plattformen, Meß- und Prüfstände) eine maßgebliche Rolle.

Die besonderen Herausforderungen liegen auch hier im möglichst akkuraten Transfer der Wirklichkeit in die virtuelle Realität. Aktuelle Grenzen der Möglichkeiten werden bei der Tiefflug-, Radar- oder Schwerkraftsimulation ebenso offensichtlich wie in der Simulation computerintegrierter Herstellungsprozesse oder der Funktion kompletter virtueller Fabriken. Die Leistungsfähigkeit der gegenständlich orientierten Simulationssysteme ist wieder eng an verfügbare Rechenkapazität, aber auch an die Funktionalität der Mensch-Maschine-Schnittstellen gebunden.

Generell zeigt sich, daß die Simulationstechnik zunehmend Wissenschaft, Wirtschaft und auch Politik durchdringen und dadurch alle Abläufe erheblich beschleunigen wird. Dabei zeichnet sich mittelfristig für viele Anwendungsmöglichkeiten das Zusammenwachsen von analytischer und bemannter Simulation zu integrierten Gesamtlösungen ab.

Ein insbesondere aus logistischer und ausrüstungsstrategischer Sicht interessanter Trend in der Simulationstechnik ist die zukünftige Möglichkeit zu einer Art virtueller Fabrikation bzw. Lagerhaltung. Hierbei findet der Prozeß der Produktentwicklung und -verbesserung von der Ideenfindung bis hin zur Fertigung sowie Qualitäts- und Funktionsprüfung zunächst ausschließlich virtuell im Computer statt. Damit besteht die Möglichkeit, das Produkt jederzeit kurzfristig herstellen zu können. Hieraus resultieren erhebliche Vorteile bezüglich Kosten, Aufwand und Aktualität, da Lagerhaltung, Instandsetzung und Erneuerung realer Güter zunächst entfallen.

September 1999 Stefan Reschke

Multimedia

Als zusammenfassender Begriff für die Verbindung zwischen Computer und Nutzer wird in den letzten Jahren häufig der Begriff Multimedia gebraucht. Er bedeutet, daß unter Einsatz von Computern praktisch das gesamte Spektrum möglicher Informationsformen konsumiert, verarbeitet und kommuniziert werden kann, d.h. im wesentlichen Text oder Zahleninformation, Standbild, Bewegtbild bzw. Video sowie Ton einschl. ihrer Integration in einem Zusammenhang (Hypertext/Hpermedia). Diese Entwicklung hat sich in den letzten Jahren deutlich beschleunigt und die Schwelle zum Massenmarkt überschritten. Es muß damit gerechnet werden, daß sowohl zivile als auch militärische Arbeitsplätze in immer stärkerem Maße von diesen Technologien bestimmt werden.

Der wichtigste Motor für die rasche Generationenfolge bei Konzepten und Geräten auf dem Gebiet von Multimedia (Computer, Übertragungs-/Vermittlungstechnologie in Netzen etc.) ist nach wie vor und auf absehbare Zeit die Mikroelektronik. Sie weist weiterhin sehr hohe Leistungssteigerungen bei drastisch sinkenden Preisen auf. Im Bereich der Kommunikation wird die Entwicklung derzeit dominiert von den Anstrengungen zur Realisierung einer weltweiten digitalen Informationsinfrastruktur für alle Multimediadienste. Diese reichen von den stationären und mobilen Kommunikationsverbindungen zwischen individuellen Teilnehmern über alte und neue Rundfunk- und Fernsehdienste bis hin zur Etablierung eines neuen virtuellen Interaktionsraumes (Internet, Cyberspace) für professionelle und private Zwecke.

Bei der Mensch-Computer-Schnittstelle sind neue Interaktionsmedien wie der 3-D-Helmbildschirm, die 3-D-Maus oder der Datenhandschuh bereits realisiert, aber auch bei den eher konventionellen Displays sind noch wesentliche Fortschritte zu erwarten, wie z.B. große ggf. flexible Flachbildschirme oder Buchbildschirme. Insbesondere ist die Ein-/Ausgabe von Sprache von Bedeutung, aber auch der Einsatz einer Kamera, mit der eine direkte Bildverbindung zwischen Arbeitsplätzen hergestellt werden kann. Mit mehreren solchen Kameras kann die handelnde Person stereoskopisch vermessen werden, um ein Computerabbild zu generieren. So können etwa Gesten als Befehle interpretiert werden, und die handelnde Person kann als „virtuelle Person" in das System eingeben werden.

Das kritische Element für die weitere Entwicklung von Multimedia ist die Umsetzung von Problemlösungen in zuverlässige, fehlerfreie und vor allem nutzerfreundliche Software und damit der tatsächliche Nutzen, den ein Anwender erwarten kann. Dies gilt aus rein technischer Sicht z.B. für alle Konfigurations- und Schnittstellenprobleme bei einer sich schnell verändernden Komponentenausstattung, aber auch für die Entwicklung neuer Anwendersoftware auf extrem schnellebigen Märkten. Dieser gesamte Bereich ist in starkem Maße durch nichttechnologische Aspekte wie Nutzerakzeptanz, Standardisierung etc. beeinflußt und wird die weitere Entwicklung wesentlich stärker bestimmen als die reine (Hardware-)Technologie.

