



Fraunhofer
INT



Neue Technologien

**Kernthemen des Technologiemonitorings am
Fraunhofer INT zwischen 2009 und 2021**

Michael Lauster
René Bantes
Jürgen Kohlhoff
(Hrsg.)

Michael Lauster | René Bantes | Jürgen Kohlhoff (Hrsg.)

Neue Technologien

Kernthemen des Technologiemonitorings am
Fraunhofer INT zwischen 2009 und 2021

Fraunhofer Verlag

Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen INT
Appelsgarten 2
53879 Euskirchen
Telefon 02251 18-0
info@zv.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.de> abrufbar.

ISBN 978-3-8396-1825-7

Druck und Weiterverarbeitung: Fraunhofer Verlag
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© Fraunhofer Verlag, 2022
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
verlag@fraunhofer.de
www.verlag.fraunhofer.de

als rechtlich nicht selbständige Einheit der

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung
der angewandten Forschung e.V.
Hansastraße 27 c
80686 München
www.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.

Eine wesentliche Kernkompetenz des Fraunhofer-Instituts für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (INT) ist die flächendeckende, systematische und kontinuierliche Technologiefrühaufklärung, um technologische Entwicklungen frühzeitig zu identifizieren und hinsichtlich ihres weiteren Potenzials zu bewerten. Besonders hervorzuheben ist dabei der Anspruch einer flächendeckenden Analyse aller möglichen relevanten Technologieentwicklungen in einem sogenannten 360°-Scanning-Prozess.

Dieses Buch dokumentiert wesentliche Ergebnisse der diesbezüglichen Arbeiten aus den Jahren 2009 bis 2021. Es liefert interessante Erkenntnisse sowohl zu einzelnen Trends als auch zu übergreifenden Fragestellungen der technologieorientierten Zukunftsforschung. Zunächst werden die wesentlichen Aspekte des Scanning- bzw. Monitoringprozesses am INT skizziert. Hier hat es in den letzten Jahren interessante Weiterentwicklungen hin zu einer maschinellen Unterstützung gegeben mit dem Ziel, der zunehmenden Informationsflut Herr zu werden bzw. weiter zu bleiben. Nach der Vorstellung des in diesem Zusammenhang entstehenden Unterstützungssystems folgen im Hauptteil des Buches mehr als 130 Einzelbeiträge über neue Technologien und ihre potenziellen Anwendungen.

Inhalt

Vorwort	8
Technologieanalysen und strategische Planung	10
Neue Technologien erkennen und Verstehen: Knowledge Analytics for Technology and Innovation (KATI)	17
 Beiträge aus 2009	 32
Bioraffinerien	34
Roboterautonomie	37
Mikrosystemtechnik	40
Netzwerkcodierung	43
Selbstheilende Werkstoffe	46
Kernfusion	49
Multirobotersysteme	52
 Beiträge aus 2010	 56
Bionische Sensorik	58
Kognitive Robotik	61
Nano Air Vehicles	64
Klebverfahren	67
Künstliche Immunsysteme in der IT	70
Car-to-X-Kommunikation	73
Nanobasierte Sensoren	76
Drahtlose Energieübertragung	79
3D-Displays	82
Compressed Sensing	85
Bioremediation	88

Beiträge aus 2011	92
Evolutionäre Robotik	94
Text Mining	97
Siliziumcarbid in der Elektronik	100
Homomorphe Verschlüsselung	103
Quantencomputer	106
Eisenbasierte Hochtemperatursupraleiter.	109
Agentenbasierte Modelle	112
Climate Engineering	115
Drahtlose UV-Kommunikation	118
Magnetische Kühlung	121
Neue Werkstoffe für den Korrosionsschutz.	124
Elektromobilität	127
Beiträge aus 2012	130
Alternative Kraftstoffe	132
Biomimetische UUV	135
Redox-Flow-Batterien	138
Neuromorphe Computersysteme	141
Hyperspektrale Bildgebung	144
Dünnschichtsolarzellen	147
Höhenplattformen	150
Massive Metallische Gläser	153
Laufmaschinen	156
Antimikrobielle Oberflächen	159
Exascale-Computer	162
Alternative Antriebe Luft	165

Beiträge aus 2013	168
O TFT-Sensoren	170
Ultraleichte Werkstoffe	173
Computational Photography	176
Künstliche Exoskelette	179
Silent Speech Interfaces	182
Quantenkryptografie	185
3D-Drucker	188
Alternative Antriebe See	191
Physically Unclonable Functions	194
Intelligente Textilien	197
Mikrofluidtechnologie	200
Beiträge aus 2014	204
Bioinspirierte reversible Haftsysteme	206
Kinodynamische Wegplanung	209
Big Data	212
Nanocellulose	215
Künstliche Spinnenseide	218
All-Electric-Aircraft	221
Metall-Luft-Batterien	224
Graphen	227
Deep Learning	230
Transkranielle Stimulation	233
Beiträge aus 2015	236
Automatisiertes Fahren	238
Through-the-Wall Sensing	241
Perowskitesolarzellen	244
Visuelle Navigation	247
Hydrothermale Karbonisierung	250
Structural Health Monitoring	253

Formgedächtnispolymere	256
Aktive Lebensmittelverpackungen	259
Software-Defined Networking	262
Brain-Computer-Interfaces	265
Beiträge aus 2016	268
Digitale holografische 3D-Displays	270
Smart Home	273
Personal Air Vehicles	276
Industrie 4.0.	279
Post-Quantum-Kryptografie	282
Biokunststoffe	285
Roboter-Schwärme	288
Triboelektrische Nanogeneratoren	291
Computerbasiertes Hochdurchsatz-Screening von Werkstoffen	294
Carbon Capture and Usage	297
Beiträge aus 2017	300
Biomimetische Körperschutzwerkstoffe	302
Smart Machines	305
Transiente Materialien	308
Atominterferometrische Trägheitssensoren	311
Memristoren	314
3D-Druck in der regenerativen Medizin	317
Kohlenstoffbasierte Nanokomposite für Strukturanwendungen	320
Hyperschall-Antriebe	323
Electronic Skin	326
Cognitive Computing	329
Metall-organische Gerüstverbindungen	332
Active Debris Removal	335

Beiträge aus 2018	338
Ionische Flüssigkeiten als Werkstoffbasis	340
Genome Editing	343
Künstliche Photosynthese	346
Structural Energy Storage	349
Soft Robots	352
Kognitives Radar	355
High-Entropy Alloys	358
All-Optical Circuits	361
Cyber Reasoning Systems	364
Gradientenwerkstoffe	367
Beiträge aus 2019	370
Synthetische Biologie	372
Non-Line-of-Sight Imaging	375
Biobrennstoffzellen	378
Natural Language Processing	381
High-Speed PVD-Schichtsysteme	384
Blockchains	387
Elektrochrome Energiespeicher	390
Neue Maße für die Welt	393
Personalisierte Medizin	396
Quantenverschränkung in der Technik	399
Wärmeleitende Kunststoffe	402
Beiträge aus 2020	406
On-Orbit Servicing	408
Multi-Domain UXs	411
DNA-Datenspeicher	414
Predictive Maintenance	417
Lidar-on-a-Chip	420
Bioinspirierte Sensoren	423

Living Sensors	426
Adversarial Machine Learning	429
Künstliche Muskeln.	432
Metalinsen	435
Maschinelles Lernen in der Werkstoffentwicklung	438

Beiträge aus 2021	442
Architected Materials	444
Biomimetische UAVs	447
Small Modular Reactors	450
Raumtemperatursupraleiter	453
Lifelong Machine Learning	456
Explainable Artificial Intelligence	459
Bioinspirierte Unterwasserklebstoffe	462
Mikroroboter	465
Living Materials	468
Augmented Sensing	471
Biomimetische Riechsysteme	474
Hochentropie-Keramiken	477

Vorwort

Eine wesentliche Aufgabe des Fraunhofer-Instituts für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (INT) ist die kontinuierliche Beobachtung und Analyse der internationalen Forschungslandschaft, um technologische Entwicklungen frühzeitig zu identifizieren und hinsichtlich ihres weiteren Potenzials zu bewerten. Dafür ist im Institut ein systematischer und kontinuierlicher Technologiefrüh-aufklärungsprozess etabliert.

Alleinstellungsmerkmal des Fraunhofer INT ist dabei der Anspruch einer flächendeckenden Analyse aller möglichen relevanten Technologieentwicklungen in einem sogenannten 360°-Scanning-Prozess.

Ein Ausfluss der diesbezüglichen Arbeit ist eine schon seit 1996 vom Fraunhofer INT gestaltete Rubrik zum Thema „Neue Technologien“ in der Zeitschrift „Europäische Sicherheit und Technik“ (davor „Strategie und Technik“, davor „Soldat und Technik“). Hier werden monatlich Technologiethemen aufgegriffen, die gerade aufscheinen oder aus anderen Gründen einen hohen Aktualitätsgrad haben. Auf den Inhalten dieser

Rubrik basierte eine im Jahr 2009 im Fraunhofer-Verlag erschienene Publikation des Fraunhofer INT mit dem Titel „Neue Technologien“. Das hier vorliegende Buch ist quasi eine Fortsetzung dieser Publikation mit den Beiträgen aus den Jahren 2009 bis 2021.

Zunächst werden in einem ersten Kapitel die wesentlichen Aspekte des Scanning- bzw. Monitoringprozesses am Fraunhofer INT skizziert. Hier hat es in den letzten Jahren interessante Weiterentwicklungen hin zu einer maschinellen Unterstützung des Technologiefrüh-aufklärungsprozesses gegeben mit dem Ziel, der zunehmenden Informationsflut Herr zu werden bzw. weiter zu bleiben. Das in diesem Zusammenhang entstehende Unterstützungssystem KATI wird im zweiten Kapitel vorgestellt.

Der technologisch/inhaltlich orientierte Teil folgt in Kapitel 3, das den Hauptteil des Buches bildet. Hier finden sich mehr als 130 Einzelbeiträge über neue Technologien, die zwischen 2009 und 2021 von Mitarbeitenden des Fraunhofer INT erarbeitet wur-

den. Um ein schnelles Erfassen der Inhalte zu ermöglichen, wurde jedem Beitrag nachträglich eine Kernaussage vorangestellt, die den jeweiligen Inhalt quasi auf den Punkt bringen soll. Zu jedem Beitrag wird außerdem der ursprüngliche Erscheinungsmonat genannt.

Die Abfolge der Beiträge erfolgt in chronologischer Reihenfolge so, wie sie auch erschienen sind. So wird das Buch zu einer Dokumentation unserer im Technologiefrühaufklärungsprozess zum jeweiligen Zeitpunkt gewonnenen Erkenntnisse. Diese sind so oft auch heute noch gültig, insbesondere im Hinblick auf die Erklärung der Funktionsweise oder die Nennung von Anwendungsmöglichkeiten der Technologien. Sie können aber auch inzwischen überholt sein, vor allem, wenn es um die Einsatzreife geht.

Wenn eine Aussage inzwischen nicht mehr gültig ist, hat das in der Regel Ursachen, die wir zum Zeitpunkt des Erscheinens nicht vorhersehen konnten (z. B. zwischenzeitliche politische Entscheidungen zum Herunterfahren der Kernfusionsforschung).

In jedem Fall dürfte das Spektrum der Themen einen guten Überblick über die wichtigsten technologischen Entwicklungen in den letzten 13 Jahren geben. Viele der aufgezeigten grundlegenden Zusammenhänge und langfristigen Trendaussagen haben bis heute ihre Gültigkeit behalten.

An der Erarbeitung der Einzelbeiträge haben folgende Autorinnen und Autoren mitgewirkt (in alphabetischer Reihenfolge mit der Anzahl der beigetragenen Artikel):

Dr. Marie Charlotte Bornhöft	1
Dr. Heike Brandt	7
Dr. Martin Brüchert (geb. Müller)	4
Dr. Joachim Burbiel	1
Dipl.-Ing. Thomas Euting	6
Dr. Diana Maria Freudendahl	9
Dr. Oliver Gabel	1
Dr. Sonja Grigoleit	3
Dr. Carsten M. Heuer	7
Dr. Vanessa Hollmann	4
Dr. Guido Huppertz	5
Dr. Marcus John	7
Dipl.-Phys. Jürgen Kohlhoff	14
Dr. Stefanie Labs	2
Dr. Ramona Langner	8

Dr. Evgenia Lieder	1	rekturlesen – ohne deren engagierte Arbeit
Dr. Karsten Michael	1	hätte dieses Buch nicht erscheinen können.
Dr. Fabrizio Musacchio	1	
Dipl.-Ing. Wolfgang Nätzker	5	
Dr. Ulrik Neupert	5	Euskirchen im Frühjahr 2022
Dr. Claudia Notthoff	3	
Dr. David Offenberg	11	Michael Lauster*
Dr. Britta Pinzger	3	René Bantes**
Dipl.-Ing Stefan Reschke	8	Jürgen Kohlhoff***
Dr. Klaus Ruhlig	14	
Dr. Anna Schulte-Loosen	3	
Peter Sturm, M.Sc.	1	
Dr. Kay Uwe Suwelack	1	
Dr. Dirk Thorleuchter	1	
Dr. Birgit Weimert	2	
Dr.-Ing. Baycan Yildirim	3	

Neben den Autorinnen und Autoren gilt unser besonderer Dank Frau Frederick, Frau Haberlach, Frau Makome und Herrn Büttgen von der Gruppe Marketing und Öffentlichkeitsarbeit des Fraunhofer INT sowie Frau Hecht-Veenhuis und Frau Tuppi von der Bibliothek.

Von der grafischen Gestaltung über die administrative Abwicklung bis hin zum Kor-

* Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. pol. habil.
Michael Lauster leitet das Fraunhofer INT

** Prof. Dr. René Bantes leitet die Abteilung für Technologieanalysen und Strategische Planung im INT

*** Dipl.-Phys. Jürgen Kohlhoff ist als Senior Scientist verantwortlich für die Rubrik „Neue Technologien“

Technologieanalysen und strategische Planung

Die Welt ist komplex, die Abhängigkeiten vielschichtig und die Entwicklung rasant. Unter dem Einfluss mannigfaltiger Veränderungen entwickeln sich gesellschaftliche Aspekte, Normen und Werte, Lebens- und Arbeitsmodelle, Konsum- und Freizeitverhalten. Technologie ist ein zentraler Bestandteil dieser Lebenswelt und technologische Entwicklungen nehmen ebenfalls Einfluss auf unseren Alltag und unsere Zukunft. In diesem komplexen Umfeld müssen Menschen in Positionen mit hoher Verantwortung immer wieder mittel- bis langfristige technologische Weichenstellungen mit potentiell großen Konsequenzen veranlassen, die zwangsläufig mit Unsicherheiten und Risiken verbunden sind. Sie müssen daher kontinuierlich Informationen über aktuelle und Annahmen über antizipierte technologische Entwicklungen in ihre Entscheidungsprozesse einfließen lassen.

Auf diesem Wege wird belastbare und unvoreingenommene Information zu Technologien und deren Zukunft zur wichtigen Ressource in der Handhabung langfristiger, strategischer Planung. Um derartige Informationen bereitzustellen zu können, betreibt das Fraunhofer INT unter verschiedenen Bezeichnungen seit über 40 Jahren einen Bereich für Technologieanalysen und strategische Planungsunterstützung.

Dabei gehen wir von zwei wesentlichen Grundprämissen aus:

1. Die Technologie von morgen ist das Ergebnis der Forschung von heute
2. Technologische Entwicklung ist ein evolutionärer Prozess, der in ein komplexes Umfeld aus mikro- und makroökonomischen sowie gesellschaftlichen Rahmenbedingungen eingebettet ist und von diesen beeinflusst wird

Ausgehend von diesen Grundannahmen haben wir in den letzten Jahrzehnten Verfahren und Methoden der Technologievorausschau, Zukunftsforschung, des Technologie- und Innovationsmanagements und anderer geeigneter Forschungsbereiche aufgegriffen, adaptiert und weiterentwickelt. Auf diesem interdisziplinären, methodischen Grundstock und der überwiegend langjährigen Erfahrung unserer Mitarbeitenden basiert unsere Leistungserbringung in den Bereichen Technologieanalysen und strategische Planungsunterstützung.

Technologie als Begriff ist umgangssprachlich omnipräsent, aber trotzdem ziemlich unklar definiert. Wie grenzt sich Technologie von Technik ab, was hat dies mit Wissenschaft zu tun und wo fangen Produkte an? Als gängige Abgrenzung dieser einzelnen Begriffe hat sich die in Abbildung 1 gezeigte Reihung etabliert:

- Wissenschaft eröffnet Erkenntnisse zu **funktionalen Zusammenhängen**
- Die Identifikation von Wegen, diese Zusammenhänge (Mittel) einem Ziel zuzuordnen, wird als **Technologie** bezeichnet
- Werden – auf dieser Technologie basierend – konkrete Apparaturen/Verfahren zur Realisierung einer Wirkung erschaffen, nennt man dies **Technik**
- Wird diese Apparatur / dieses Verfahren in ein wirtschaftliches Konzept eingebunden (Bepreisung, Vermarktung etc.), wird aus der Technik ein **Produkt**



Grundsätzlich können in der technologischen Zukunftsanalyse unterschiedliche Perspektiven und Zielrichtungen unterschieden werden:

- Technologie-Scanning (oft wird auch „Horizon Scanning“ verwendet):
Die (ungerichtete) Beobachtung des wissenschaftlichen Fortschritts mit dem Ziel, neue Technologie zu identifizieren
- Technologie-Scouting:
Die gezielte Suche nach Technologiekandidaten für einen bestimmten Bedarf
- Technologie-Monitoring:
Die Beobachtung der Entwicklung eines bereits entdeckten Technologiekandidaten

Wenn wir nun von Technologie-Scanning und Technologie-Monitoring reden, meinen wir ganz konkret das Aufdecken, Verstehen und Beobachten von Wegen, die in der Wissenschaft entdeckten Wirkmechanismen in einen Zusammenhang mit einem konkreten Nutzen zu bringen. Daraus ergibt sich, dass wir – um neue Technologien zu identifizieren (Technologie Scouting) – auf der einen Seite die wissenschaftliche Welt beobachten müssen (welche neuen Wirkzusammenhänge werden identifiziert → Technology Push) und auf der anderen Seite die Welt der möglichen konkreten Nutzen (oder technologischer Bedarfe → Capability Pull).

Natürlich ergeben sich nicht aus jeder neuen wissenschaftlichen Erkenntnis automatisch neue Technologien. Dies ist nur der Fall, wenn sich zum identifizierten „Technology Push“ eine (oder mehrere) geeignete potentielle Anwendung(en) identifizieren lassen und dies in einem „Umfeld“ (Innovationssystem) stattfindet, in dem der Adaption einer neuen Technologie nicht zu großen Hürden gegenüberstehen. Die „Technology Push“-Kandidaten müssen hinsichtlich dieses Potenzials analysiert und bewertet werden. Diese Technologie-analyse und -Bewertung ist ein komplexer und vielschichtiger Prozess, der neben einem weitreichenden Verständnis der wissenschaftlichen Grundlagen des Untersuchungsgegen-standes die genaue Kenntnis der Bedarfssituation und der (möglichen) Einflussfaktoren auf die technologische Entwicklung (des Innovationssystems) erfordert. Am Fraunhofer INT setzt sich das Team der Mitarbeitenden, die sich mit Technologieanalyse und -Bewertung befassen, daher aus verschiedenen Fachrichtungen zusammen, die zu großen Teilen lang-jährige Erfahrung im Themenfeld aufweisen.

Sind auf diesem Wege Wirkmechanismen identifiziert, die sich als Ergebnis der Technologie-analyse und -bewertung als potentiell geeignet zur Deckung eines Bedarfes herausgestellt haben, wird für diese Technologiekandidaten im Technologie-Monitoring die weitere Entwicklung beobachtet. Dies umfasst die Identifikation relevanter Akteure, das Erkennen potentieller Einflussfaktoren und deren Analyse und natürlich die kontinuierliche weitere Beobachtung des wissenschaftlichen Fortschrittes in diesem Zusammenhang. Ebenso relevant ist die Berücksichtigung konkurrierender, vor- und nachgelagerter Technologien. Aus dieser Identifikation, Analyse und Beobachtung von Technologiekandidaten können Zukunftsaussagen abgeleitet werden, die abschließend Eingang in unterschiedliche Infor-mationsformate – unsere Produkte – finden.

Die Bausteine dessen, was wir als Technologieanalysen und strategische Planungsunterstützung bezeichnen, lassen sich also wie folgt zusammenfassen:

- Science Observatory: Technologie-Scanning, -Analyse und -Bewertung, Monitoring. Die Fähigkeit, die Welt der Wissenschaft kontinuierlich und umfassend zu beobachten, die daraus gewonnenen Erkenntnisse zu analysieren und die daraus erwachsenden technologischen Potenziale zu verstehen
- Bedarfs- und Innovationssystemanalyse: Die Fähigkeit, Kunden- und Marktbedürfnisse zu erfassen und zu analysieren, die zugehörigen interdisziplinären Einflussfaktoren zu identifizieren und Ihren Einfluss auf die zukünftige Bedarfsentwicklung zu antizipieren
- Foresight zur Unterstützung strategischer Planung: Die Fähigkeit, die auf diesem Wege gewonnenen Erkenntnisse in eine Zukunftsperspektive zu setzen und daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten

Daraus ergibt sich, dass unsere Arbeit den Charakter angewandter Zukunftsforschung hat, einer kontinuierlichen Abfolge von Beobachten der wissenschaftlichen Welt, Analysieren der observierten Neuerungen, Bewerten ihrer Relevanz im Kontext der Bedarfe unserer Auftraggebenden und dem Kommunizieren der Ergebnisse dieses Prozesses.

Science Observatory: Technologie-Scanning, -Analyse und -Bewertung, Monitoring.

Eine gezielte Suche nach neuen Technologien birgt die Gefahr, dass durch Annahmen, die in die Formulierung der Suchanfrage einfließen, das Suchfeld beschränkt wird. Eine Besonderheit unserer Arbeit liegt daher darin, dass wir auf einer kontinuierlichen und ungerichteten Suche aufbauen. Konkret bedeutet dies, dass jedes Mitglied unseres Teams kontinuierlich die Entwicklung von Forschung und Technologie in einem abgegrenzten Wissenschaftsgebiet beobachtet. Dazu gehört es, die herausragenden Forschenden in dem Gebiet zu identifizieren, die „wichtigen“ Journale und Konferenzen zu verfolgen, die zugehörige Förderlandschaft im Blick zu behalten und dabei fortlaufend darauf zu achten, ob sich an irgendeiner Stelle Neues auftut. Diese „Beobachtungsräume“ der einzelnen Mitarbeitenden überlappen einander teilweise, um blinde Flecken zu vermeiden. Aus dieser Suche nach potenziellen technologischen Neuerungen in der wissenschaftlichen Welt erwachsen Innovationskandidaten (Technology Push) auf ganz elementarer Ebene. Diese Kandidaten werden zunächst auf der Basis langjähriger Erfahrung und in einem intensiven Austausch

innerhalb des Teams hinsichtlich ihres funktionalen Potenzials und ihrer „Reife“ bewertet und im Wissensmanagement-System dokumentiert. Darüber hinaus wird die Entwicklung derartiger Innovations-Kandidaten in der Folge kontinuierlich beobachtet.

Methodisch kommen in diesem Bereich unterschiedliche Vorgehensweisen zum Einsatz. Als Datenquelle stehen hier wissenschaftliche Publikationen im Zentrum der Untersuchungen. Die Fachexpertise und Erfahrung der Technologie-Analysierenden wird in steigendem Maße durch quantitative Verfahren der Datenanalyse unterstützt. Steigt die Publikationsrate zu einem Thema plötzlich sprunghaft an, taucht eine technologische Innovation auf einmal in einem ganz neuen Kontext auf, werden Förderprogramme initiiert, die ein bestimmtes Thema voranbringen sollen? Derartige Informationen liefern – über den eigentlichen wissenschaftlichen Fortschritt hinaus – Indizien, die für die Analyse der Entwicklung einer Technologie wichtig sein können.

Um diese Aufgabe angesichts der explosionsartig anwachsenden Menge an Publikationen zu bewältigen, hat das Fraunhofer INT – aufbauend auf mehr als zehn Jahren Erfahrung in der quantitativen Analyse von Publikationsdaten (Bibliometrie) – in den letzten Jahren das hochmoderne Assistenzsystem KATI (Knowledge Analytics for Technology and Innovation) aufgebaut (siehe nachfolgender Beitrag). KATI unterstützt die Mitarbeitenden bei der Suche nach Innovationskandidaten in der wissenschaftlichen Literatur und deren Analyse und Bewertung. Die „klassische“ Vorgehensweise des Desk-Researchs, der Vernetzung in internationalen Fach-Communities und der professionellen wissenschaftlichen Neugierde wird dadurch nicht ersetzt, aber zunehmend effektiver ergänzt. Technologieanalysen und strategische Planungsunterstützung bleibt auch absehbar ein Geschäft, in dem die Erfahrung und Expertise der damit befassten Personen eine zentrale Rolle einnimmt. Dokumentiert werden die Ergebnisse dieser Vorgehensweise durch ein Wissensmanagement-System, das die strukturierte Ablage der Ergebnisse, der zugehörigen Quellen und Analysen sowie weiterer nachgelagerter Informationen ermöglicht.

Eine weitere wichtige Informationsquelle zur Einschätzung und Bewertung der technologischen Potenziale der gefundenen Innovationskandidaten ergibt sich aus der Identifikation und Analyse der zugehörigen „Planungsaktivitäten“. Wer fördert die Forschung und in welchem Maße? Wer beteiligt sich wie an der Erarbeitung von Ergebnissen etc.? Dieses sogenannte Planungs-Monitoring erweitert die technologisch-funktionale Betrachtung und fließt in die Erkenntnisse des Technologie-Monitorings ein.

Durch die Kombination eines multidisziplinären Fachkräfte-Teams und der vorhandenen methodischen Kompetenzen kann das Fraunhofer INT eine flächendeckende Abdeckung nahezu aller wissenschaftlichen und technologischen Domänen garantieren und gleichzeitig die Fähigkeit zur punktuellen fachlichen Vertiefung sicherstellen, wo auch immer eine solche benötigt wird.

Bedarfs- und Innovationssystems-Analyse

Um Aussagen hinsichtlich der potentiellen langfristigen Entwicklung technologischer Innovationskandidaten treffen zu können, ist eine Einbindung in einen Bedarfskontext notwendig. Ein solcher Bedarfkontext entsteht in dem Moment, in dem das funktionale Potenzial eines solchen Kandidaten dem grundsätzlichen aktuellen und antizipierten funktionalen Bedarf potentieller Anwendender entgegengestellt wird. Sobald dies getan ist, können zwischen verschiedenen konkurrierenden Ansätzen zur Realisierung eines Bedarfs Vergleiche gezogen und Entwicklungsstände bewertet werden. Zudem können – wo notwendig – existierende und antizipierte Einflüsse nicht-technologischer Faktoren (wirtschaftliche, infrastrukturelle, kulturelle, rechtliche und ethische Aspekte etc.) eingeschätzt und zu einem Gesamtbild des Innovationssystems zusammengesetzt werden. Die dafür notwendige Kenntnis der Bedarfe in den Bereichen Verteidigung und Sicherheit erwächst im Fraunhofer INT aus der langjährigen Erfahrung in der Zusammenarbeit mit dem Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) und der jahrelangen Betätigung im Bereich der zivilen Sicherheitsforschung und des Krisenmanagements.

Für andere Fragestellungen muss diese Kenntnis jeweils neu erarbeitet werden. Zu diesem Zweck steht uns ein umfangreiches Methodenportfolio zur Verfügung, das neben eher klassischen, etablierten Workshop-Methoden kontinuierlich durch neue Formate wie „Design Thinking“ oder „Serious Gaming“ ergänzt wird. Durch die Kombination dieser Formate mit einem hochgradig interdisziplinären Team an Mitarbeitenden aus Natur-, Geistes- und Sozialwissenschaften decken wir bei der Bedarfsanalyse ein breites Spektrum aus Technologie, Gesellschaft und Wirtschaft ab und erfassen auf diese Weise einen wesentlichen Teil der komplexen Umfeldfaktoren, die für technologische Entwicklungen bedeutsam sind.

Foresight zur Unterstützung strategischer Planung

Aus dem Wissen über technologische Innovationskandidaten und wie sie die aktuellen und antizipierten Bedarfe decken können erwächst die Fähigkeit, Auftraggebende aktiv in strategischen Entscheidungsprozessen zu unterstützen. Szenario-Prozesse oder Competitive Gaming können beispielsweise genutzt werden, um verschiedene Handlungsoptionen strukturiert durchzuspielen und komplexe Wechselwirkungen aufzudecken. Mithilfe von Roadmapping-Ansätzen können technologische Entwicklungen in einen Zusammenhang mit der Entwicklung von „Umfeldfaktoren“ und eigenen Entscheidungen gesetzt werden. Portfolio-Prozesse können genutzt werden, um das eigene Innovationsportfolio transparent zu machen und Handlungsbedarfe beispielsweise für die Planung von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten aufzudecken. Die Wahl der Methode orientiert sich daher sehr stark an dem konkreten Bedarf des Auftraggebenden. Insbesondere in diesem Bereich haben wir unser Methodenangebot in den letzten Jahren erweitert. Durch die vermehrte Zusammenarbeit mit Beteiligten aus der Privatwirtschaft – aber auch durch ein breiter gestreutes Projektportfolio im Bereich der öffentlichen Auftraggebenden – konnten wir so die seit vielen Jahren vorhandenen Kompetenzen nochmals erweitern.

Technologische Entwicklungen und deren wechselseitige Beziehungen mit der Gesellschaft bleiben ein faszinierendes, zunehmend dynamisches und multidisziplinäres Forschungsfeld von hoher Relevanz. Im Zusammenspiel der oben beschriebenen Vorgehensweisen ergeben sich ganz konkrete Unterstützungsangebote, die beim Umgang mit „Entscheidungen unter Unsicherheit“ zur Verfügung stehen. Die Abteilung „Technologieanalysen und strategische Planung“ ist gut aufgestellt, um in dieser komplexen Thematik auch in Zukunft relevante Beiträge zu leisten.

Dr. René Bantes

Neue Technologien erkennen und Verstehen: Knowledge Analytics for Tech- nology and Innovation (KATI)

KATI motiviert

Der Prozess der Technologiefrühaufklärung am Fraunhofer INT geht von der Annahme aus, dass Technologien, die in Zukunft genutzt werden, auf jenen wissenschaftlichen Erkenntnissen basieren, die derzeit in den Labors und Studierstuben rund um den Globus erarbeitet werden. Technologiefrühaufklärung bedeutet in diesem Sinne also das weltweite wissenschaftliche Schaffen zu beobachten und nach aufkommenden neuen Themen oder Durchbrüchen zu durchsuchen. Mittels des am Institut etablierten *Science Observatories* stellen die Wissenschaftler*innen sicher, dass sämtliche Bereiche von Naturwissenschaft und Technik kontinuierlich beobachtet werden.

Neben der klassischen Desk-Research, welche für das umfassende inhaltliche Verständnis eines Themas unerlässlich ist, sind in den letzten Jahren zunehmend quantitativen Methoden in den Fokus des diesbezüglichen methodischen Diskurses gerückt. Dabei geht es um die Frage, wie umfangreiche Datenmengen genutzt werden können, um den Prozess der Technologiefrühaufklärung effizienter zu gestalten und weiterführende Einsichten zu generieren, die der klassischen Desk-Research verborgen bleiben.

Dieses Forschungsfeld wird als *Data Driven Foresight* bezeichnet [1] und umfasst drei verschiedene Aspekte:

- Eine konkrete Fragestellung.
- Eine oder mehrere geeignete Datenquellen
- Verschiedene Verfahren um aus den Daten Information zu extrahieren

Zunächst steht die konkrete zu untersuchende **Fragestellung** im Rahmen eines Foresight Prozesses im Fokus, also beispielsweise die Identifikation neuer Themen. Um diese beantworten zu können, müssen im nächsten Schritt geeignete **Datenquellen** identifiziert werden. Im Kontext der technologieorientierten Zukunftsforschung stützt sich das Fraunhofer INT vor allem auf zwei Informationsquellen:

1. Wissenschaftliche Publikationen

Der wissenschaftliche Fortschritt wird nach Merton [2] nicht nur dadurch vorangebracht, dass Wissenschaftler*innen neue Ideen und Erkenntnisse erarbeiten. Genauso wichtig für den Fortschritt ist es, dass diese kommuniziert werden. Dafür dienen vor allem wissenschaftliche Artikel. Aus diesem Grund stellt die Beobachtung und Analyse der Publikationslandschaft die zentrale Aufgabe des *Science Observatories* dar.

2. Patente

Über die wissenschaftlichen Publikationen hinaus werden neue technologische Entwicklungen, sobald sie einen gewissen Reifegrad erlangt haben, oft patentiert, um das geistige Eigentum, was damit verknüpft ist, zu schützen. Daher bilden Patente eine weitere wichtige Säule des *Science Observatories*.

Um aus diesen Daten nun jene Informationen extrahieren zu können, die für die Technologiefrühaufklärung von Relevanz sind, müssen passende **Verfahren** implementiert und genutzt werden. Hierfür greift man am Fraunhofer INT auf einen umfangreichen Pool an möglichen Methoden aus den Bereichen Bibliometrie, maschinelles Lernen und Natural Language Processing zurück.

Von besonderer Bedeutung für die Anwendung im Foresight Prozess sind auch geeignete Visualisierungen, da oft erst anhand geeigneter Darstellungen Daten im Rahmen einer explorativen Analyse in den Kontext eines Foresight-Prozesses gestellt und interpretiert werden können.

Entlang dieser Philosophie wurde in den letzten Jahren am Fraunhofer INT mit dem KATI-System (Knowledge Analytics for Technology & Innovation) ein wichtiges Assistenzsystem für die Technologiefrühaufklärung entwickelt. Dessen Aufbau wird im nächsten Abschnitt kurz erläutert.

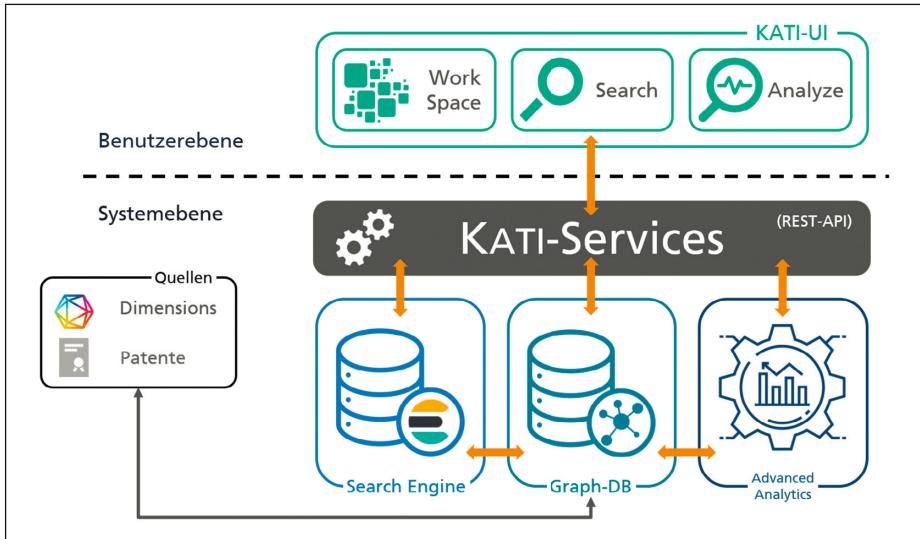


Abbildung 1:
Skizze der Systemarchitektur des am Fraunhofer INT entwickelten KATI-Systems.

Das KATI-System

In Abbildung 1 sind die verschiedenen Komponenten des KATI-Systems dargestellt, die das Ergebnis einer mehrjährigen Entwicklungsarbeit sind. Zentrales Element des Systems ist eine sogenannte Graphdatenbank, in welcher die bibliographischen Daten von mehr als 120 Millionen wissenschaftlichen Publikationen gespeichert sind.

Eine solche Datenbank unterscheidet sich grundlegend von den sonst üblicherweise verwendeten relationalen Datenbanken und ist besonders gut geeignet, um effizient und schnell verschiedene Analysen durchzuführen. Die Datenbank wird durch einen ausfeilten Update-Prozess kontinuierlich auf dem neuesten Stand gehalten, so dass neu erschienene Publikationen immer zeitnah eingefügt werden.

Neue Technologien erkennen und Verstehen: Knowledge Analytics for Technology and Innovation (KATI)

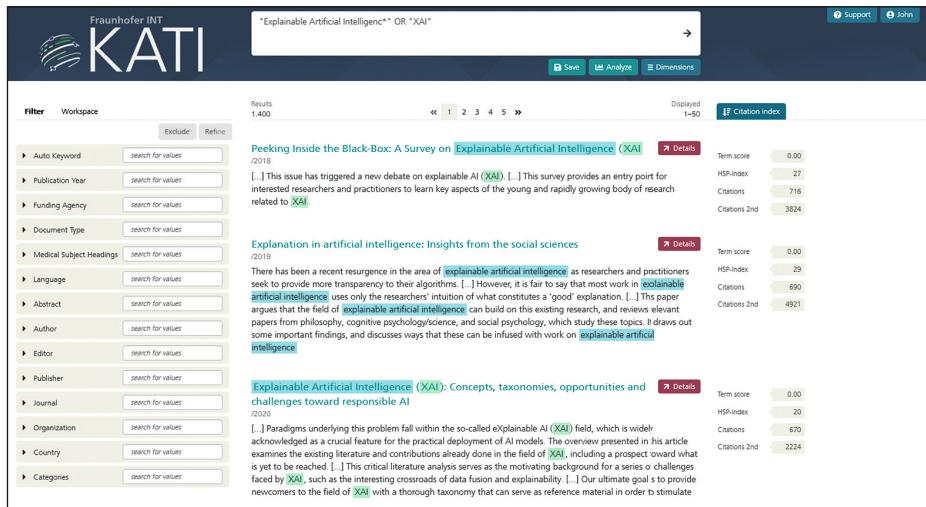


Abbildung 2: Screenshot der Suchseite des KATI-Systems.

Um eine effiziente Suche zu ermöglichen, wird eine spezielle Suchmaschine verwendet, welche es erlaubt komplexe Suchanfragen zu erarbeiten, um ein Thema möglichst gut abzubgrenzen. Die Benutzer*innen selbst greifen über ein intuitiv zu bedienendes und modernes User Interface auf die Daten zu. Dieses gliedert sich im Wesentlichen in zwei zentrale Bestandteile.

Das ist zum einen das Suchinterface, welches in Abbildung 2 dargestellt wird. Dies dient der klassischen Literaturrecherche und besteht aus verschiedenen Komponenten:

1. Ein Eingabefeld, in das eine geeignete Suchanfrage eingegeben wird.
Den Nutzer*innen stehen hier zahlreiche Möglichkeiten zur Verfügung, auch komplexe Suchanfragen zu generieren.
2. Auf der linken Seite befinden sich:
 - a. Ein Workspace, um Suchanfragen und Analysen geordnet abzulegen.
 - b. Ein Filterbereich, um die Ergebnisse einer Suche einzuschränken. So kann man sich bspw. nur jene Artikel anzeigen lassen, die von einer bestimmten Institution publiziert wurden.

3. In der Mitte der Seite erfolgt eine kompakte Darstellung der gefundenen Publikationen. Es werden jeweils der Titel und das Abstract angezeigt.
4. Außerdem verfügt die Suchseite über eine Möglichkeit, die Sortierung der gefundenen Publikationen zu ändern.

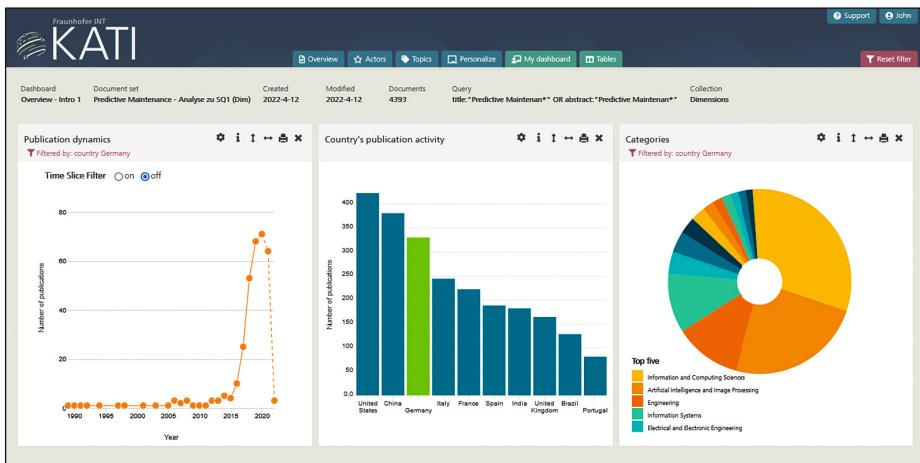


Abbildung 3: Screenshot der Analyse-Seite des KATI-Systems.

Von zentraler Bedeutung für die Arbeit der Abteilung „Technologieanalysen und strategische Planung“ (TASP) ist der zweite Bestandteil des Systems, der Analysebereich des KATI-Systems, von dem in Abbildung 3 ein Screenshot zu sehen ist. Dieser bietet die Möglichkeit, verschiedene Aspekte eines Themas zu betrachten. Einige davon werden im nächsten Abschnitt an Hand zweier exemplarischer Analysen vorgeführt.

Für diesen Bereich setzt das Fraunhofer INT auf ein sogenanntes *Dashboard-Konzept*. Das heißt, es werden verschiedene Metriken gleichzeitig präsentiert. Ferner werden den Nutzer*innen unterschiedliche thematische Sichtweisen auf ein Thema angeboten, so dass sozusagen einen 360-Grad-Blick auf ein Thema möglich ist.