Von besonderer Bedeutung sind die Anwendungen, bei denen die kognitiven Fähigkeiten des Menschen unterstützt oder automatisiert werden sollen, insbesondere um mit

der explosionsartigen Zunahme der Informationsmengen fertig zu werden. Dies betrifft z.B. die Extraktion und Bewertung von relevanter Information aus großen Datenbeständen oder die Mustererkennung. Hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.

Die Hauptanwendungsfelder von Multimedia-Technologien sind neben der Unterhaltung die Schreibtischarbeitsplätze und die Simulatoren in Ausbildung und Planung. Dabei wird die Integration des Simulationsaspektes an allen Arbeitsplätzen zunehmende Bedeutung erlangen, insbesondere je stärker auch die reale Schnittstelle zur Umwelt vom Computer bestimmt wird (z.B. bei Leitständen).

Die Produktivität des Schreibtischarbeitsplatzes wird in den nächsten Jahrzehnten weiterhin steigen. Immer mehr Hilfsfunktionen, die früher von Mitarbeitern geleistet wurden, werden vom Computer übernommen. Dienstliche/geschäftliche Kommunikation (aber auch Kooperation z.B. am gleichen Dokument) erfolgt zunehmend über Netze von verschiedenen Standorten aus. Während die meisten Konfigurationen sich nicht wesentlich von den heutigen Computerarbeitsplätzen unterscheiden werden, muß man doch auch mit einigen futuristisch anmutenden Neuerungen rechnen. Die in diesem Sinne wahrscheinlich wichtigste neue Gesamtoption für die Gestaltung der Mensch-Computer-Schnittstelle ist die sog. Virtuelle Realität (VR). Darunter versteht man die Erzeugung virtueller (derzeit im wesentlichen graphischer) Welten im Computer, in denen der Betrachter mit Hilfe eines 3-D-Helmbildschirmes und geeigneten Ein-/Ausgabesystemen sich bewegen und agieren kann.

Im militärischen Bereich wird es neben den unmittelbar evidenten Anwendungen im Bereich der Simulatoren insbesondere z.B. bei Stabsarbeitsplätzen zunehmend Funktionen und Abläufe geben, die eine solche VR-Ausstattung interessant machen. Dieser Bereich ist deshalb besonders vielversprechend, weil die Abbildung eines realen Geländes (Karte, Sandkasten) als Teil von strategischer und taktischer Planung für den Soldaten vertraut ist.

Juni 1997 Uwe Wiemken

Computergestützte Planung, Steuerung und Fertigung

Wesentliche Triebfeder für die Entwicklung der Technologien zur Planung, Steuerung und Fertigung ist die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und damit der (internationalen) Wettbewerbsfähigkeit. Dominierende Ursachen sind ökonomische und nicht in erster Linie technische Faktoren. Schlagworte wie Schnelligkeit, Flexibilität, Rohstoffeinsparung und geringe Kapitalbindung im Lager kennzeichnen die Entwicklung zur modernen Produktionsautomatisierung, die sich deutlich von der früheren Fließbandfertigung einheitlicher Massenprodukte unterscheidet.

Langfristiges Ziel ist die vollständig rechnergestützte Steuerung des gesamten Ablaufs (Computer Integrated Manufacturing = CIM) in einer sog. Fabrik der Zukunft, die womöglich wiederum durch den Computer sehr eng mit dem Gesamtunternehmen vernetzt sein wird (Computer Aided Industry = CAI). Strategisches Ziel des CIM-Konzeptes ist, daß alle Daten, die an irgendeiner Stelle des Unternehmens entstanden und eingegeben worden sind, anderen Stellen unverzüglich zur Verfügung stehen und von diesen sinnvoll genutzt werden. Besondere Vorteile verspricht man sich dabei auch von der Flexibilisierung der Produktionsabläufe, wobei der Begriff flexibel hier im Sinne von „programmierbar automatisiert“ zu verstehen ist.

Voraussetzung für die Realisierung eines so verstandenen Ansatzes ist die Einführung konzeptioneller Gesamtsysteme und die konsequente Ablehnung von Insellösungen. Eng verbunden ist diese Entwicklung mit weiteren Fortschritten bei den Informations- und Komunikationstechnologien, also insbesondere bei der Rechnertechnik und der Software. Zum bestimmenden Faktor scheint hier mehr und mehr die Software zu werden, deren Entwicklung vereinfacht und deren Qualität verbessert werden soll.