Solche unterschiedlichen Blickwinkel können bspw. darin bestehen, sich für die Akteure zu interessieren die in einem Thema aktiv sind, oder der Frage nachzugehen, was die soge-

nannten Schlüsselpublikationen zu einem Thema sind. Darunter versteht man Publikationen, die besonders gut geeignet sind, um sich in ein Thema einzuarbeiten oder aktuelle Entwicklungen in einem Themenfeld zu identifizieren. Da das KATI-System interaktiv gestaltet ist und man die einzelnen Analysen dafür nutzen kann, die Daten weiter zu filtern, ergeben sich zahlreiche Möglichkeiten für eine explorative Datenanalyse.

Erweitert werden diese noch durch das Konzept der *Advanced Analytics* Komponente des KATI-Systems. Diese erlaubt es, über einen direkten Zugriff auf die Datenbank themen- oder kundenspezifische Fragestellungen zu adressieren, die sich im Rahmen der Projektarbeit ergeben.

Analysen mittels KATI

Um einige der umfangreichen Möglichkeiten des KATI-Systems zu demonstrieren, werden hier exemplarisch zwei der in den nachfolgenden Kapiteln erörterten Themen analysiert. Das ist zum einen das Thema *Predictive Maintenance* (siehe S. 417) und zum anderen das Thema *Explainable Artificial Intelligence* (siehe S. 459). Zu beiden Themen wurden mithilfe des Suchinterfaces entsprechende Suchanfragen erarbeitet, mit denen versucht wird, das jeweilige Thema möglichst genau einzugrenzen. Auf diese Weise wurden im Fall des Themas *Predictive Maintenance* insgesamt 4393 Publikationen gefunden und zum Thema *Explainabel AI* 1400 Artikel. Diese Gefundenen Publikationen werden nun mithilfe der Analyse-Oberfläche genauer betrachtet.

In Abbildung 4 wird zunächst die Publikationsdynamik, d. h. die Anzahl der pro Jahr publizierten Artikel miteinander verglichen. Man erkennt, dass das Thema *Predictive Maintenance* seit 2000 in zunehmendem Maß behandelt wird. Der jährliche Publikations-Output steigt bis etwa 2016 linear an, von 31 Publikationen im Jahre 2000 bis zu 157 Publikationen in 2016. Anschließend nimmt das Thema an Fahrt auf und die Publikationszahlen wachsen rasant.

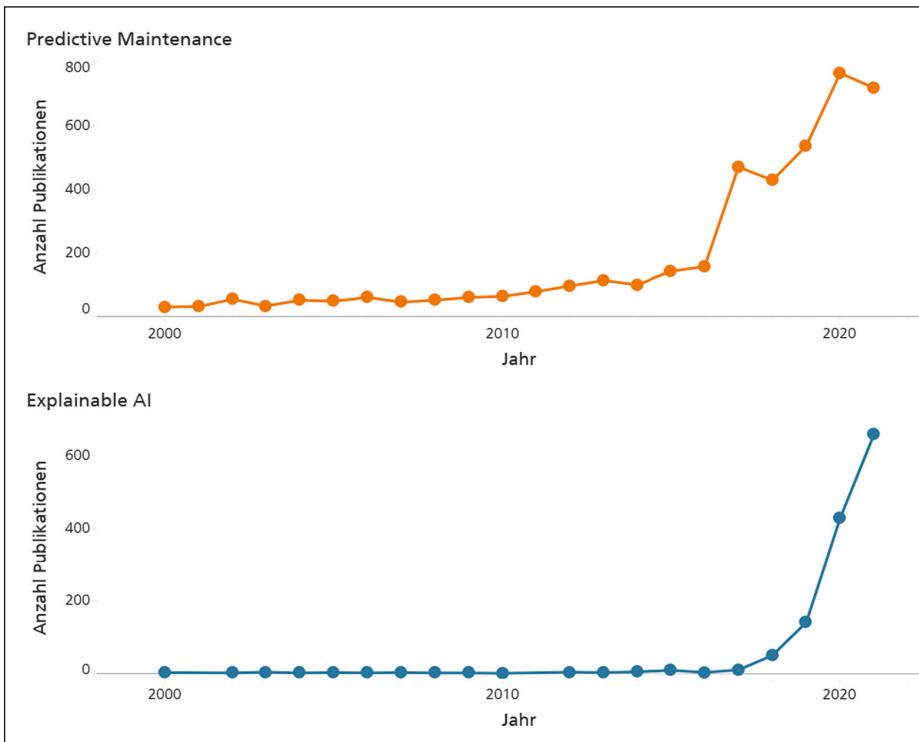


Abbildung 4: Publikationsdynamik für das Thema Predictive Maintenance (oben) und Explainable AI (unten). Die Daten sind nur bis 2021 dargestellt, da jene für das laufende Jahr 2022 noch nicht vollständig sind.

Noch ausgeprägter ist das Wachstum für das Thema *Explainable AI*. Bis zum Jahr 2016 werden zu diesem Thema nur sehr wenige Publikationen veröffentlicht – meist weniger als zehn. Danach setzt ein exponentielles Wachstum ein, so dass 2021 bereits mehr als 660 Publikationen zu diesem Thema veröffentlicht wurden.

Beides sind also sehr aktuelle Themen, allerdings mit unterschiedlichem Charakter. Das Thema *Predictive Maintenance* kündigt sich gleichsam an und köchelt über einige Jahre

hinweg bis etwa 2016 ruhig vor sich hin, bevor das Interesse seitdem zügig anwächst. Das zweite Thema *Explainable AI* hingegen ist in den letzten 2 bis 3 Jahren förmlich explodiert, was auch daran erkennbar ist, dass sowohl 2020 als auch 2021 mehr publiziert wurde, als in allen Jahren zuvor zusammengenommen.

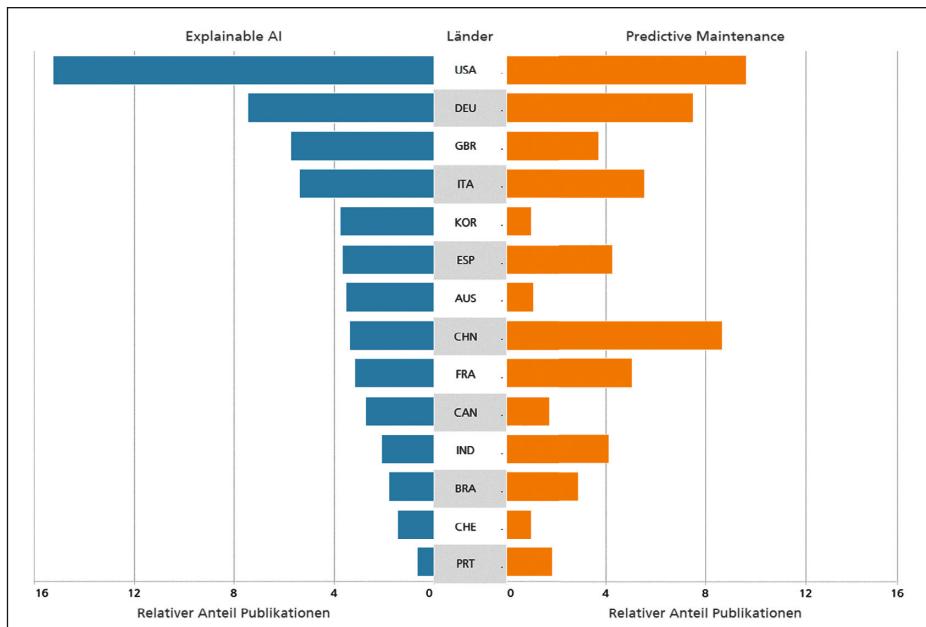


Abbildung 5: Vergleich der Publikationsaktivitäten auf Länderebene für die Themen Explainable AI (links) und Predictive Maintenance (rechts). Die Sortierung der Länder richtet sich nach der Produktivität in ersterem Thema.

Welche Länder sind wie aktiv in den beiden Themen – diese Frage soll mittels Abbildung 5 näher beleuchtet werden. Es fällt zunächst auf, dass die USA in beiden Fällen das produktivste Land sind. Im Falle des Themas *Predictive Maintenance* sind die USA an fast 10 % der Publikationen beteiligt und im Falle von *Explainable AI* sind es sogar mehr als 15 %. Bemerkenswert beim Vergleich dieser beiden Themen ist, dass die USA das letztgenannte Thema dominieren. Deutschland auf Platz 2 hat etwa halb so viele Publikationen wie die USA. Ganz anders stellt sich die Situation für das zweite Thema dar (rechte Seite in Abbildung 5).

Es ist zu sehen, dass hier drei Länder besonders aktiv sind, nämlich die USA auf Platz 1 (knapp 10 % des wissenschaftlichen Outputs), gefolgt von China mit knapp 9 % und Deutschland mit annähernd 8 %. Im Rahmen der Technologiefrühaufklärung ist dies ein wichtiger Aspekt im Hinblick auf die Analyse und Bewertung eines Themas. Wie stark konzentrieren sich die Forschungsaktivitäten auf ein Land oder sind diese eher breitgefächert und verteilen sich relativ gleichmäßig auf mehrere Länder? Bemerkenswert ist ferner, dass China in der Forschung zum Thema *Explainable AI* bislang noch nicht so produktiv ist, wie im Falle von *Predictive Maintenance* – und vielen weiteren Themen. China liegt lediglich auf Platz 8 im Hinblick auf die Produktivität, noch hinter Ländern wie Australien oder Kanada, die nur einen Bruchteil der Bevölkerungsgröße von China aufweisen. Dies ist vor allem auffallend, da China ansonsten im Bereich der Forschung zum Thema künstliche Intelligenz (KI) zu den aktivsten Forschungsnationen gehört.

Abschließend soll noch ein Blick auf die Forschungsinstitutionen geworfen werden, welche die Forschung in den entsprechenden Themen vorantreiben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 für das Thema *Predictive Maintenance* und in Abbildung 7 für *Explainable AI* dargestellt. In beiden Fällen wird auch visualisiert, aus welchen Ländern oder Regionen eine Institution stammt.

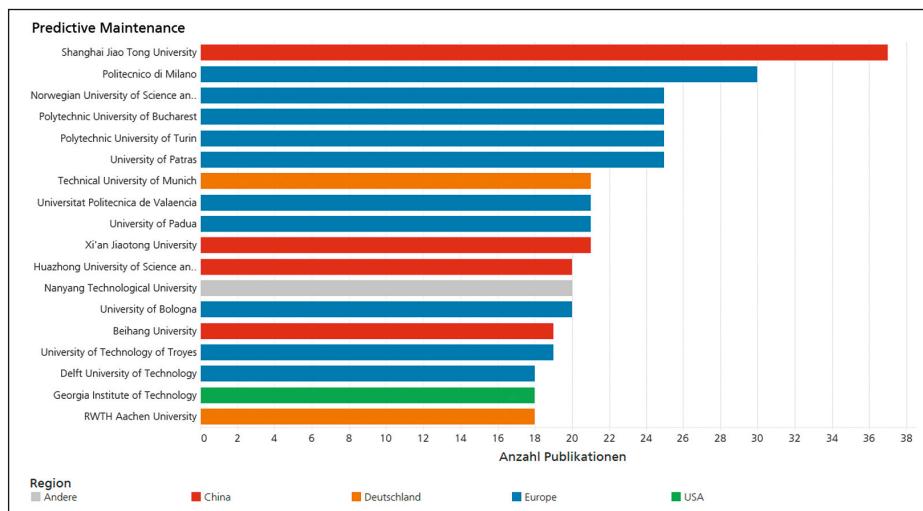


Abbildung 6: Forschungsinstitutionen, die sich mit dem Thema Predictive Maintenance befassen.

Zunächst ist ersichtlich, dass sich die prominente Rolle Chinas beim Thema *Predictive Maintenance* (siehe Abbildung 6) auch auf Ebene der Institutionen widerspiegelt. Unter den Top 15 sind allein vier Institutionen aus China. Die führende Forschungsnation in diesem Thema, die USA, ist nur mit einer Institution – dem Georgia Institute of Technology – unter den Top 15 vertreten, was dafürspricht, dass sich die Forschung dort auf viele verschiedene Institutionen verteilt. Aus Deutschland sind die Technische Universität München sowie die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen als produktivste Forschungsinstitutionen in den Top 15.

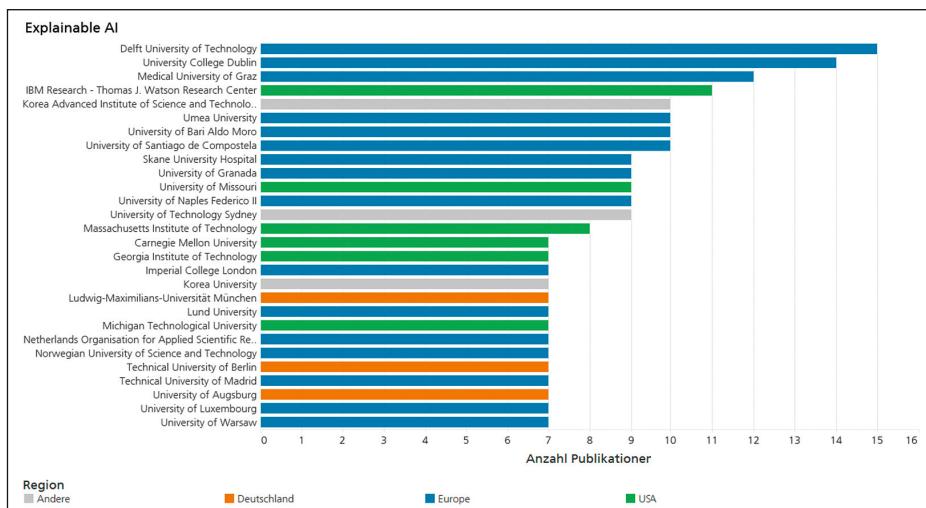


Abbildung 7: Forschungsinstitutionen, die sich mit dem Thema Explainable AI befassen.

Für das Thema *Explainable AI* wird auch auf Ebene der Institutionen deutlich, dass die Forschung zu diesem Thema vor allem in Europa und den USA stattfindet. Die produktivste Universität liegt in Delft in den Niederlanden gefolgt von Dublin (Irland) und Graz (Österreich). Bemerkenswert ist, dass mit dem IBM Research Center in den USA eine Firma unter den Top 5 ist.

Solche Analysen auf institutioneller Ebene sind besonders dann nützlich, wenn es darum geht potenzielle Kooperationspartner*innen oder Expert*innen zu identifizieren, um tiefer

in ein Thema einzusteigen. Auf Länderebene hingegen spielt die Forschungspolitik des betreffenden Landes eine deutlich ausgeprägtere Rolle, weshalb solche Analysen vor allem für die Bewertung eines Themas von Bedeutung sind. Dies ist ein Beispiel dafür, wie eine oben erwähnte *konkrete Fragestellung* die Auswahl der Verfahren und Methoden im Data Driven Foresight determiniert.

Zusammenfassend haben die hier exemplarisch vorgeführten Analysen auf Basis des KATI-Systems vor allem zwei Dinge demonstriert. Zum einen lässt sich mit ihrer Hilfe ein 360-Grad-Blick auf ein Thema generieren, welcher der klassischen Desk-Research verborgen bleibt, und auf diese Weise die Perspektive erweitern. Auf der anderen Seite können sie die inhaltliche Auseinandersetzung mit dem Thema durch die Expert*innen des Fraunhofer INT nicht ersetzen, sondern *nur* ergänzen.

Weiterentwicklung des KATI-Systems

Die Entwicklung des KATI-Systems schreitet kontinuierlich voran. Derzeit befasst sich das Fraunhofer INT damit, es so zu erweitern, dass auch Patente analysiert werden können. Die dafür notwendigen etwa 140 Millionen Patentdaten sind, wie schon die wissenschaftlichen Publikationen, in einer Graphdatenbank abgelegt, welche die Verknüpfung von Patenten mit verschiedenen Attributen, Institutionen und anderen Patenten erleichtert. Da sich die Metadaten, welche mit einem Patent verknüpft sind, maßgeblich von denen einer Publikation unterscheiden, muss das Datenmodell entsprechend abgeändert werden.

Zusätzlich zu einer Gruppe von Autor*innen (bzw. Erfinder*innen) werden beispielsweise die Besitzer*innen eines Patentes festgehalten und statt eines Publikationsdatums gibt es mehrere Daten (sogenannte Events) wie das Antragsdatum oder das voraussichtliche Ablaufdatum, welche ein Patent kennzeichnen.

Entsprechend wird auch das User Interface von KATI für die Suche nach Patenten optimiert. Beispielsweise wird es möglich sein, nach Patentklassen zu suchen und zu filtern. Das gilt vor allem für die Cooperative Patent Classification (CPC) und die International Patent Classification (IPC), welche sich als wichtigste Klassifikationsschemata etabliert haben. Darüber hinaus wird die Analyse der Suchergebnisse, ähnlich der der Publikationen, mit Blick auf verschiedene Use Cases implementiert. Mit Hilfe der Analysen wird es möglich,

auf Patentebene tiefer in Themen einzudringen und Fragen wie „Welche Unternehmen sind führend in einem Gebiet?“ oder „Wie reif ist eine Technologie?“ mittels datenanalytischer Ansätze zu beantworten. In Kombination mit der Publikationsanalyse lassen sich somit umfassende Auswertungen zu spezifischen Use Cases erstellen, welche wiederum Grundlagen zur weiteren Verbesserung von KATI schaffen.

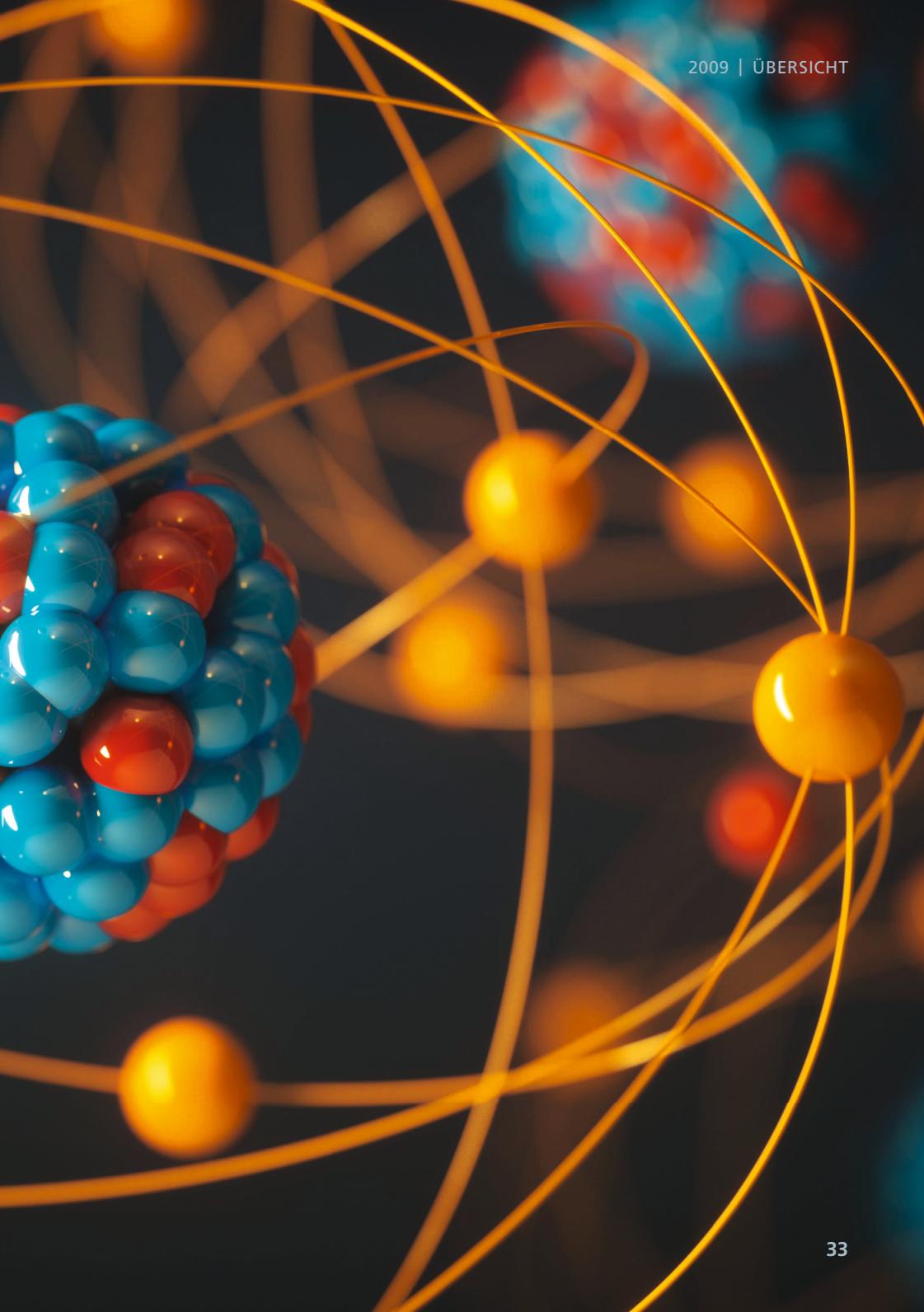
Literatur

- [1] JOHN, Marcus: Data driven foresight – Technologiefrühaufklärung im Zeitalter von Big and Linked Data. Ein Werkstattbericht. In: GAUSEMEIER, Jürgen; BAUER, Wilhelm; DUMITRESCU, Roman (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. Paderborn, 2018 (HNI-Verlagsschriftenreihe, 385), S. 409–421
- [2] MERTON, Robert K.: The sociology of science: Theoretical and empirical investigations. 5th printing. Chicago: University of Chicago Press, 1998

*Marcus John, Beate Becker, Frank Fritsche, Christian Gülden,
Melanie Martini, Sylvia Scheid*

Beiträge aus 2009

Bioraffinerien	34
Roboterautonomie	37
Mikrosystemtechnik	40
Netzwerkcodierung	43
Selbstheilende Werkstoffe	46
Kernfusion	49
Multirobotersysteme	52



Bioraffinerien

Bioraffinerien sind Produktionssysteme zur möglichst umfassenden stofflichen und energetischen Nutzung von Biomasse. Ihre Entwicklung steht besonders in Europa noch am Anfang.

Die Bemühungen um die nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen setzen immer mehr auf die Entwicklung und den Einsatz neuer Hochtechnologien. Eine zunehmende Rolle in diesem Zusammenhang spielen so genannte Bioraffinerien. Das sind Produktionssysteme zur möglichst umfassenden stofflichen und energetischen Nutzung von Biomasse. Es handelt sich dabei um komplexe Anlagen, in denen die Biomasse durch diverse miteinander verzahnte chemische, physikalische und biochemische Prozesse in eine Vielzahl von Produkten umgewandelt wird. Vom Konzept her sind Bioraffinerien an die petrochemischen Raffinerien angelehnt, verwenden aber keine fossilen sondern nachwachsende Rohstoffe. Neben der Nachhaltigkeit hat dieses Vorgehen den weiteren Vorteil, dass nachwachsende Rohstoffe durch klassische Züchtung oder durch den Einsatz gentechnischer Verfahren bereits auf den Zweck der nachfolgenden Verarbeitung angepasst werden können.

Bereits heute werden diverse Grundstoffe wie Stärke, Öl oder Cellulose durch Umwandlung von Biomasse gewonnen. Außerdem werden Kraftstoffe wie Biodiesel oder Bioethanol und einzelne Spezialchemikalien produziert. Zukünftige Bioraffinerien sollen durch komplex vernetzte Produktionsprozesse aus einem Rohstoffmix eine breite Produktpalette von Nahrungsmitteln, Futtermitteln, Chemikalien, Pharmazeutika, Werkstoffen sowie Brenn- und Kraftstoffen erzeugen und die dafür benötigte Energie aus Rückständen und Brenngasen der Produktionsprozesse beziehen. Dazu wird an der Verbesserung einer Vielzahl einzelner Prozesstechnologien gearbeitet. So soll z.B. mit neuen Katalysatoren bei der kontrollierten thermischen Zersetzung von Biomasse die Ausbeute der gewünschten Produkte gesteigert werden.

Derzeit wird eine Reihe von Bioraffineriekonzepten mit spezifischen Vor- und Nachteilen diskutiert, die vor allem durch die unterschiedlichen verwendeten Rohstoffe charakterisiert sind. Die so genannte Lignocellulose-Bioraffinerie verwendet naturtrockene cellulosehaltige Biomassen und Abfälle aus Holz oder Stroh. Die Rohstoffe sind preisgünstig, Produkte sind z.B. Glucose und dessen Fermentationsprodukte. Allerdings besteht hier noch Entwicklungsbedarf, um das enthaltene verhärtete Polymer Lignin, das die Verholzung der Pflanzenteile bewirkt, chemisch oder enzymatisch aufzuspalten und hochwertig verwerten zu können.

Bei der so genannten Grünen Bioraffinerie werden grüne Biomassen (z.B. Gras, Klee oder bestimmte Hülsenfrüchte) verarbeitet. In einem ersten Fraktionierungsschritt wird das Material hier in einen aus Fasermaterial bestehenden Presskuchen sowie Presssaft mit wasserlöslichen Wertstoffen wie Aminosäuren, Proteinen, Zucker und Vitaminen getrennt. Der Presskuchen kann z.B. als eiweißreiches Futtermittel oder Brennstoff dienen. Aus dem Presssaft können Produkte durch Membranverfahren direkt abgetrennt werden. Weitere Erzeugnisse wie die Basischemikalien Milchsäure und Ethanol sind durch zusätzliche Fermentationsschritte herstellbar.

Milchsäure ist eines der wichtigsten Basisprodukte der Bioraffinerie. Sie dient z.B. als Rohstoff für Polymilchsäuren, eine Klasse von durch Wärmezufuhr verformbaren Kunststoffen. Diese sind sehr universell verwendbar, z.B. für Funktionsbekleidung oder Verpackungen. Durch ihre Biokompatibilität und Abbaubarkeit sind sie auch für diverse medizinische Anwendungen wie Implantate oder als Gerüstmaterial für die Züchtung von Gewebe geeignet.

Die Getreide-/Ganzpflanzen-Bioraffinerie nutzt hauptsächlich Ackerfrüchte wie Roggen, Weizen oder Kreuzungen aus diesen Getreiden sowie Mais. Diese Rohstoffe sind vergleichsweise teuer. Das Getreidestroh kann analog zur Lignocellulose-Bioraffinerie verwertet werden. Aus dem Korn lässt sich, wie auch aus Kartoffeln, Stärke gewinnen, welche anschließend z.B. zu Klebstoffen oder Biokunststoffen verarbeitet werden kann.

Der zunehmende Einsatz von Bioraffinerien als Basis einer biobasierten Ökonomie bedeutet auch eine erhebliche Umstellung für die Landwirtschaft. So können durch effizientere Anbauverfahren vor allem in den wenig entwickelten Regionen der Erde noch erhebliche Produktionssteigerungen erreicht werden. Dazu gehören z.B. Pflanzenschutzstrategien

oder Bewässerungstechnologien. Durch das so genannte Precision Farming können landwirtschaftliche Flächen ortsdifferenziert bewirtschaftet werden, um den Unterschieden des Bodens innerhalb eines Feldes Rechnung zu tragen. Verbesserte und an die neuen Rohstoffanforderungen angepasste Sorten bieten weitere Möglichkeiten für eine gesteigerte Ressourceneffizienz.

Die ökologischen Nachteile einer biobasierten Produktion hängen im Wesentlichen mit der intensiven Landnutzung zusammen, die zu Flächenverbrauch, Eutrophierung von Gewässern oder Umweltverschmutzung durch Pestizideinsatz führen kann. Daneben sind der Energieverbrauch sowie die Notwendigkeit weiterer Hilfs- und Produktionsmittel bei Anbau, Transport und in der Bioraffinerie selbst zu sehen. Erste Ökobilanzierungen ergeben, dass die zu erwartenden Umweltauswirkungen im Vergleich zu fossilen Alternativen nur dann günstiger liegen, wenn einige der verwendeten Prozesstechnologien weiter optimiert und alle Synergieeffekte genutzt werden. Insbesondere ist fraglich, ob die derzeit zum Teil forcierte Biokraftstoffproduktion wegen der oft schlechten Ökobilanzen längerfristig ihre Bedeutung erhalten wird. Die allgemeine energetische Nutzung allerdings ist vor allem bei Nebenprodukten und Reststoffen sinnvoll.

Die Entwicklung der Bioraffinerien steht besonders in Europa noch am Anfang. Biobasierte Produkte sind zumeist noch teurer als die petrochemischen Alternativen. In einigen Bereichen ist die Einführung aber bereits erfolgt (z.B. Tenside, Bioschmierstoffe, Biokunststoffe) oder zumindest möglich. Zwar besteht noch großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um alle petrochemischen Produkte ersetzen und in Bioraffinerien ökonomisch herstellen zu können. Mit zunehmender Verknappung bzw. Verteuerung fossiler Rohstoffe wird sich aber zunehmend eine biobasierte Ökonomie entwickeln.

Dr. Ulrik Neupert, Juni 2009

Roboterautonomie

Einer der derzeitigen technologischen Megatrends ist die zunehmende Nutzung automatisierter Verfahren und hier insbesondere der verstärkte Einsatz unbemannter Systeme. Hinsichtlich der Autonomie von Robotern jedoch gibt es weiterhin viele ungelöste Probleme.

Einer der derzeitigen technologischen Megatrends ist die zunehmende Nutzung automatisierter Verfahren und hier insbesondere der verstärkte Einsatz unbemannter Systeme. Das gilt zunächst für den zivilen Sektor, wo Industrieroboter schon seit den 1960er Jahren Verbreitung finden. Dazu kommen immer mehr Serviceroboter für den Einsatz im Dienstleistungsbereich. Aber auch in der Wehrtechnik setzt man zunehmend auf den Einsatz von Robotern. Dabei sind inzwischen einige grundsätzliche Schwierigkeiten z. B. hinsichtlich der Fortbewegung zumindest im Prinzip überwunden. Hinsichtlich der Roboterautonomie jedoch gibt es weiterhin viele ungelöste Probleme. So sind bisher vor allem die für den Einsatz an Land realisierten unbemannten militärischen Systeme immer noch in allen wesentlichen Funktionen ferngesteuert.

Heute tritt die Fähigkeit von Robotern zum selbstständigen intelligenten Handeln immer mehr in den Vordergrund internationaler Forschungs- und Entwicklungsbemühungen. Hier werden zum Teil wieder sehr langfristige Perspektiven diskutiert, nachdem die Erforschung Künstlicher Intelligenz (KI) nach anfänglicher Euphorie zwischenzeitlich in eine Phase der Ernüchterung getreten war.

Der Begriff der Roboterautonomie wird verschieden weit gefasst. Eine extreme Auffassung vertreten die Verfechter der so genannten Technologischen Singularität. Diese sagen für einen Zeitpunkt in einigen Jahrzehnten Roboter voraus, die Bewusstsein entwickeln und selbstbestimmt handelnd vom Menschen nicht mehr unterscheidbar sein sollen. Eine nennenswerte Entwicklungsdynamik in diese Richtung gibt es derzeit aber nicht, so dass heute lebende Menschen die Verwirklichung derartiger Systeme sicher nicht mehr miterleben

werden. Allerdings sind sie aus technologischer Sicht auch nicht für alle Ewigkeit auszuschließen. So gibt es Ansätze aus der theoretischen Biologie, die langfristig mit Methoden und Ergebnissen der Bio- und Nanotechnologie sowie der Kognitionsforschung auch technisch realisierbar sein könnten. Dazu gehören so genannte Evolutionsansätze, bei denen sowohl Hard- als auch Software des Roboters lebenslang durch Lern- und Anpassungsprozesse veränder- und damit optimierbar angelegt werden.

Eine mehr an Gesichtspunkten der absehbaren praktischen Realisierbarkeit orientierte und von einer großen Mehrheit der Fachwelt akzeptierte Definition versteht unter Roboterautonomie die Fähigkeit, in unbekannten Umgebungen ohne weiteren menschlichen Eingriff über gewisse Zeitspannen hinweg zielgerichtet agieren zu können. Bei dieser Definition, mit der oft auch der Begriff der Handlungsautonomie verbunden ist, ist keine Rede von einer Selbstbestimmungsfähigkeit. Entscheidend für den Grad bzw. das Ausmaß der Autonomie eines Roboters sind hier lediglich die Komplexität und Dynamik der Handlungsumgebung, die Komplexität der Aufgabe und die Zeitspanne, über die er ohne menschlichen Eingriff arbeiten kann. Das Ziel des Roboterhandelns ist damit vom Menschen vorgegeben, während seine konkrete Handlungsweise offen gelassen wird.

Es gibt eine ganze Reihe von Technologien, ohne die sich Autonomie von Robotern nicht realisieren ließe. Von besonderer Bedeutung sind die Sensorik sowie die verfügbare Rechenleistung und Energie. In der Praxis erweist sich darüber hinaus die Integration von komplexer Soft- und Hardware im Hinblick auf Zuverlässigkeit und Ausfallsicherheit als hohe Hürde.

Die eigentliche Realisierung der Roboterautonomie erfolgt jedoch in der Software, deren Aufbau und Organisation durch so genannte Kontrollarchitekturen definiert ist. Stand der Technik sind heute hybride Lösungen aus so genannten modell- und verhaltensbasierten Kontrollarchitekturen. Damit ist sowohl die ausführliche Planung des eigenen Handelns in Modellen von der Umgebung („Weltmodelle“) als auch die Fähigkeit zur unmittelbaren Reaktion auf Umgebungsreize gewährleistet. Zusammen mit rechnerbasierten Lernverfahren z. B. auf der Basis künstlicher neuronaler Netze werden mit hybriden Kontrollarchitekturen bereits heute bemerkenswerte Erfolge bei der Erhöhung des Autonomiegrades von Robotern erzielt.

Weitere Verbesserungen sollen die seit einigen Jahren propagierten so genannten probabilistischen Modelle bringen. Hier soll der Einsatz von statistischen Verfahren zu weiteren

Verbesserungen führen, also z. B. die Einbeziehung eines statistischen Modells für die Qualität der Daten eines wichtigen Umgebungssensors des Roboters. Besonders vielversprechend erscheinen darüber hinaus Konzepte, bei denen der Bediener während des Einsatzes stufenlos zwischen Autonomie des Roboters und vollständiger Fernsteuerung variieren kann („adjustable“ oder „sliding“ autonomy). Dazu kommen Mehrroboter-Konzepte, bei denen die Kompetenz zur Lösung einer Aufgabe erst aus dem Zusammenwirken der Einzelsysteme entsteht („Schwarmintelligenz“).

Insgesamt wird die in absehbaren Zeiträumen erreichbare Roboterautonomie von Fachleuten so eingeschätzt, dass unbemannte Systeme in ca. 15 Jahren innerhalb weniger komplexen Umgebungen für spezialisierte Aufgaben über lange Zeiträume hinweg autonom werden agieren können. Dann könnte z. B. ein Serviceroboter umherliegende Gegenstände in einem Kinderzimmer erkennen, klassifizieren und an vordefinierte, frei zugängliche Plätze räumen. Auch sollten Laufroboter zu diesem Zeitpunkt in unwegsamem Gelände über mehrere Kilometer hinweg autonom navigieren und Lasten transportieren können. Für komplexere Umgebungen wird die Entwicklung wahrscheinlich länger dauern. Das gilt z. B. für Haushaltaufgaben wie das Ein- und Ausräumen von Spülmaschinen oder das korrekte Bügeln von Mischwäsche.

Noch viel größere Probleme werden für Szenarien vorhergesagt, in denen der Mensch einen signifikanten Anteil an der Dynamik der Umgebung des Roboters ausmacht und sich nicht nach vordefinierten Verhaltensmustern bewegt. Hier müsste der Roboter ein Modell vom Menschen und seinem Verhalten in allen möglichen Facetten haben und dieses vorhersagen können. Roboterautonomie im Sinne der Befähigung zu einer derart komplexen Interaktion mit dem Menschen dürfte allenfalls sehr langfristig realisierbar sein.

Jürgen Kohlhoff, Juli 2009

Mikrosystemtechnik

Die Mikrosystemtechnik beschäftigt sich mit der Herstellung technischer Systeme, deren funktions- und leistungsbestimmende Strukturen Abmessungen vom Millimeter- bis hinab in den Nanometerbereich haben. Sie gilt heute als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts.

Die Mikrosystemtechnik entwickelte sich seit den 1970er Jahren unter Nutzung etablierter Chip-technologie, fand in den 1990er Jahren ihren kommerziellen Durchbruch und gilt heute als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Sie beschäftigt sich mit der Herstellung technischer Systeme, deren funktions- und leistungsbestimmende Strukturen Abmessungen vom Millimeter- bis hinab in den Nanometerbereich haben. Häufig als Weiterentwicklung der Mikroelektronik auf nichtelektronische Gebiete angesehen, vereint sie diese mit den Technologien der Mikromechanik, Mikrooptik, Mikrofluidik, Mikrosensorik und Mikroaktorik.

Das Fernziel der Mikrosystemtechnik ist es, eine vergleichbare Vielfalt und Leistungsfähigkeit wie die lebender Organismen hervorzubringen und Funktionen wie Wahrnehmen, Bewerten und Handeln zu integrieren. Dafür ist der „technische Organismus“ Mikrosystem mit Sensoren, einer Prozessoreinheit und Aktoren sowie einer Vielzahl von Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten sowie mit seiner Umgebung ausgestattet.

Die rasante Entwicklung und Diversifizierung der Mikrosystemtechnik bezüglich ihrer Anwendungsfelder begründet sich in Eigenschaften wie geringe Abmessungen, niedriges Gewicht und niedriger Energieverbrauch, aber auch in ihrer Multifunktionalität, Wartungsfreiheit, Systemkompatibilität, Zuverlässigkeit und Robustheit. Besonders vorteilhaft ist die Möglichkeit, Fertigungstechnologien der Halbleiterindustrie zu nutzen und so Mikrosysteme in großer Stückzahl parallel und kostengünstig auf einem Substrat herzustellen. Bereits heute finden sie vielfältige Anwendungen, z. B. in Tintenstrahldruckern oder in der Auslösese-sensorik für Kfz-Airbags oder Überrollbügel.

Neben Silizium wird inzwischen eine Vielzahl weiterer Werkstoffe in Mikrosystemen eingesetzt. So gewinnen besonders Polymere durch die Möglichkeit zu freier Formgebung und zum Aufbau flexibler und großflächiger Systeme an Bedeutung. Auch sind hier preiswerte hochdurchsatzfähige Strukturierungs- und Produktionstechnologien nutzbar. Polymer-abgeleitete Keramiken finden wegen ihrer Verarbeitbarkeit, Stabilität und Funktionsfähigkeit unter extremen Bedingungen neue Anwendungsfelder. Die Integration intelligenter Werkstoffe, von Nanomaterialien oder biologischen Elementen wie Antikörpern oder DNA-Fragmenten sind weitere Beispiele.

Zur Herstellung und Strukturierung von Mikrosystemen stehen unterschiedliche Technologien zur Verfügung. Dabei werden neue Technologien zur dreidimensionalen (3D-) Mikrostrukturierung ergänzt durch die aus den Halbleitertechnologien bekannten, üblicherweise planaren, Fertigungsverfahren. Einsatz finden mechanische Fertigungsverfahren, Dünnschichttechnologien, lithographische Verfahren, Ätztechniken und Abformverfahren. Die Opferschichttechnik ist eine weit verbreitete Methode, bei der durch Aufbringen verschiedener Schichten und durch Wegätzen so genannter Opferschichten 3D-Strukturen aufgebaut werden.

Wachsende Bedeutung besitzen so genannte weiche Fabrikationstechniken. So werden bei der Soft-Lithographie zur Strukturerzeugung Stempel statt Strahlung eingesetzt. Zukunftsträchtig ist hier unter Anderem wegen ihrer hohen Präzision die so genannte Nanoimprintlithographie. Eine schnelle Herstellung von 3D-Mikrobauteilen erlauben Mikro-Rapid-Prototyping Verfahren. So lässt sich eine breite Materialpalette an Kunststoffen, Metallen und Keramiken mit Hilfe des selektiven Lasersinterns verarbeiten, bei dem pulverbörmiges Ausgangsmaterial mit dem Laser in Endkontur gehärtet und gesintert wird. Beim Mikrospritzgießen wird eine Paste oder ein Granulat aufgeschmolzen und unter Druck in den Hohlraum eines Werkzeugs gebracht, während beim präziseren Mikroheißprägen ein aufheizbares Abformwerkzeug in das Substrat gedrückt wird. Immer häufiger werden aus atomaren bzw. molekularen Bausteinen komplexe Strukturen gezielt aufgebaut oder molekulare Selbstorganisationsprozesse genutzt.

Seine Funktionalität erreicht das Mikrosystem durch die Integration aller Komponenten zu einem System sowie durch dessen Kommunikation mit der Umgebung. Die einzelnen Komponenten lassen sich im Prinzip auf zwei Arten zu komplexen Systemen zusammenführen. Bei der monolithischen Integration werden die Funktionselemente auf einem

Substrat in einem gemeinsamen Technologieablauf hergestellt, bei der hybriden Integration Bauelemente unterschiedlicher Materialien und Fertigungsprozesse schrittweise auf einem dafür vorbereiteten Substrat vereint. Aufgrund der notwendigen Miniaturisierung werden immer ausgereiftere 3D-Integrationstechniken entwickelt. Zukünftig wird die Mikro-Nano-Integration eine Schlüsselfunktion einnehmen.

Noch einen Schritt weiter geht die drahtlose Vernetzung von einzelnen Einheiten, wie sie z.B. mit dem Smart-Dust- bzw. dem E-Grain-Konzept vorgestellt wurden. Damit sollen sich die Mikrosysteme zu so genannten Smart Systems weiterentwickeln lassen, die es erlauben, Situationen zu beschreiben und zu bewerten, vorausschauend zu entscheiden und mit ihrer Umgebung zu kommunizieren. Die für die Aufnahme und Übermittlung der Messdaten erforderliche Energie wird sich zunehmend aus der Umgebung, z.B. aus Temperaturdifferenzen, Licht oder Vibrationen, gewinnen lassen. Zukünftige Einsatzfelder solcher energieautarker, mobiler Sensorsysteme mit integrierter Signalverarbeitung, deren Bestandteile drahtlos miteinander kommunizieren, liegen z.B. beim Aufbau von Erkennungsnetzwerken für Gegenstände.