Heute haben sich im Produktionsbereich bereits verschiedene der sog. CA-Techniken als Teillösungen durchgesetzt. Bedeutsame Bausteine des CIM-Konzeptes sind in erster Linie das rechnergestützte Entwickeln und Konstruieren (Computer Aided Design = CAD), die rechnergestützte Fertigungsvorbereitung (Computer Aided Planning = CAP) und die rechnerunterstützte Qualitätssicherung (Computer Aided Quality Assurance = CAQ). Diese drei Bereiche werden wiederum unter dem Begriff Computer Aided Engineering (CAE) zusammengefaßt. Ein weiterer wichtiger Bestandteil der rechnerintegrierten Produktion ist die rechnergestützte Produktionsplanung und -steuerung (PPS), zu der z.B. Vorkalkulation und Disposition gehören. Von besonderer Bedeutung ist die eigentliche rechnerunterstützte Fertigung (Computer Aided Manufacturing = CAM). Diese umfaßt neben der Maschinen- und Werkstattsteuerung alle mit dem Transport zusammenhängenden Funktionen, von der Lagerung bis zur Fertigung.

Trotz der auf den ersten Blick offensichtlichen Vorteile und trotz der inzwischen zum großen Teil vorhandenen technischen Voraussetzungen stagniert die Integration der beschriebenen CIM-Bestandteile in den meisten Unternehmen. Wesentliche Innovationshemmnisse für eine forcierte Einführung sind - neben durchaus noch vorhandenen technischen Problemen - die fehlende Standardisierung, die hohen wirtschaftlichen Risiken

für den einzelnen Betrieb sowie nicht zuletzt mangelnder Wissens- und Erfahrungsstand im Unternehmen.

Zweifellos ist die Computerunterstützung, also die Anwendung der reinen CA-Techniken, in allen Bereichen eines Fertigungsbetriebes von Vorteil. CIM in der bis vor kurzem noch von vielen favorisierten Form allerdings erfordert die totale Integration in einem zentralistischen Modell. Damit verbunden sind umfangreiche investive und vor allem organisatorische Aufwendungen, die die meisten Fertigungsbetriebe nicht erfüllen können und wollen. So zeigt sich in der Praxis, daß bei einer hohen Integration die Flexibilität sogar abnehmen kann. Probleme gibt es auch mit der aufwendigen Datenpflege, die eine Grundvoraussetzung für das Funktionieren des Systems ist, aber eine erhebliche Disziplin aller CIM-Benutzer erfordert. Aus diesen und ähnlichen Gründen ist heute wieder ein Umdenken und eine bewußte Hinwendung zu Insellösungen in überschaubaren Einheiten festzustellen. Selbstverständlich wird der Computer seine grundlegende Bedeutung für die Fertigung, Steuerung und Planung behalten und ausbauen. Das Organisationsprinzip des hochintegrierten klassischen CIM-Konzeptes dürfte aber wahrscheinlich nur in entsprechend modifizierter Form erfolgreich sein.

August 1996 Jürgen Kohlhoff

Abbildungsverzeichnis

Titelblatt:
oben links: Gina Hillmann, Fraunhofer INT; oben rechts: Fotolia
unten links: MEV-Verlag; unten rechts: MEV-Verlag

Seite 1: Fraunhofer INT
Seite 3: oben: Fraunhofer INT; unten: Fraunhofer INT
Seite 5: Fraunhofer INT
Seite 16: oben: Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR)
Seite 16: unten: Fotolia
Seite 17: Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR)
Seite 68: oben: MEV-Verlag; unten: Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR)
Seite 69: Gina Hillmann, Fraunhofer INT
Seite 94: oben: MEV-Verlag; unten: MEV-Verlag
Seite 95: Fotolia
Seite 134: oben: MEV-Verlag; unten: Fotolia
Seite 135: MEV-Verlag
Seite 160: oben: MEV-Verlag; unten: MEV-Verlag
Seite 161: Fotolia
Seite 188: oben: Fotolia; unten: Fotolia
Seite 189: joujou / PIXELIO
Seite 210: oben: Fotolia; unten: MEV-Verlag
Seite 211: Fotolia
Seite 240: oben: Silberfalke GbR / Christian Belzer; unten: MEV-Verlag
Seite 241: Fotolia
Seite 264: oben: Fotolia; unten: Fotolia
Seite 265: Fotolia
Seite 290: oben: MEV-Verlag; unten: MEV-Verlag
Seite 291: MEV-Verlag
Seite 302: oben: MEV-Verlag; unten: MEV-Verlag
Seite 303: MEV-Verlag
Seite 318: oben: MEV-Verlag; unten: MEV-Verlag
Seite 319: Fotolia
Seite 340: oben: MEV-Verlag; unten: MEV-Verlag
Seite 341: MEV-Verlag

Dieses Buch dokumentiert wesentliche Ergebnisse des Aufgabengebiets Technologiemonitoring am Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (INT) seit Mitte der 1990er Jahre. Nach einer knappen Darstellung der Vorgehensweise zur Strukturierung des Monitoringprozesses am INT wird zunächst ein Überblick der zu beobachtenden technologischen Themenfelder gegeben. Den Hauptteil des Buches bilden über 150 Einzelbeiträge über neue Technologien, die zwischen 1996 und 2009 von Mitarbeitern des INT erarbeitet wurden.

ISBN 978-3-8396-0075-7