Die wehrtechnischen Einsatzmöglichkeiten der Mikrosystemtechnik erstrecken sich im Prinzip über das gesamte Spektrum militärischer Technologien, von der Sensorik über die Energieversorgung bis hin zur Munitionstechnik. Obwohl sich vielfach Dual-Use-Produkte einsetzen lassen, erfordern die extremen Betriebsbedingungen und die hohen Anforderungen an Leistung und Zuverlässigkeit oft aufwändige Eigenentwicklungen. So benötigen militärische Inertialmess- und Zielerfassungssysteme eine um Größenordnungen höhere Genauigkeit bei extremer mechanischer Belastbarkeit, um z.B. in Lenkflugkörpern oder Präzisionswaffen einsetzbar zu sein.

Dr. Birgit Weimert, August 2009

Netzwerkkodierung

Die Netzwerkkodierung ist ein neuer, sich noch im Forschungsstadium befindlicher technologischer Ansatz zur Steigerung der Übertragungsrate in Informationsnetzen, wie z. B. dem Internet.

Die Netzwerkkodierung ist ein neuer, sich noch im Forschungsstadium befindlicher technologischer Ansatz zur Steigerung der Übertragungsrate in Informationsnetzen, wie z. B. dem Internet. Heutiger Stand der Technik bei der Nachrichtenübertragung in solchen Netzen ist das so genannte Routing. Dabei wird die Nachricht eines Senders sukzessive über viele im Netz vorhandene so genannte Router an den Empfänger weitergeleitet. Die Aufgabe dieser Router ist es, jede eingehende Nachricht an einen weiteren Router zu übertragen, der näher am vorgesehenen Empfänger liegt. Auf diese Weise wird jede zu übertragende Nachricht so lange über mehrere Router weitergeleitet, bis sie dem eigentlichen Empfänger zugestellt wird. In der Regel liegt an jedem Router eine Vielzahl von Nachrichten an. Da ein Router diese sequentiell abarbeitet, werden sie eine gewisse Zeit zwischengespeichert, bis sie weitergeleitet werden können. Es existiert kein Routing-Schema, das in der Lage wäre, mehrere Nachrichten gleichzeitig zu übertragen. Dies hat jedoch zur Folge, dass die Übertragungsrate des Netzwerkes, der so genannte Durchsatz, den theoretisch möglichen Maximalwert nicht erreicht.

Die grundsätzliche Idee der Netzwerkkodierung besteht nun darin, sämtliche Router eines Netzwerkes durch so genannte Coder zu ersetzen. Deren Aufgabe ist es, mithilfe eines geeigneten Algorithmus aus allen anliegenden Nachrichten eine einzige neue Nachricht zu erzeugen und diese an viele weitere Coder zu übertragen. Da in die neu generierte Nachricht alle ursprünglichen Nachrichten einfließen, werden somit vom Coder quasi alle anliegenden Nachrichten in „vermischter“ Form gleichzeitig übertragen. Als Folge davon erhalten die einzelnen Empfänger nun nicht mehr nur die für sie bestimmten, sondern „vermischte“ Nachrichten, in denen die ursprünglichen Nachrichten implizit enthalten

sind. In Kenntnis des zur Mischung verwendeten Algorithmus können die Empfänger jedoch aus den „vermischten“ Nachrichten die für sie vorgesehenen rekonstruieren. Da auf diese Weise sämtliche Nachrichten quasi simultan durch das Netzwerk geleitet werden, erhöht sich auch dessen Durchsatz. Es konnte gezeigt werden, dass mittels Netzwerkkodierung das theoretische Maximum des Durchsatzes eines Netzwerkes prinzipiell erreicht werden kann.

Ein weiterer Vorteil der Netzwerkkodierung ist ihre verglichen mit dem Routing erhöhte Robustheit gegenüber Netzwerk- und Übertragungsfehlern sowie böswilligen Angriffen. Da bei der Netzwerkkodierung jeder Coder seine „vermischten“ Nachrichten an eine Vielzahl weiterer Coder überträgt und diese Coder wiederum neue „vermischte“ Nachrichten erzeugen und weiterleiten, kursiert eine Nachricht im Netz auf einer Vielzahl von Übertragungsstrecken, wenngleich jeweils in „vermischter“ Form. Daher gelangen die einzelnen Nachrichten auch dann noch zu ihren vorgesehenen Empfängern, wenn einige der „gemischten“ Nachrichten im Netz verloren gehen, sei es durch Übertragungsfehler, Ausfall von Codern oder gezielte Angriffe auf einzelne Coder oder Übertragungsstrecken. Speziell im Internet gehen derzeit viele Datenpakete verloren, weil Router wegen Defekten oder Wartungsarbeiten ausfallen. Diese Situation erfordert derzeit noch eine Neuversendung der verloren gegangenen Datenpakete, was z. B. die Zeit für das vollständige Herunterladen einer Datei teilweise stark verlängert. Im Falle des Mobilfunks führt diese Problematik zu Gesprächsunterbrechungen oder -abbrüchen. Mit Netzwerkkodierung ließe sich die angesprochene Problematik deutlich verbessern.

Ein großes Anwendungsfeld der Netzwerkkodierung wird bei der Übertragung einer einzigen Nachricht an sehr viele Netzeinnehmer, dem so genannten Multicasting, gesehen. Bei Netzwerken mit Routing ist beim Multicasting eine Vielzahl möglicher Kombinationen von Übertragungswegen zu beachten. Demgegenüber sind Multicasting-Übertragungen unter Nutzung der Netzwerkkodierung relativ einfach zu realisieren, wobei die Anzahl der notwendigen einzelnen Übertragungen gegenüber dem Routing teilweise drastisch gesenkt werden kann. Ein Beispiel für ein typisches Multicasting-Problem ist die Auslieferung einer neuen Software oder einer Softwareaktualisierung über ein Netzwerk. Innerhalb des Projektes Avalanche konnte Microsoft nach eigenen Angaben mit dem Einsatz von Netzwerkkodierung den Netzwerkdurchsatz bei der Übertragung von Software um den Faktor 2 – 3 steigern, was sich in einer deutlichen Verringerung der zum Download benötigten Zeit auswirkte. Da bei Netzwerkkodierung die zu übertragenden Softwareblöcke

mehrfach im Netz kursieren, konnten weiterhin sämtliche Netzteilnehmer selbst bei plötzlichem Ausfall des Microsoft-Servers, der die zu übertragende Software ins Netz einspeist, die gesamte Software herunterladen. Ohne Netzwerkkodierung gelingt dies dagegen nur ein paar Prozent der Teilnehmer.

Bei drahtlosen Netzen verspricht die Netzwerkkodierung bei mobilen Ad-hoc-Netzwerken, so genannten MANETs, großen Erfolg. Ein MANET ist ein drahtloses Netz, das ohne feste Infrastruktur, wie z. B. Basisstationen, operiert und in dem die einzelnen Teilnehmer mobil sind. In einem herkömmlichen MANET agiert jeder Teilnehmer nicht nur als Empfänger, sondern auch als Router. Dies bedeutet prinzipiell, dass jeder Teilnehmer empfangene, aber nicht für ihn bestimmte Nachrichten an benachbarte Teilnehmer weiterleitet. Es konnte gezeigt werden, dass in MANETs speziell bei Rundrufen (Broadcast, dabei überträgt ein Teilnehmer eine Nachricht an alle anderen Teilnehmer) die Netzwerkkodierung zu einer deutlichen Verringerung der Anzahl der benötigten einzelnen Funkübertragungen führt. Dies bedeutet wiederum eine Einsparung von Energie und führt somit zu einer erhöhten Betriebsdauer der Batterien in den einzelnen Funkgeräten. Als besonders vielversprechend wird in diesem Zusammenhang ein neuer Ansatz angesehen, der die Netzwerkkodierung mit dem Einsatz gerichtet abstrahlender Antennen kombiniert.

Thomas Euting, September 2009

Selbstheilende Werkstoffe

Das Konzept der selbstheilenden Werkstoffe soll diesen ermöglichen, nach einer Schädigung ihre strukturelle Integrität und damit im Idealfall die ursprünglichen Belastbarkeitsgrenzen aus sich heraus wiederherstellen zu können.

In vielen Einsatzsituationen verursacht das Versagen von Werkstoffen durch seine Unberechenbarkeit neben einem enormen wirtschaftlichen Schaden häufig auch erhebliche Personenschäden. Jenseits der kontinuierlichen Verbesserung von Werkstoffen an sich und der Vorhersagbarkeit ihres Zeitstandverhaltens wird daher seit über 30 Jahren auch an Möglichkeiten gearbeitet, zufällig auftretende Schädigungen durch den Werkstoff selbst kompensieren zu lassen. Ein altbekanntes Beispiel hierfür ist die Keramik ZTA (Zirconia-Toughened Alumina). Hier werden in die Aluminiumoxidkeramik eingelagerte Zirkondioxidpartikel durch die von einem Riss verursachte lokale Spannungsentlastung zu einer Phasenumwandlung mit Volumenzuwachs angeregt und der entstandene Riss dadurch zumindest teilweise wieder geschlossen. Jedoch werden dabei keine die Festigkeit wieder steigernden chemischen Bindungen neu geknüpft. Einen Schritt weiter geht das Konzept der selbstheilenden Werkstoffe, die nach einer Schädigung ihre strukturelle Integrität und damit im Idealfall die ursprünglichen Belastbarkeitsgrenzen aus sich heraus wiederherstellen können.

Inspiriert durch biologische Vorbilder wurde über die letzten 10 bis 15 Jahre eine Vielzahl von selbstheilenden Werkstoffen, Werkstoffsystemen bzw. -verbunden und Oberflächenbeschichtungen entwickelt. So sind bei Kunststoffen, Betonen und polymerbasierten Oberflächenbeschichtungen für Metalle bereits marktgängige Produkte realisiert. Allerdings befinden sich die Untersuchungen in vielen Bereichen noch im Forschungsstadium.

Prinzipiell verläuft der Selbstheilungsprozess bei Werkstoffen analog zu dem lebender Organismen: Auf das Erkennen der Schädigung folgt die Bereitstellung von heilenden

Wirkmitteln. Vorreiter sind Werkstoffe auf Polymerbasis, da sich bei diesen aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung häufig schon nahe der Raumtemperatur eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Schadensbehebung bietet.

Grundsätzlich lassen sich für die Selbstheilung zwei konzeptionell verschiedene Ansätze unterscheiden: Die autonome und die nicht-autonome Selbstheilung. Das autonome Prinzip ist dem biologischen Vorbild sehr ähnlich. Hier werden systemeigene, also in den Werkstoff integrierte Agenzien als Antwort auf eine Schädigung automatisch freigesetzt, die ohne weitere Einwirkung von außen das Material wieder voll funktionsfähig machen. Bei fast allen derzeit bekannten autonomen Systemen ist jedoch die Selbstheilung an ein und derselben Stelle prinzipbedingt jeweils nur einmal möglich. Der nicht-autonome Ansatz dagegen benötigt einen von außen kommenden „Heilreiz“ wie z.B. Wärmezufuhr oder UV-Strahlung, um die Reparatur zu initiieren. Hierdurch wird, im Gegensatz zur autonomen Selbstheilung, eine extern kontrollierbare Instandsetzung möglich.

Bei autonomen selbstheilenden Werkstoffsystemen sind üblicherweise reaktive Agenzien in das Werkstoffvolumen integriert. Grundprinzip ist, dass Reservoirs dieser meist flüssigen Stoffe homogen über das Werkstoffvolumen verteilt sind. Diese werden durch den Schadenseintritt am entstehenden Defekt geöffnet und setzen dabei den Stoff exakt an der benötigten Stelle frei. Dadurch werden die entstandenen Rissflächen mit dem Wirkmittel benetzt und nachfolgend chemisch miteinander verbunden. Ein typisches Beispiel hierfür sind Werkstoffe auf Epoxidharzbasis, die Mikrokapseln mit flüssigen Monomeren enthalten. Sehr ähnlich ist das Prinzip des korrosionshemmenden Stahlbetons, in den basenhaltige Polymerkugeln dispergiert werden. Diese setzen ihren Inhalt bei einem bestimmten pH-Wert im Baukörper, ab dem die Korrosion der Stahlarmierung beginnt, frei und sollen diese so vor Schädigung schützen.

Um den Nachteil der nur einmaligen Reparaturfähigkeit pro Ort zu umgehen, wurden bereits Versuche mit monomer gefüllten Hohlfasern sowie dreidimensionalen Röhrchen-Netzwerken, die aus einem gemeinsamen Reservoir beschickt werden, durchgeführt. Mit der Integration solcher Strukturen geht jedoch oftmals eine Schwächung der makroskopischen Festigkeit einher.

Das Konzept der autonomen Selbstheilung wurde inzwischen auch auf metallische Werkstoffe übertragen. Impulse dazu kommen überwiegend aus dem Bereich der

Panzerungswerkstoffe. Hier werden z. B. mikroskopisch kleine dünnwandige Hohlkugeln mit niedrig schmelzenden Metallen wie Aluminium oder Magnesium gefüllt und in einer Stahlmatrix homogen verteilt. Trifft ein Geschoss mit hoher Energie auf den Panzerungswerkstoff, wird diese zum Teil auch in Hitze umgewandelt. Die beim Aufschlag entstehenden Risse können dann durch die aus den in der Einschlagzone zerstörten Hohlkugeln austretende Metallschmelze zu einem Gutteil wieder gefüllt und stabilisiert werden. Davon verspricht man sich eine Verbesserung der so genannten Multi-Hit-Wirksamkeit der Panzerung gegen weitere Treffer. Ähnliche Untersuchungen gibt es seit kurzem auch im Bereich keramischer Werkstoffe.

Wichtigstes Charakteristikum nicht-autonom selbstheilender Werkstoffe ist das Vorliegen reversibler und/oder dynamischer chemischer Bindungen, die von außen gezielt steuerbar sind. Diese Werkstoffe liegen in Abhängigkeit von ihren Umgebungsbedingungen entweder in vernetzter polymerer Form oder in monomolekularem Zustand vor.

Hierzu gehören so genannte Ionomere, eine Form von Thermoplasten, die zu einem gewissen Anteil aus ionisch gebundenen Baugruppen aufgebaut sind. Bei Erwärmung trennen sich zuerst die ionischen Bindungen dieses Materials, danach schmilzt gegebenenfalls der Kunststoff bei Temperaturen zwischen ca. 290 °C und 350 °C. Beim Abkühlen formt sich die ursprüngliche Struktur unter Ausbildung ionischer Bindungen zurück. Hier können Verletzungen des Werkstoffs also durch von außen zugeführte Wärme und anschließendes Abkühlen gezielt ausgeheilt werden. Ähnlich, aber in einem tieferen Temperaturbereich von ca. 100 °C bis 150 °C, können sich selbstheilende Polymere nach dem Prinzip der schwächeren kovalenten Bindungen verhalten. Hier gibt es bereits eine Vielzahl nutzbarer Polymere und chemischer Reaktionsmechanismen. Von steigendem wissenschaftlichen Interesse sind heute über so genannte koordinative Bindungen an Metalle gebundene Polymere, weil sie aufgrund ihrer relativ schwachen Wechselwirkungen von ausgeprägt reversibler Natur sind und durch Energiezufuhr von außen gesteuert werden können.

Stefan Reschke, Oktober 2009

Kernfusion

Mit dem internationalen Großprojekt ITER kommt die Forschung auf dem Gebiet der Kernfusion jetzt in eine Phase, in der es nicht mehr nur um die Klärung grundlegender Fragestellungen geht. Stattdessen rücken mehr und mehr Fragen der technischen Realisierbarkeit mit dem Ziel der Energiegewinnung in den Fokus.

Seit in den dreißiger Jahren des vorigen Jahrhunderts erkannt wurde, dass die Sonne ihre Energie aus der Verschmelzung von Atomkernen gewinnt, möchte man eine entsprechende Energiequelle auch auf der Erde nutzbar machen. Ihre Vorteile gegenüber konventionellen oder auf der Kernspaltung basierenden Technologien lägen insbesondere bei der Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen und der damit wegfallenden Emission von Kohlendioxid. Ferner entfielen die Probleme mit derendlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle.

Die Beurteilung der Zukunftsaussichten der Kernfusion als Energiequelle fiel anfangs sehr optimistisch aus. Bald gab es jedoch eine Phase der Ernüchterung, weil zahlreiche Probleme grundlegender Natur gelöst werden mussten. Heute tritt die technische Nutzung der Kernfusion wieder stärker in den Blickpunkt. Mit dem internationalen Großprojekt ITER kommt die Forschung auf diesem Gebiet jetzt in eine Phase, in der es nicht mehr nur um die Klärung grundlegender Fragestellungen geht. Stattdessen rücken mehr und mehr Fragen der technischen Realisierbarkeit mit dem Ziel der Energiegewinnung in den Fokus. Die Bezeichnung ITER war ursprünglich als Abkürzung von „International Thermonuclear Experimental Reactor“ gedacht, wird heute aber nur noch als das lateinische Wort iter, „der Weg“, interpretiert. Mit dem Bau des ITER-Versuchsreaktors wurde inzwischen begonnen.

Es hat sich herausgestellt, dass die Fusion von Deuterium und Tritium, zweier Wasserstoffisotope mit einem bzw. zwei zusätzlichen Neutronen, die geeignete Fusionsreaktion für die Energiegewinnung ist. Weil sich die positiv geladenen Atomkerne gegenseitig abstoßen, müssen die Reaktionspartner mit sehr hoher Geschwindigkeit aufeinandertreffen, damit sie sich so nahe kommen, dass sie miteinander verschmelzen können. In Fusionsreaktoren

wird dies durch Temperaturen von 100 bis 150 Millionen Grad Celsius erreicht. Verschmelzen ein Deuterium- und ein Tritiumkern miteinander, so bilden sich ein Heliumkern und ein Neutron. Deren Masse ist etwas geringer als die Masse der Ausgangskerne. Die Massendifferenz wird in Energie umgewandelt. Dabei wird wesentlich mehr Energie frei als in chemischen Reaktionen, wie sie bei der Verbrennung z. B. von Kohle stattfinden. Ein Kohlekraftwerk, das 1000 MW Leistung liefert, benötigt hierfür etwa 2.7 Millionen Tonnen Kohle pro Jahr. Ein Fusionskraftwerk gleicher Größe verbrauchte lediglich jeweils 125 kg Deuterium und Tritium. Dabei ist Deuterium in der Natur in ausreichenden Mengen vorhanden, während Tritium im Reaktor selbst erzeugt werden muss (s. u.).

Bei den benötigten hohen Temperaturen liegt die Materie im Fusionsreaktor komplett ionisiert als Plasma vor. Weil es kein (Wand-)Material gibt, das so hohen Temperaturen widerstehen könnte, ist ein technisches Problem der Einschluss eines derart heißen Plasmas. Im geplanten Reaktorraum von ITER wird das Plasma mittels Magnetfeldern, die die Form eines Torus haben, auf geschlossene Bahnen gezwungen. Diese toroidale Konfiguration wird mittels des so genannten Tokamak-Konzepts verwirklicht. Dabei wird das gewünschte Magnetfeld durch ringförmige Spulen erzeugt, die zu einem Torus zusammengefügt werden. Hier kommt es jedoch zu komplizierten Wechselwirkungen zwischen dem Plasma und dem äußeren Magnetfeld, weil sich bewegende geladene Teilchen ihrerseits ein Magnetfeld erzeugen. Das Verständnis dieser Prozesse mit dem Ziel, ein Plasma möglichst lange einschließen zu können, war eine der Hauptaufgaben der Fusionsforschung der letzten Jahrzehnte. Auch wenn sie inzwischen soweit verstanden sind, dass eine technische Realisierung der Energiegewinnung mittels Kernfusion möglich erscheint, sind einige Probleme ungeklärt, zu deren Lösung ITER beitragen soll. Erklärtes mittelfristiges Ziel dabei ist, das Plasma für etwa 8 Minuten einzuschließen. Der derzeit beste Wert für die sogenannte Einschlusszeit liegt bei knapp 30 Sekunden.

Für die großtechnische Stromerzeugung mittels Kernfusion ist ein kontinuierlicher Betrieb des Reaktors nötig. Das ist ein zur Zeit noch nicht gelöstes Problem. Dazu müssen nach der Aufheizung z. B. durch die Induktion eines Stromes innerhalb des Plasmas ab einer bestimmten Temperatur genügend Fusionsreaktionen ablaufen, um über die Abgabe der Bewegungsenergie der entstehenden Heliumkerne an das Plasma den Betrieb aufrechtzuerhalten. Eine weitere Heizung ist dann nicht mehr nötig und es kann Energie erzeugt werden. Dies geschieht in den sogenannten Blankets, die sich im Reaktormantel befinden. Sie haben im Gesamtkonzept eine wichtige Funktion. Zum einen schirmen sie die Außenwelt

gegenüber den bei der Fusion entstehenden Neutronen ab und wandeln deren Energie in Wärme um, die schließlich für die Stromerzeugung benutzt wird. Ferner soll in den Blankets, die Lithium enthalten werden, das für die Kernfusion notwendige Tritium erzeugt und über diverse Zwischenschritte in die Fusionskammer injiziert werden. Bisherige Fusionsexperimente arbeiteten ohne Blankets, so dass deren Entwicklung und Erprobung eine Schlüsselrolle zukommt.

Auch an die anderen Materialien, aus denen der Reaktor aufgebaut sein wird, werden besondere Anforderungen gestellt. So sind diese im Inneren des Reaktors erheblichen Wärmeflüssen und einem ständigen Beschuss mit Neutronen ausgesetzt. Ferner müssen die Magnetspulen aus supraleitenden Materialien hergestellt werden, um aus der Fusion mehr Energie gewinnen zu können, als für Heizung und Magnetfeld benötigt werden. Im Rahmen des ITER-Projektes wird angestrebt, erstmals mehr Energie zu produzieren, als für den Betrieb des Reaktors nötig ist. Für eine kommerzielle Nutzung der Kernfusion müsste etwa zehnmal so viel Energie erzeugt werden, wie benötigt wird. Nach derzeitigem Stand des Wissens ist dies möglich.

Der ITER-Reaktor wird nicht vor 2018 voll funktionsfähig sein. Aufbauend auf den hier erarbeiteten Lösungen soll parallel zum Betrieb von ITER ab etwa 2020 am Design eines ersten Prototyps für ein kommerzielles Fusionskraftwerk gearbeitet werden. Sollte alles erfolgreich verlaufen, könnte ab der Mitte dieses Jahrhunderts Strom aus Fusionskraftwerken ins europäische Stromnetz eingespeist werden.

Dr. Marcus John, November 2009

Multirobotersysteme

Durch Kooperation der verschiedenen Roboter untereinander sollen Multirobotersysteme Arbeiten bewältigen können, die für ein Einzelsystem teilweise nur schwierig oder sogar unmöglich zu erledigen sind. Dabei existiert üblicherweise keine externe Kontrollinstanz, sondern die Roboter führen ihre jeweiligen Einzelaufgaben vollständig autonom durch.

Sowohl für zivile Anwendungen als auch für die Ausrüstung von Streitkräften wird Robotern bzw. unbemannten Systemen für die Zukunft eine noch einmal deutlich steigende Bedeutung vorhergesagt. Ein aktuelles Forschungsthema in diesem Bereich ist die Steigerung der Gesamteffektivität durch das Zusammenwirken einzelner Roboter in Form von Multirobotersystemen. Dabei existiert üblicherweise keine externe Kontrollinstanz, sondern die Roboter führen ihre jeweiligen Einzelaufgaben vollständig autonom durch.

Durch Kooperation der verschiedenen Roboter untereinander sollen Multirobotersysteme Arbeiten bewältigen können, die für ein Einzelsystem teilweise nur schwierig oder sogar unmöglich zu erledigen sind. Außerdem bietet ein solches Team eine gewisse Redundanz, da beim Ausfall eines Teammitglieds vielfach die dann noch verbleibenden Roboter den Auftrag zu Ende führen können. Weiterhin besteht die Aussicht, dass Multirobotersysteme eine Arbeit häufig schneller als ein Einzelsystem erledigen können, da sich dann mehrere Aufgaben parallel zueinander ausführen lassen. Darüber hinaus kann es auch kostengünstiger sein, anstatt eines einzelnen großen Roboters mehrere kleine einzusetzen.

Das kooperative Verhalten der einzelnen Roboter eines Multirobotersystems basiert häufig auf einem geeigneten Kommunikationsmechanismus. In diesem Zusammenhang kann man zwischen einer expliziten und einer impliziten Kommunikation unterscheiden. Unter einer expliziten Kommunikation versteht man hierbei ein bestimmtes Vorgehen, das ausschließlich der Übermittlung von Informationen an andere Roboter dient. Üblicherweise wird hierzu eine spezielle Kommunikationshardware in die Roboter integriert, z.B. eine drahtlose Kommunikationstechnik auf der Basis von Funk. Eine implizite Kommunikation erfolgt

dagegen als ein Nebeneffekt von anderen Handlungen, d. h. auf der Grundlage von Veränderungen in der Umgebung. So muss z.B. ein Multirobotersystem beim Mähen eines Rasens nicht unbedingt über eine explizite interne Kommunikationsmöglichkeit verfügen, wenn jeder Roboter feststellen kann, welche Stellen des Rasens bereits gemäht wurden und welche nicht. Implizite Kommunikationsmechanismen sind typischerweise robuster, da hier z.B. kein Funkverkehr gestört werden kann, wobei sie jedoch häufig schwieriger zu verwirklichen sind.

Darüber hinaus lassen sich Multirobotersysteme in homogene und heterogene Systeme unterteilen. Homogene Systeme bestehen aus sowohl im Hinblick auf ihre Hardware als auch die steuernde Software exakt gleichen Robotern. Bei heterogenen Systemen hingegen können sich die Roboter sowohl in Bezug auf die Hardware als auch die Software voneinander unterscheiden. So kann die Roboterhardware z.B. hinsichtlich der eingesetzten Sensorik oder Aktorik voneinander abweichen. Heterogene Systeme können sich vielfach einfacher an variierende Einsatzbedingungen anpassen. Allerdings gestaltet sich die Realisierung der zur Steuerung der Roboter erforderlichen Software normalerweise aufwändiger. Während sich die Forschungsarbeiten ursprünglich hauptsächlich auf homogene Systeme konzentrierten, finden mittlerweile auch zunehmend heterogene Systeme Beachtung.

Multirobotersysteme sollen sich für eine Vielzahl von Anwendungen eignen. Hierzu zählen unter anderem der gemeinsame Transport von Gegenständen, z.B. im Rahmen der Be- und Entladung von Fahrzeugen, oder die Fertigung bzw. der Aufbau von Objekten. Eine weitere Einsatzoption stellt die Erkundung von Gebieten dar, z.B. mit Hilfe von unbemannten Luftfahrzeugen. Multirobotersysteme besitzen dabei den Vorteil, dass sie ein größeres Gebiet abdecken können als ein Einzelsystem. Neben reinen Aufklärungsmissionen kann hier ein mögliches Ziel auch darin bestehen, in einer geeigneten Weise mit dabei aufgefundenen Objekten umzugehen. So können z.B. Personen bei Such- und Rettungsaktionen mitgenommen oder entdeckte Minen geräumt werden. Eine weitere denkbare Anwendung besteht in der gemeinsamen Beobachtung von mehreren, sich bewegenden Zielobjekten, beispielsweise im Rahmen der Überwachung von Personen.

Derzeit befinden sich Multirobotersysteme im Wesentlichen noch im Forschungsstadium. Eine wichtige Möglichkeit zur Beurteilung von Fortschritten bieten Fußballturniere des so genannten Robocups. Diese zeichnen sich durch dynamische Umgebungsbedingungen aus und stellen hohe Anforderungen aufgrund des Vorhandenseins gegnerischer Teams.

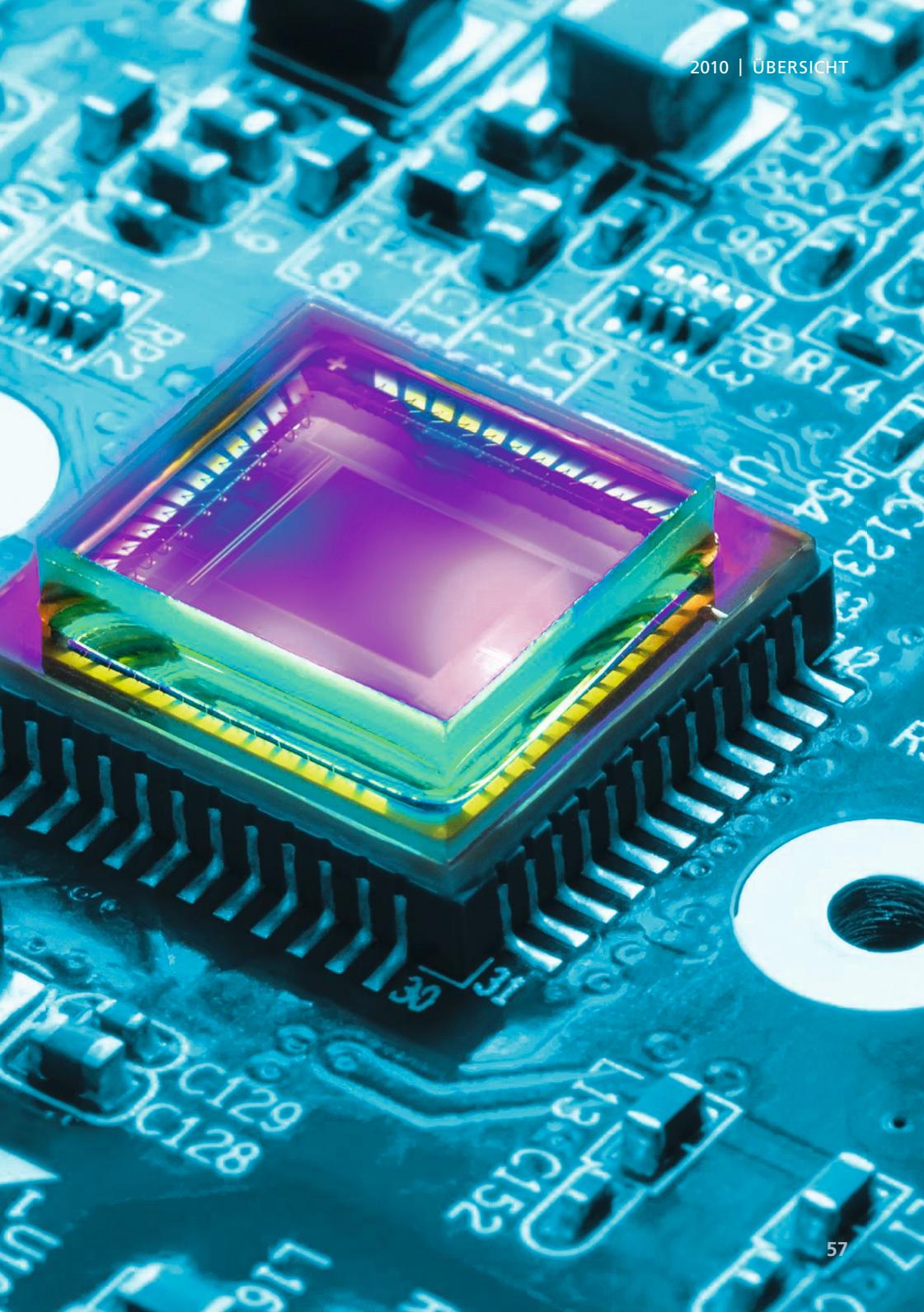
Ein wichtiger Forschungsaspekt ist die Art und Weise, wie ein bestimmtes kooperatives Vorgehen innerhalb eines Teams von Robotern technisch erzielt werden kann. Einen relativ neuen Ansatz stellt in diesem Zusammenhang die so genannte Schwarmrobotik dar. Als Vorbild dient hierbei das kollektive Verhalten von sozialen Insekten, wie z.B. Ameisen oder Bienen, sowie anderen Tieren mit ähnlichen sozialen Strukturen, wie z.B. Vogelschwärmen oder Wolfsrudeln. Diese biologischen Systeme zeigen alle eine so genannte Schwarmintelligenz, bei der ein komplexes Systemverhalten aus den Interaktionen von mehreren Akteuren untereinander entsteht, deren Einzelhandlungen jeweils auf vergleichsweise einfachen Regeln basieren. Andere Ansätze orientieren sich z.B. an marktwirtschaftlichen Prinzipien, um dadurch das Verhalten der einzelnen Roboter eines Multirobotersystems zu koordinieren. Die jeweiligen Roboter verfolgen hierbei gewissermaßen in einer virtuellen Ökonomie ihre eigenen Interessen. Auf diese Art sollen solche Systeme von der Effizienz und Flexibilität einer Marktwirtschaft profitieren.

Ein weiteres aktuelles Forschungsgebiet mit möglicherweise interessanten militärischen Anwendungen stellen Multirobotersysteme dar, bei denen sich die Einzelsysteme eigenständig zu neuen Strukturen zusammensetzen können, indem sie sich auf eine bestimmte Art miteinander verbinden. So kann beispielsweise durch Hintereinanderreihung der Roboter eine Form von Zug entstehen. Derartig rekonfigurierbare Systeme sollen unter anderem Vorteile in einem unwegsamen Gelände aufweisen, da sie dort gemeinsam z.B. Hindernisse wie Gräben oder Treppen einfacher überwinden könnten.

Dr. Klaus Ruhlig, Dezember 2009

Beiträge aus 2010

Bionische Sensorik	58
Kognitive Robotik	61
Nano Air Vehicles	64
Klebverfahren	67
Künstliche Immunsysteme in der IT	70
Car-to-X-Kommunikation	73
Nanobasierte Sensoren	76
Drahtlose Energieübertragung	79
3D-Displays	82
Compressed Sensing	85
Bioremediation	88



Bionische Sensorik

Charakteristisch für Bionische Sensoren ist, dass sie die Funktionsweise biologischer Systeme zum Teil und zumindest im Prinzip nachahmen. Sie werden die klassischen Sensoren zunehmend ergänzen und optimieren, deren Entwicklung aber nicht vollständig ersetzen.

Die Bionik als junge Wissenschaft hat vor allem in den letzten Jahren durch ihre breite Anwendbarkeit schnell Einzug in nahezu alle technischen Disziplinen gefunden, so auch in die Sensorik. Die Biologie dient dabei als Inspiration für die Optimierung vorhandener und vor allem für die Entwicklung neuer technologischer Lösungen. Charakteristisch für Bionische Sensoren ist damit die Tatsache, dass sie die Funktionsweise biologischer Systeme wenigstens zum Teil und zumindest im Prinzip nachahmen. Die intelligenten Verschaltungen der biologischen Sensoren sowie ihre Auswertealgorithmen und Filtermechanismen sind dabei ebenfalls von großem Interesse.

Im Laufe der Evolution hat sich in der Natur eine Vielzahl von Lösungen zur Detektion unterschiedlichster physikalischer Größen herausgebildet und optimiert, für die meisten Fragestellungen stehen sogar mehrere Lösungsansätze bereit. Aus diesem riesigen Fundus lassen sich für ähnliche, technische Fragestellungen Ideen und Optimierungsstrategien finden. Bezuglich Robustheit, Miniaturisierung und Effizienz bzw. Sensitivität sind die biologischen Systeme dabei häufig vorbildhaft und zeigen der Technik, was theoretisch möglich sein kann.

Um eine biologische Idee technisch nachzuhören zu können, müssen ihr Aufbau und ihre Funktionsweise zuerst genau verstanden werden. Neue, fortschrittliche Untersuchungsmethoden z.B. mit Rasterkraftmikroskopen haben die Aufklärung der biologischen Systeme entscheidend beeinflusst. Durch die Fortschritte, die in der Mikrosystemtechnik und der Nanotechnologie erzielt wurden, lassen sich zudem bionische Sensorkonzepte zunehmend leichter technisch realisieren.

Besonders interessante Beispiele für biologische Sensorsysteme als Vorbilder für mögliche technische Lösungen kommen aus den Bereichen Infrarotsensorik, Tastsinn und Navigation.

So besitzt der Schwarze Kiefernprachtkäfer *Melanophila acuminata* Infrarotorgane, mit denen er Waldbrände aus mehreren Kilometern Entfernung detektieren kann. Für den Käfer sind Waldbrände von essentieller Bedeutung, da er sich darauf spezialisiert hat, die häufig nur von außen verbrannten Baumstämme als Brutstätte und Nahrungsquelle für seine heranwachsenden Larven zu nutzen. In seinem Infrarotorgan befindet sich ein Array aus ca. 70 infrarotsensitiven Einheiten. Die Funktionsweise dieser Sensoren unterscheidet sich nicht nur von denen anderer biologischer Infrarotdetektoren, sondern war zudem lange in der Technik nicht bekannt.

Ungekühlte technische Infrarotsensoren arbeiten zumeist als so genannte Bolometer, bei denen sich eine Absorberfläche durch Absorption der Infrarotstrahlung erwärmt, was eine Widerstandsänderung zur Folge hat, die wiederum elektronisch ausgelesen werden kann. Im biologischen System dagegen wird die von der Infrarotstrahlung ausgelöste thermische Ausdehnung des Absorbers durch hochsensitive Mechanorezeptoren ausgelesen. Es gibt inzwischen mehrere unterschiedliche Ansätze, ein solches Konzept auch technisch zu realisieren. Diese reichen von der einfachen Detektion durch Mikro-Biegebalken (bestehend aus einer schlecht infrarotabsorbierenden und einer gut absorbierenden Schicht mit großer thermischer Ausdehnung) über die Erschließung des biologischen Werkstoffes selbst als Absorbermaterial bis hin zu einem möglichst naturgetreuen Nachbau des kompletten Sensorsystems.

Da viele Roboter der Morphologie, dem Verhalten, der Bewegung und dem Einsatzgebiet biologischer Systeme nachempfunden sind, besitzen bionische Sensoren auch in dieser ebenfalls zukunftsweisenden Disziplin ein großes Potential. So gibt es Bestrebungen, kleine Serviceroboter mit taktilen Sensoren nach dem Vorbild der Antennen von Insekten oder der Vibrissen (Tasthaare) von Säugetieren auszustatten, damit diese sich tastend durch eine dunkle Umwelt bewegen können. Vibrissen sind lange, dicke Haare zumeist im Schnauzenbereich bei Säugetieren (z.B. Ratten), an deren Wurzeln sich Mechanosensoren befinden, die äußerst sensitiv auf Verbiegungen und Auslenkungen des Haares reagieren. Mit ihnen können nicht nur Objekte, sondern auch deren Oberflächenbeschaffenheit erkannt werden. Vibrissen können auch unter Wasser eingesetzt werden, um Wasserbewegungen zu erkennen. Seehunde sind mit ihnen in der Lage, Strömungsspuren von Beutefischen zu

erkennen und diesen bis zur Beute zu folgen. Künstliche Vibrissen könnten demnach bei kleinen U-Booten oder Unterwasserrobotern dazu eingesetzt werden, andere Unterwasserobjekte zu erkennen und aufzuspüren.

Ebenfalls zur Unterwassersteuerung werden künstliche Seitenlinien erforscht. Die Seitenlinie der Fische besteht aus einem Kanal, der über Poren mit dem Außenmedium Wasser verbunden ist und in dem sich Mechanorezeptoren befinden. Wasserbewegungen und Druckschwankungen, die über die Körperseite der Fische laufen, erzeugen einen Druckunterschied zwischen den Poren, so dass im Kanal eine Bewegung ausgelöst wird, die die Mechanosensoren detektieren können. Die Seitenlinie dient jedoch nicht nur als einfacher Strömungssensor. Als Ferntastsinn trägt sie ebenso zur Objekterkennung bei.

Als Vorbild für die Navigation von Laufrobotern könnte die Wüstenameise *Cataglyphis fortis* dienen. Diese nutzen das teilweise polarisierte Licht des Himmels als visuellen Kompass und erfassen zusätzlich die zurückgelegte Entfernung über eine Art Schrittzähler. Mittels dieser Daten können die Ameisen in ihrem Lebensraum, in dem eine Erkennung von Landmarken aufgrund der strukturarmen Umgebung erschwert ist, immer wieder schnellstmöglich zu ihrem Nest zurückfinden. So sind sie den lebensgefährlich hohen Umgebungstemperaturen nur so kurz wie möglich ausgesetzt.

Insgesamt bieten Bionische Sensoren eine interessante Erweiterung des Spektrums der technischen Möglichkeiten. Sie werden die klassischen Sensoren zunehmend ergänzen und optimieren, deren Entwicklung aber nicht vollständig ersetzen. Eine detailgetreue Nachbildung biologischer Sensoren ist wegen deren Komplexität in der Regel nicht realisierbar. Der zunehmende Einzug biologischer Werkstoffe in technische Fabrikationsprozesse könnte helfen, auch dieses Hindernis zu überwinden.

Dr. Martin Müller, Februar 2010

Kognitive Robotik

Kognitive Robotik ist der Teilbereich der Robotik, der sich mit der Ausstattung von technischen Systemen mit kognitiven Fähigkeiten zum Wahrnehmen, Erkennen und Beurteilen von Situationen beschäftigt. Die Forschungen in diesem Gebiet sind zum Teil sehr langfristig angelegt.

Unter dem Begriff Kognition versteht man heute informationsverarbeitende Prozesse bei Tier und Mensch, die mit dem Wahrnehmen, Erkennen und Beurteilen von Situationen zusammenhängen. Entsprechend definiert sich das noch relativ junge, inzwischen aber schon etablierte Forschungsgebiet Kognitive Robotik als Teilbereich der Robotik, der sich mit der Ausstattung von technischen Systemen mit kognitiven Fähigkeiten beschäftigt. In Ergänzung zu den bereits praktisch genutzten und in absehbaren Zeiträumen zu weiteren Fortschritten führenden Software-Kontrollarchitekturen gehört die Kognitive Robotik zu den Forschungsgebieten, deren Ergebnisse eher langfristig zu entscheidenden Verbesserungen der Autonomie von Robotern führen werden.

Eines der Hauptziele der Kognitiven Robotik ist die Konstruktion von technischen Systemen, die autonom in sich wandelnden Umweltsituationen sinnvoll agieren können und dabei ein Verhalten zeigen, das über die bei der Konstruktion des Systems explizit vorgegebenen Verhaltensmuster hinausgeht. Bislang wird vom Entwickler der Robotersteuerung festgelegt, auf welche Weise Sensormuster intern repräsentiert werden und welche Verhaltensmuster durch bestimmte äußere Reize angestoßen werden sollen. Die Fähigkeit, eigene Erkenntnis-kategorien zu bilden und nach eigenen Regeln mit Inhalten zu befüllen, würde zu den Voraussetzungen für selbstbestimmtes Handeln von Robotern gehören. Die technischen Rahmenbedingungen dafür sind derzeit noch nicht gegeben. Eine Selbststeuerung des Erkenntnisgewinns durch den Roboter würde den autonomen Aufbau einer internen Repräsentation durch Selbst- und Umweltwahrnehmung ermöglichen. Sie steht deshalb im Mittelpunkt des Interesses des Forschungsgebietes Kognitive Robotik. Gegenwärtig besteht im Zusammenhang mit dem Aufbau eines solchen Systems noch eine Vielzahl

gänzlich ungelöster Fragen. Diese beziehen sich u. a. auf den sinnvollen Einsatz der Sensorik sowie den Umfang und die notwendigen Inhalte des vom Entwickler initial zu implementierenden Grundwissens.

Die Modellierung kognitiver Leistungen benötigt nach heutiger Lehrmeinung die Einbettung in einen physikalischen Körper und die Interaktion mit der realen Umwelt durch Sensoren und Aktoren. Im Englischen wird dieser Grundsatz mit dem Fachbegriff Embodiment bezeichnet. Bei Mensch und Tier entsteht die kognitive Leistungsfähigkeit erst im Laufe der Ontogenese, d. h. der Individualentwicklung insbesondere des Nervensystems. Daher besteht eine wichtige Schlussfolgerung aus dem Prinzip des Embodiment darin, dass die ontogenetische Entwicklung bei dem Entwurf der Robotersteuerungssoftware berücksichtigt werden muss. Nur auf diese Weise kann erreicht werden, dass der Erfahrungshintergrund des Roboters selbst sein kognitives Verständnis von der Außenwelt, in die er eingebettet ist, definiert. Der Roboter muss also lernfähig sein und seine eigenen Erfahrungen machen können. Mit den humanoiden Robotern iCub, der im Rahmen des europäischen RoboCub-Projekts entwickelt wird, und dem japanischen CB2-Roboter entstehen derzeit zwei Forschungsplattformen für kognitive Robotik, bei denen mittels kindähnlicher Roboter der Erwerb kognitiver Fähigkeiten im Kleinkindalter modelliert werden soll.

In Hinblick auf den autonomen Erwerb von Wissen und kognitiven Fähigkeiten durch Roboter hat es in den letzten Jahren weltweit ein intensives Forschungsinteresse für Methoden und Konzepte des handlungs- und problemlösungsorientierten sozialen Lernens gegeben. Soziales Lernen, z. B. durch Imitation, könnte zukünftig ein einfach zu beschreibender Weg zur Programmierung eines Roboters sein. Darüber hinaus kann Imitation einen Mechanismus für effizientes motorisches Lernen im dreidimensionalen Raum sowie für die Kommunikation zwischen Roboter und Mensch oder zwischen zwei Robotern darstellen. Aufgrund der Möglichkeit, durch eine auf sozialem Lernen beruhende Mensch-Maschine-Interaktion Nutzern ohne einschlägige Vorbildung die private und berufliche Verwendung von Robotern zu ermöglichen, gibt es auch ein erhebliches kommerzielles Interesse an dieser Forschungsrichtung.

Auch die Computermodellierung von Emotionen ist in den Kognitionswissenschaften und der Robotikforschung in den letzten Jahren zu einem Forschungsbereich von stark zunehmendem Interesse geworden. Die intensive Beschäftigung mit diesem Thema wurde hervorgerufen durch eine Vielzahl neuer neurowissenschaftlicher Erkenntnisse über

Emotionen und ihre funktionale Aufgabe bei kognitiven Leistungen. Kognitive und emotionale Prozesse stellen sich heute als derart miteinander verflochten dar, dass für den wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn auf dem Gebiet der Kognition eine Berücksichtigung von Emotionen inzwischen als unabdingbar angesehen wird. Von besonderer Bedeutung sind entsprechende Interaktionen in den Bereichen Lernen und Gedächtnis sowie bei der Aufmerksamkeitssteuerung, Wahrnehmungsfähigkeit und Verarbeitung sozialer Reize. Im Hinblick auf die Fragestellung, ob die Implementierung emotionaler Mechanismen in die Robotersteuerung eine Zunahme ihrer Effektivität bewirken kann, wird dabei meist zwischen internen (individuellen) und externen (sozialen) Emotionsaspekten unterschieden. Die Einbeziehung sozialer Aspekte wird hier vor allem hinsichtlich der Verbesserung der Mensch-Maschine-Interaktion diskutiert. Von der Integration interner Aspekte verspricht man sich hingegen entsprechend der emotionalen Verhaltenssteuerung im Tierreich eine höhere Effektivität bei der Interaktion des Roboters mit seiner Umgebung.

Im Labormaßstab stehen heute bereits leistungsfähige Plattformen für die Durchführung von Experimenten zur kognitiven Steuerung zur Verfügung. Auch ist bereits eine Vielzahl von Hochschullehrstühlen und Arbeitsgruppen für Kognitive Robotik in Deutschland und international eingerichtet. Die Forschungen in diesem Gebiet sind zum Teil sehr langfristig angelegt. Woran es derzeit hauptsächlich fehlt sind leistungsfähige (Selbst-) Repräsentationen und Steuerungsverfahren, die es ermöglichen, Kontrollprozesse flexibler, adaptiver, weitsichtiger und somit intelligenter zu gestalten.

März 2010

Nano Air Vehicles

Ob und wann eines Tages insektengroße Fluggeräte autonom Missionen durchführen werden, hängt neben der Lösung offener Fragen im Bereich der Roboterautonomie insbesondere von substantiellen Fortschritten auf dem Gebiet der Flügelkinematik ab.

Unter der Kategorie „Nano Air Vehicle“ (NAV) werden kleinste unbemannte Fluggeräte zusammengefasst, die typischerweise Spannweiten bis etwa 7,5 cm und ein Gewicht von wenigen Gramm haben. Derzeit existieren erst wenige Prototypen von NAVs in einem frühen Entwicklungsstadium. Eingesetzt werden sollen sie vorwiegend in beengten Räumlichkeiten wie Gebäuden, Gassen oder Höhlen. Die Lösung der bestehenden Probleme in den Bereichen Autonomie, Energieversorgung und Flügelkinematik vorausgesetzt ist hier eine Vielzahl von Anwendungen vorstellbar. Dazu gehören Lageaufklärung, Gefahrstoffdetektion und die Suche Verschütteter.

Aus diesen Einsatzszenarien ergeben sich besondere Anforderungen. Aufgrund der Dämpfung von Funksignalen z. B. durch Mauern ist eine permanente Funkverbindung zu einem Bediener nicht immer möglich. Die Systeme müssen daher in der Lage sein, sowohl die Missionsdurchführung als auch vor allem ihre Flugsteuerung autonom zu bewältigen. Da sie in komplexen Umgebungen auf beengtem Raum navigieren sollen, muss ihre Plattform schwebeflugtauglich sein und ihre Steuerung in Echtzeit erfolgen. Gleichzeitig herrschen höchste Anforderungen an minimales Systemgewicht und kleinstmöglichen Energiebedarf. Daher werden NAVs primär eine sogenannte verhaltensbasierte Kontrollarchitektur besitzen, die mit dem intuitiven oder antrainierten Verhalten in einem biologischen Reiz-Reaktions-Schema vergleichbar ist. Zur Erfassung der Umwelt ist ein optischer Sensor unumgänglich, um Kollisionen mit Hindernissen sicher zu vermeiden. Wie beim Insektenauge soll er durch Auswertung des optischen Flusses außerdem z. B. Informationen zu Fluglage, Geschwindigkeit und Höhe über Grund liefern.

Sensor, Steuergerät und ein Funksender zur Übermittlung von Daten bei Funkkontakt bilden die elektronische Komponente oder Steuerungseinheit des NAV. Die mechanische Komponente besteht aus dem Energiespeicher, einem Motor, der Aktorik zur Erzeugung von Auftrieb und Vortrieb und der Plattformstruktur in Form von Zelle und Auftriebsflächen. Die Steuerungskomponenten machen etwa 20 % der Gesamtmasse aus, je etwa 30 % entfallen auf Energiespeicher und Motor. Der Rest verteilt sich auf Zelle, Tragflächen und Aktorik. An dieser Aufteilung erkennt man eine neben der autonomen Steuerung weitere Kernproblematik bei der Realisierung der mobilen Plattform: Die effektive Speicherung und Wandlung von Energie.

Die Energiefrage wiederum ist verknüpft mit Skalierungseffekten bei der Miniaturisierung von Flugsystemen, durch die eine ganze Reihe von Problemen verursacht wird. Verkleinert man ein Flugzeug maßstabsgerecht, sinken die Werte von Flächen und Volumina unterschiedlich. Dadurch wächst der relative Anteil des Luftwiderstands im Vergleich zu den Auftriebskräften überproportional. Damit wird das NAV aerodynamisch ineffizienter. Gleichzeitig sinkt auch die Effizienz der Motoren. Darüber hinaus fällt das Trägheitsmoment des Gesamtsystems stark ab, was dazu führt, dass das NAV eine sehr geringe Eigenstabilität besitzt und extrem empfindlich auf äußere Störungen durch Windböen reagiert. Insgesamt führen die geschilderten Effekte dazu, dass die Reichweiten bei sukzessiver Verkleinerung der Systeme rapide abnehmen, wenn die Energiedichten der zur Verfügung stehenden Energieträger gleich bleiben.

Diese Skalierungseffekte und die Forderung nach Schwebeflugfähigkeit sind die Ursache für einen Paradigmenwechsel bei der Entwicklung von Flugsystemen. In der Kategorie der NAVs werden erstmals primär Schlagflügelplattformen untersucht, bei denen der Auftrieb wie bei Insekten, Fledermäusen oder kleinen Vögeln von vor und zurück schwingenden Flügeln („Flapping Wings“) erzeugt wird. Die Gründe hierfür liegen in der außerordentlich großen Energieeffizienz der entsprechenden natürlichen Systeme. Insekten und kleine Vögel haben mit ihrem Schwirrflug über Jahrmillionen Flugfähigkeiten entwickelt, die von keinem technischen System auch nur annähernd erreicht werden.

Kolibris z. B. sind bezogen auf die Körperlänge die mit Abstand schnellsten Lebewesen der Welt und noch weitaus schneller als Kampfflugzeuge bezogen auf ihre Rumpflänge. Dabei würde ihnen ein Liter Treibstoff (Nektar) für mehrere Erdumrundungen reichen. Es ist also kein Wunder, wenn Untersuchungen der letzten Jahre belegen, dass in den Dimensionen

von NAVs auch bei technischen Systemen Schlagflügel aerodynamisch und energetisch effizienter betrieben werden können als Fluggeräte mit konventionellen Starrflügeln.

Die Herausforderungen bei der Nachahmung des Insektenflugs sind allerdings enorm. Es hat zwar in den vergangenen Jahrzehnten große Fortschritte auf dem Gebiet der Strömungsmechanik gegeben, wenn es um die stationäre Umströmung starrer Tragflächen geht. Die Berechnung eines sich mit Schlagfrequenzen von bis zu einigen hundert Hertz bewegenden membranartigen Insektenflügels ist allerdings wesentlich komplexer. Der Auftrieb von Insekten wird zum überwiegenden Teil durch instationäre Effekte erzeugt. Man versteht erst seit wenigen Jahren, wie Insekten diese Effekte überhaupt erzeugen und nutzen. Aber auch hier sind noch Fragen offen. Eine wesentliche Rolle spielt die Stabilisierung eines Wirbels entlang der Flügelvorderkante, die nach neuen Erkenntnissen u. a. von dem Streckungsverhältnis des Flügels und seiner Drehbewegung um das Schultergelenk abhängt.

Theoretisch ist damit eine Reihe von Parametern zur Konstruktion der Flügel von NAVs bekannt. Die große Herausforderung besteht nun darin, die Kinematik der Insektenflügel auch technisch umzusetzen. Derzeitige schwebefähige Prototypen haben die Größe von Kolibris und verfügen meist nur über eine vereinfachte Aktorik, mit der sie die prinzipiell bedingten Vorteile von Schlagflügeln nicht voll nutzen können. Ob und wann eines Tages insektengroße Fluggeräte autonom Missionen durchführen werden, hängt also neben der Lösung offener Fragen im Bereich der Roboterautonomie insbesondere von substantiellen Fortschritten auf dem Gebiet der Flügelkinematik ab, welche sich wiederum unmittelbar auf die mit dem Energiebedarf zusammenhängenden Probleme auswirken.

Dr. Guido Huppertz, April 2010

Klebverfahren

Viele Experten sagen für die Zukunft eine Vorherrschaft des Klebens als dominierende Fügetechnik voraus.

Nachdem bis in die heutige Zeit von der Ära des Schweißens gesprochen wird, sagen viele Experten für die Zukunft eine Vorherrschaft des Klebens als dominierende Fügetechnik voraus. Hier hat es in den letzten Jahren eine nochmals beschleunigte Entwicklungsdynamik gegeben, verursacht nicht zuletzt durch die weiter steigende Bedeutung von Kriterien wie Ressourcenschonung und Wirtschaftlichkeit in industriellen Fertigungsprozessen.

Bereits heute sind industrielle Klebverfahren weit verbreitet. Vorreiter für ihre Nutzung in anspruchsvollen Technologien ist seit den 1960er Jahren der Flugzeugbau, wo Klebverfahren insbesondere auf Phenol- und Epoxidharzbasis inzwischen zum Stand der Technik gehören. Zunehmenden Einsatz finden sie auch in der Fertigung von Kraftfahrzeugen. Hier ermöglichen sie die Verringerung des Gewichtes und der Korrosionsanfälligkeit sowie ein verbessertes Crashverhalten. An Bedeutung gewinnt das Kleben außerdem im Motoren- und Getriebebau sowie langsam auch im allgemeinen Stahlbau. Besonders hohe Zuwachsrate erwartet man in der Elektronik, wo elektrisch und thermisch leitfähige Klebstoffe immer häufiger das in diesem Bereich traditionelle Löten ergänzen oder ersetzen. Zunehmende Verbreitung finden daneben so genannte biofunktionale Klebstoffe in der Medizin.

Die entscheidenden Vorteile des Klebens gegenüber seinen konventionellen Konkurrenten liegen je nach Variante bei Gewichtsersparnis, besonders guter Automatisierbarkeit und niedrigen Prozesstemperaturen. Genauso wichtig sind bauteilrelevante Vorzüge wie die Eignung zu großflächigem Verbinden und damit das Erreichen homogener Spannungsverteilungen oder ihre Verwendbarkeit zum Mischbau, also zum Fügen der verschiedenartigsten Werkstoffe untereinander. Außerdem bietet das Kleben die Möglichkeit zur Verwirklichung

multifunktionaler Verbindungen, bei denen neben der eigentlichen Fügung gleichzeitig Funktionalitäten wie Korrosionsschutz, elektrische Leitfähigkeit oder Schwingungsdämpfung realisiert werden.

Nachteile haben Klebverbindungen bisher noch oft im Hinblick auf ihre Zugfestigkeit und ihre Empfindlichkeit gegen abschälende Kraftwirkungen. Diese müssen durch eine klebgerechte Konstruktion minimiert werden. Dazu kommen zum Teil immer noch Schwierigkeiten bei der Realisierung ausreichender Langzeitfestigkeiten. Im Moment liegt die Lösung derartiger Probleme noch oft in der Kombination von Kleb- mit konventionellen Fügeverfahren wie z. B. dem Nieten oder Schrauben.

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 selbst. Nach dem jeweiligen Verfestigungsprozess unterscheidet man in physikalisch abbindende oder chemisch härrende, nach Anzahl der Komponenten in Ein- und Zweikomponentenklebstoffe. Letztere härten vom Prinzip her immer chemisch aus.

Physikalisch abbindende Klebstoffe werden in bereits polymerisierter, flüssiger Form aufgebracht. Der Klebstoff bindet ab, indem die Schmelze erstarrt oder das Lösungs- bzw. Dispersionsmittel entweicht. Aus ökologischen Gründen sinkt die Bedeutung lösungsmittelhaltiger Systeme. So ist der Lösungsmittelverbrauch für Klebstoffe seit 1990 um die Hälfte gesunken.

Chemisch abbindende Kleber bilden die mit Abstand wichtigste im Hochtechnologiebereich eingesetzte Klebstoffgruppe. Sie basieren auf dem Einsatz reaktiver Monomere, deren Aushärtung auf ihrer gezielten Vernetzung zu Polymeren beruht. Bei Zweikomponenten-Systemen findet die chemische Vernetzungsreaktion erst nach dem Zusammentreffen der Komponenten statt. 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.

Eine interessante neue Entwicklung bei den strahlungshärtenden Klebern (z. B. Acrylate) ist die zunehmende Nutzbarkeit von Leuchtdioden (LEDs) zur gezielten Applizierung der

für die Vernetzung nötigen elektromagnetischen Strahlung (typische Wellenlänge um 400 nm). Gegenüber den konventionell eingesetzten Entladungslampen haben LED-Systeme vielfältige Vorteile, wie z.B. geringere Wärmeentwicklung, längere Lebensdauer und exakte Regelbarkeit. Auch die Bestrahlung von großflächigen Klebungen ist mit ihnen im Prinzip möglich.

Neben derartigen verfahrenstechnischen Entwicklungen gibt es im Bereich der Klebverfahren eine beinahe unübersehbare Vielzahl einzelner Forschungsprojekte zur Modifizierung der Klebstoffe selbst. Neben den Bemühungen um biomimetische, also von der Natur abgeleitete Klebstoffe ragen hier im Moment insbesondere die Nutzbarmachung nanostrukturierter Füllstoffe und die Entwicklung reversibel trennbarer Klebverbindungen heraus.

In modernen Klebern eingesetzte Füllstoffe beeinflussen sowohl deren Applikationseigenschaften vor der Aushärtung als auch die Eigenschaften des abgebundenen Systems. Werden hier nanoskalige Füllstoffe mit ihren großen spezifischen Oberflächen eingesetzt, so bestimmen die Polymer-Festkörper-Grenzschichten zunehmend den Charakter des gesamten Verbundes. Damit lässt sich dessen Festigkeit je nach Oberflächenmodifizierung oder Menge der Partikel stark beeinflussen. So wird an neuen Klebern auf der Basis von Kohlenstoffnanoröhren gearbeitet. Nach dem Vorbild der mikroskopisch kleinen Haft-Härchen an den Zehen von Geckos könnten diese Füllstoffe zukünftig eine ganze Klasse von neuen Klebstoffen begründen.

Häufig besteht der Wunsch, eine Klebverbindung z.B. zu Reparatur- oder Recyclingzwecken wieder lösen zu können. Dieses Ziel ist beispielsweise durch Einbringen von Wärme erreichbar, wenn das eingesetzte Polymersystem dies zulässt. Eine interessante neue Möglichkeit ist hier die Verteilung bestimmter magnetischer Nanopartikel in den Klebstoff, die diesen nach Anregung durch ein geeignetes Mikrowellenfeld gezielt erwärmen können. Auch bei der Entwicklung von auf diese Weise reversibel trennbaren Klebverbindungen gibt es bereits erste Erfolge.

Jürgen Kohlhoff, Mai 2010

Künstliche Immunsysteme in der IT

Architektur und Funktionsweise Künstlicher Immunsysteme orientieren sich am menschlichen Immunsystem. Inwiefern sie sich in der Praxis behaupten können, hängt davon ab, ob sie gegenüber den derzeit eingesetzten Systemen in der IT-Sicherheit einen deutlichen Mehrwert erbringen können.

Als künstliche Immunsysteme (AIS = Artificial Immune System) werden in der Informations-technik (IT) Systeme verstanden, deren Architektur und Funktionsweise sich am menschlichen Immunsystem orientieren. Sie befinden sich weitgehend noch im Forschungs- und Entwick-lungsstadium. Die Aufgabe des menschlichen Immunsystems ist der Schutz des Körpers gegen Krankheiten und Infektionen, die durch körperfremde Substanzen (Pathogene) hervorgerufen werden. Eine seiner wesentlichen Fähigkeiten ist es, Substanzen aufgrund ihrer Oberflächenstruktur als körperfremd zu erkennen. In Analogie dazu lassen sich künstliche Immunsysteme in der IT für eine ganze Reihe von Aufgaben nutzen. Beispiele hierfür sind die Mustererkennung, die Klassifizierung von Daten sowie die Lösung von Optimierungs-problemen.

Ein zentrales Anwendungsfeld künstlicher Immunsysteme in der IT stellt die IT-Sicherheit dar. Bei der Absicherung von Netzwerken finden generell so genannte anomaliebasierte Intrusion-Detection-Systeme (IDS) Verwendung. Diese detektieren Eindringlinge in das Netzwerk anhand der Abweichung des Netzwerkverhaltens von einem vorher definierten Normalzustand. Problematisch bei diesem Ansatz ist jedoch die oftmals hohe Anzahl von Falschalarmen. Ein von dem Normalzustand abweichendes Verhalten kann in einem Netzwerk auch als etwas „Fremdartiges“ interpretiert werden. Aufgrund der Eigenschaft des menschlichen Immunsystems, effektiv „Fremdes“ zu erkennen und zu bekämpfen, scheinen künstliche Immunsysteme für den Einsatz als anomaliebasierte IDS daher gut geeignet. Bisher realisierte Systeme basieren auf Algorithmen, die alle als „fremd“ erkannten System-

zustände als Folge eines Angriffes werten und eine entsprechende Reaktion zur Folge haben. Die Praxistauglichkeit dieser Algorithmen wird jedoch zunehmend angezweifelt. Daher orientieren sich Ansätze jüngerer Zeit an einer relativ neuen Theorie über die Wirkungsweise des menschlichen Immunsystems. Nach dieser so genannten Gefahrentheorie erfolgt eine Reaktion des Immunsystems immer nur dann, wenn im Körper spezielle Gefahrensignale erzeugt werden und zwar unabhängig davon, ob eine Substanz als fremd oder körpereigen erkannt wird. Von anomaliebasierten IDS, die auf künstlichen Immunsystemen und der Gefahrentheorie beruhen, erhofft man sich eine deutliche Verringerung der Anzahl der Falschalarme gegenüber derzeit auf dem Markt erhältlichen IDS.

Ein interessantes Anwendungsgebiet von AIS könnten so genannte mobile Ad-Hoc-Netzwerke (MANETs) sein. Dies sind drahtlose Netze mobiler Teilnehmer, die keine fest installierte Infrastruktur, wie z. B. Basisstationen, aufweisen und in denen jeder Teilnehmer nicht nur Sender und Empfänger, sondern gleichzeitig auch für das Weiterleiten von Nachrichten (Routing) verantwortlich ist. Aufgrund der sich ständig ändernden Netzstruktur sowie möglicher Kompromittierungen von Netzknoten durch Angreifer ist das Routing in MANETs eine kritische Komponente. Neue, auf der Verwendung von AIS basierende Schutzsysteme, die ein reguläres Routingverhalten der Netznoten sicherstellen und sich fehlerhaft verhaltende Netznoten identifizieren sollen, zeigen viel versprechende Ergebnisse. Im Zusammenhang hiermit wurden auch neue, ebenfalls von der Natur inspirierte Routingprotokolle vorgeschlagen.

Von zukünftigem Interesse könnte auch das relativ neue Konzept der negativen Datenbanken sein, das die Wahrung der Vertraulichkeit der Datenbankeinträge zum Ziel hat. Dabei arbeitet ein Nutzer nicht mit den originären Datenbankeinträgen, sondern mit einer geeigneten Darstellung aller nicht vorhandenen Einträge (negative Daten). Diese negativen Daten werden aus den Originaldaten mithilfe eines aus der Wirkungsweise des menschlichen Immunsystems abgeleiteten Algorithmus gewonnen. Der Nutzer kann nun auf der Basis der negativen Daten einfache Datenbankabfragen durchführen, wie z. B. die Prüfung ihm vorliegender Daten auf Zugehörigkeit zur Datenbank, ohne Zugriff auf die Originaleinträge zu haben.

Die Vertraulichkeit der Datenbankeinträge wird insbesondere durch die Tatsache geschützt, dass es nahezu unmöglich ist, aus den negativen auf die originären Daten zu schließen, wenn man den zugrunde liegenden Algorithmus nicht kennt. Damit kann ein Angreifer selbst durch unbefugte Kenntnisnahme der negativen Daten, z. B. durch Hacken des Rechners, nicht in den Besitz der schützenswerten Daten gelangen. Auf demselben Prinzip beruht

auch ein neuartiger Ansatz der Passwort-basierten Authentifizierung, bei der die gültigen Passworte in Form von negativen Daten vorliegen.

Letztlich können künstliche Immunsysteme zu gänzlich neuen Sicherheitsarchitekturen in der Netzwerksicherheit führen. Dabei übernehmen so genannte mobile Software-Agenten (eigenständig agierende Programme, die im Netz kursieren) Aufgaben der IT-Sicherheit, wobei die einzelnen Agenten miteinander kommunizieren. Aufgrund der Mobilität sind Sicherheitsressourcen dort verfügbar, wo sie aktuell gebraucht werden. Der gegenseitige Datenaustausch befähigt die Software-Agenten überdies zu einem kollaborativen Verhalten. Ebenso können die einzelnen Daten der Software-Agenten fusioniert werden und auf diese Weise ein ständiges Lagebild des Netzwerkes ergeben. Auch von einem Angreifer kompromittierte Netzknoten können auf diese Weise erkannt werden. Derartige Sicherheitsarchitekturen werden bereits seit einigen Jahren diskutiert und scheinen zur Abwehr fortschrittlicher und zunehmend intelligenter werdender Angriffe wesentlich geeigneter als bisherige Schutzsysteme. Insbesondere können sie vernetzte Angriffe erkennen, worunter eine räumlich und/oder zeitlich zusammenhängende Folge von Einzelangriffen verstanden wird.

Die bisherigen Ansätze und Realisierungen künstlicher Immunsysteme in der IT-Sicherheit sind noch weit von der Praxistauglichkeit und einem kommerziellen Einsatz entfernt. Die weitere Entwicklung auf diesem Gebiet wird insbesondere von neuen Erkenntnissen über die Wirkungsweise des menschlichen Immunsystems stark beeinflusst werden. Inwiefern sich künstliche Immunsysteme in der Praxis behaupten können, hängt davon ab, ob sie gegenüber den derzeit eingesetzten Systemen in der IT-Sicherheit einen deutlichen Mehrwert erbringen können. Das grundsätzliche Potenzial hierzu scheinen sie zu besitzen.

Thomas Euting, Juni 2010

Car-to-X-Kommunikation

Auf der Kommunikation zwischen Fahrzeugen sowie zwischen Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur basierende kooperative Fahrerassistenzsysteme werden den nächsten großen Innovationszyklus im Straßenverkehr begründen.

Die Ausrüstung von Kraftfahrzeugen mit individuellen Fahrerassistenzsystemen ist bereits weit fortgeschritten. Die neuesten Systeme erfassen sogar das Fahrzeugumfeld und können so den Fahrer z. B. beim Spurwechsel warnen oder ihm beim Einparken helfen. In einer Vielzahl von Forschungsaktivitäten wird heute ein weiterer entscheidender Schritt zur Fahrerunterstützung vorbereitet. Er basiert auf der Kommunikation zwischen Fahrzeugen (Car-to-Car) sowie zwischen Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur (Car-to-Infrastructure). Beide Bereiche werden zusammengefasst unter dem Begriff der Car-to-X-Kommunikation, die als Grundlagentechnologie für zukünftige kooperative Fahrerassistenzsysteme gilt. Deren Einführung soll zu entscheidenden Fortschritten in den Bereichen Sicherheit, Komfort und Verkehrsleitung führen, ohne dem Fahrer ein Gefühl der Entmündigung oder des Verlustes seiner Souveränität zu geben.

Die naheliegendste Anwendung der Car-to-X-Kommunikation ist die frühzeitige Information über Verkehrsstörungen und mögliche Hindernisse (z. B. Stau-Enden), auf die das Fahrzeug dann möglicherweise sogar selbstständig reagieren könnte. Wichtig ist die Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern auch zur Information vor Kreuzungen über sich aus einer Seitenstraße nähernde Fahrzeuge, auf die die Sicht noch verdeckt ist. Ein Beispiel für die Kommunikation mit der Verkehrsinfrastruktur ist die Anzeige von Verkehrszeichen und sonstigen Hinweisen. Für die Routenplanung ist die Verbesserung der Navigation im innerstädtischen Bereich, wo GPS-Satelliten durch hohe Häuser verdeckt sind, wichtig. Zu einer wesentlichen Erhöhung des Komforts würde auch die gleichzeitige Nutzbarmachung des Internets führen, über das der Fahrer z. B. Informationen über sein Reiseziel oder seine aktuelle Umgebung erhalten könnte.

Zur Verkehrsleitung werden vom Fahrzeug Daten sowohl entgegengenommen als auch gesendet. Die gesendeten Daten können z. B. zur Optimierung von Ampelschaltzeiten verwendet werden. Durch den insgesamt resultierenden gleichmäßigeren Verkehrsfluss erwartet man entsprechende Kraftstoffeinsparungen. In einem laufenden Projekt der US-amerikanischen DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) wurde mit der Car-to-Car-Kommunikation am Beispiel elektronisch gekoppelter Konvois (LKW-Platoons) demonstriert, wie auch im Nutzfahrzeughbereich Kraftstoffeinsparungen erreicht werden können.

Die wesentliche technologische Grundlage für kooperative Fahrerassistenzsysteme ist das zugrunde liegende Kommunikationssystem. Die hier angedachten Lösungen sollen auf der spontanen Ausbildung von Ad-hoc-Netzwerken zwischen Fahrzeugen und Verkehrsinfrastruktur basieren. Dabei sollen weiter entfernte Fahrzeuge über Multi-Hop-Kommunikation erreicht werden. Sie können dabei gezielt anhand ihrer geografischen Position adressiert werden. Die Nachrichten sollen ihr Ziel sowohl bei hohen als auch bei sehr geringen Fahrzeugdichten erreichen. In Deutschland müsste im Schnitt jedes sechste Kfz über diese Technik verfügen, um die Daten zuverlässig auch über größere Entfernung von Auto zu Auto übertragen zu können.

Ein derartiges System kann natürlich nur funktionieren, wenn sowohl hersteller- wie auch länderübergreifend einheitliche Frequenzen, Übertragungsstandards und Protokolle verwendet werden. An einer derartigen Standardisierung wird intensiv gearbeitet. Die Funkverbindungen basieren auf Funktechnologie kurzer Reichweite. Die EU z. B. hat für den Zweck der Car-to-X-Kommunikation die Frequenzbänder 5,875 und 5,905 GHz freigegeben. Zur Übertragung wird der WLAN-Standard verwendet. Besondere Anforderungen gibt es hier, weil das System auch bei hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten, kurzen Netzzugangszeiten, kurzen Übertragungszeiten und ggf. hoher gleichzeitiger Teilnehmerzahl funktionieren muss. In Zusammenhang mit derartigen Problemen steht auch die Entwicklung leistungsfähiger Antennen.

Da eine hundertprozentige Abdeckung mit WLAN nicht zu erreichen ist, sollen die Mobilfunkstandards UMTS und GPRS die Lücken überbrücken. Wie man alle drei Verfahren gleichzeitig nutzen und gezielt zwischen ihnen ohne Verzögerung umschalten kann, steht im Fokus eines aktuellen Feldtests. Hier geht es auch um die Verhinderung von gegenseitigen Störungen mit allgemeinen Funknetzen. Zur Verhinderung von unbeab-

sichtigen oder mutwilligen Störungen werden z. B. geeignete Verschlüsselungsverfahren eine entscheidende Rolle spielen.

Auch das mit der Car-to-X-Kommunikation verbundene Datenschutzproblem ist noch nicht gelöst. Technisch würde damit z. B. die Erstellung von Bewegungsprofilen und die Ortung des momentanen Aufenthalts ermöglicht. Eine Lösungsmöglichkeit besteht darin, dass dem Fahrzeug mehrere Pseudonyme zugeteilt werden, die so gewechselt werden, dass eine Verfolgbarkeit erschwert bzw. verhindert wird. Eine weitere offene Frage betrifft die Einbindung besonders gefährdeter Verkehrsteilnehmer (Kinder, Radfahrer usw.), die kein Car-to-X-Kommunikationsgerät mit sich führen. Hier sind aktive RFID-Funkchips angedacht, deren Positionen über Funk von Fahrzeugen geortet werden können.

An Systemen zur Car-to-X-Kommunikation wird derzeit in allen wichtigen Ländern gearbeitet. Wegen ihrer volkswirtschaftlichen Bedeutung werden zahlreiche Projekte öffentlich gefördert. Fahrzeughersteller, Forschungsinstitute sowie Zulieferer im Hard- und Softwarebereich haben sich z. B. im Car2Car Communication Consortium (C2CCC) zusammengeschlossen. Erste funktionierende Systeme werden z. Zt. erprobt. Die prinzipielle Anwendbarkeit des WLAN-Standards und der in der EU freigegebenen Frequenzen zur Kommunikation zwischen weit voneinander entfernten (1000 m) und sich mit hoher Relativgeschwindigkeit (200 km/h) bewegenden Fahrzeugen konnte bereits nachgewiesen werden.

Insgesamt kann man sagen, dass auf Car-to-X-Kommunikation basierende kooperative Fahrerassistenzsysteme den nächsten großen Innovationszyklus im Straßenverkehr begründen werden. Der genaue Zeitpunkt der Einführung erster Systeme ist derzeit jedoch noch nicht abzusehen. Optimistische Schätzungen gehen vom Jahr 2020 aus. Neben technischen werden bis dahin noch viele politische, gesellschaftliche und nicht zuletzt die Finanzierung betreffende Probleme zu lösen sein.

Wolfgang Nätzker, Juli 2010

Nanobasierte Sensoren

Kleinste eigenschaftsbestimmende Strukturen in der Größenordnung von Nanometern können in Zukunft insbesondere bei Sensoren für Chemikalien, Bakterien oder Viren zu bislang nicht erreichter Sensitivität und Selektivität führen.

Die Sensorik gehört zu den Technikfeldern, in denen die neuen Entwicklungen der Nanotechnologie besonders weitreichende Auswirkungen haben werden. Kleinste eigenschaftsbestimmende Strukturen in der Größenordnung von Nanometern können hier insbesondere bei Sensoren für Chemikalien, Bakterien oder Viren zu bislang nicht erreichter Sensitivität und Selektivität führen.

Dabei lassen sich zwei Entwicklungslinien unterscheiden. Die eine beruht auf einer weiteren Miniaturisierung von Bauteilen und Konzepten, die bereits im Bereich der Mikrosystemtechnik erfolgreich genutzt werden. Diese Entwicklung wird vor allem durch verbesserte Herstellungsverfahren unter anderem im Bereich der Lithographie vorangetrieben. Ein herausragendes Beispiel hierfür ist die kontinuierliche Verkleinerung mikrostrukturierter Biegebalken, die inzwischen in einer Größe von einigen hundert Nanometern hergestellt werden können. Die Adsorption von Molekülen auf der Oberfläche dieser an einem Ende frei beweglichen Strukturen führt zu einer Änderung ihres mechanischen Spannungszustandes. Diese Änderung kann direkt als Verbiegung mittels optischer Meßmethoden nachgewiesen werden. Wenn die Balken nur noch eine Größe im Bereich von Nanometern haben, muss auf indirekte Nachweisverfahren zurückgegriffen werden, indem etwa die Änderung der Resonanzfrequenz des Balkens bestimmt wird oder man sich den piezoresistiven Effekt zu Nutze macht. Dieser stellt einen Zusammenhang zwischen dem mechanischen Spannungszustand in einem Material und seinem elektrischen Widerstand her. Die Sensitivität solcher Sensoren liegt inzwischen schon im sub-ppm-Bereich (ppm: parts per million, in einer Probe können auf ein zu detektierendes Molekül also mehr als eine Million Fremdmoleküle kommen).

Die zweite Entwicklungslinie beruht auf der Ausnutzung neuartiger Phänomene, die im Bereich nanoskaliger Objekte auftreten. Einige davon sind im Prinzip bereits seit Mitte der siebziger Jahre bekannt, werden aber erst auf Grund der Entwicklungen auf dem Gebiet der Nanotechnologie praktisch nutzbar. Dazu gehört die oberflächenverstärkte Raman-Spektroskopie. Diese beruht darauf, dass eingestrahltes Licht einer bestimmten Wellenlänge durch ein auf einer nanostrukturierter Silber- oder Gold-Oberfläche adsorbiertes Molekül in charakteristischer Weise zurückgestreut wird. Auf Grund einer im Detail noch nicht verstandenen Wechselwirkung zwischen Oberfläche, Molekül und einfallendem Licht wird das Signal um mehrere Größenordnungen verstärkt, so dass es möglich ist, auch geringste Stoffmengen zu detektieren. Auch wenn noch einige technische Probleme zu lösen sind, so wird dieser Methode doch ein großes Potenzial für Sensoren im Sicherheitsbereich zugeschrieben, wenn es beispielsweise um die Detektion biologischer oder chemischer Kampfstoffe geht.

Die geschilderten Methoden verdeutlichen, warum nanoskalige Bauteile ein besonderes Potenzial für chemische oder biologische Sensoren besitzen. Zum einen sind die charakteristischen Größen von zu detektierendem Molekül und detektierender Sensorstruktur nicht mehr um mehrere Größenordnungen verschieden. Zum anderen findet die Detektion von Molekülen prinzipbedingt am besten auf der Oberfläche einer Struktur statt und nicht in deren Inneren. Je kleiner nun ein Objekt ist, umso größer ist seine Oberfläche im Verhältnis zum Volumen. Dies macht man sich bei vielen nanobasierten Sensoren, die derzeit in der Entwicklungsphase sind, zu Nutze. Dabei werden z.B. Kohlenstoff-Nanoröhren benutzt, aber auch solche aus Titandioxid. Werden diese auf der Innenseite mit Zink-Ionen sensibilisiert, können sich z.B. einzelne Moleküle des Sprengstoffs Triacetontrperoxid (TATP) anlagern, der sich relativ einfach herstellen lässt, gleichzeitig aber sehr explosiv ist. Hierdurch vergrößert sich die elektrische Leitfähigkeit der Nanoröhre.

Ein elektrischer Strom wird messbar, wenn an ein Array mit vielen solcher Röhren eine Spannung angelegt wird. Derzeit ist allerdings die Selektivität dieses Verfahrens, also seine Fähigkeit zum Unterscheiden zwischen gesuchten und nicht gesuchten Molekülen, noch unklar.

Auch die Oberflächen von Nanopartikeln lassen sich für Sensoren nutzen. So können beispielsweise Sporen des Milzbranderregers mittels Siliziumdioxid-Nanopartikeln detektiert werden, die mit einem organischen Farbstoff dotiert wurden und auf deren Oberfläche

sich eine Europium-Verbindung befindet. Hier erfolgt der Nachweis der sich anlagernden Sporen auf Grund eines entstehenden charakteristischen Fluoreszenz-Spektrums.

Auf unseren Alltag werden die Entwicklungen im Bereich nanobasierter Sensoren ebenfalls Auswirkungen haben. So wird es in Zukunft möglich sein, ein kontinuierliches Monitoring des Klimas und der Luftqualität in Gebäuden durchzuführen. Auch die kontinuierliche Überwachung des Gesundheitszustandes von Menschen wird zunehmend einfacher und effektiver. Besondere Bedeutung wird nanobasierten Sensoren für den Bereich der öffentlichen Sicherheit und der Gefahrenabwehr zugesprochen. Hier eröffnen sie z.B. die Möglichkeit, kritische Orte (Flughäfen etc.) kontinuierlich hinsichtlich terroristischer Bedrohungen mit Sprengstoffen oder chemischen bzw. biologischen Waffen zu überwachen.

Bis es soweit ist, ist allerdings noch eine Reihe von Problemen zu lösen. Eines der wichtigsten betrifft die Reversibilität der Sensoren. Die für deren Funktion notwendige Verbindung zwischen Sensor und Substanz muss wieder gelöst werden können, wenn eine neue Messung erfolgen soll oder sich die Zusammensetzung der Analyseprobe ändert. Eine weitere Herausforderung betrifft die Detektion und Identifikation unterschiedlicher Substanzen in einem Stoffgemisch. Hierfür ist es nötig, mit mehreren verschiedenen Sensoren zu arbeiten, die jeder ein spezifisches Signal liefern. Das so entstehende Muster muss dann noch mittels geeigneter statistischer Methoden analysiert werden, um eine Identifikation der detektierten Substanzen zu ermöglichen.

Dr. Marcus John, August 2010

Drahtlose Energieübertragung

Der Energiebedarf vor allem der stark zunehmenden Zahl elektronischer Kleinverbraucher wird in Zukunft vermehrt durch drahtlose Energieversorgungssysteme gedeckt werden.

Die Drahtlose Energieübertragung dient der kontaktlosen Zuführung von Energie an einen elektrischen Verbraucher. Vor allem aktuelle Initiativen aus der Industrie führen im Moment zu einem spürbaren Entwicklungsschub bei den dazu einsetzbaren Systemen. So kann die Handhabung vieler im Alltag oft benutzter Geräte verbessert werden, z. B. bezüglich der Bewegungsfreiheit. Weitere Anwendungsfelder gibt es dort, wo es keine direkte elektrisch leitende Verbindung geben kann, z. B. bei medizinischen Implantaten, gekapselten Unterwasserfahrzeugen oder in explosionsgefährdeter Umgebung.

Für die Drahtlose Energieübertragung sind verschiedene elektromagnetische Übertragungsprinzipien nutzbar. Die derzeit am häufigsten angewendete Methode ist die Induktion. Elektrischer Wechselstrom erzeugt in einer elektrischen Erregerspule ein variierendes Magnetfeld. Bringt man in dieses Feld eine zweite Spule, wird darin wieder ein Strom induziert. Bei diesem Verfahren müssen Sender und Empfänger sehr eng beieinander liegen, um die dann aber möglichen hohen Wirkungsgrade im Bereich von 90–95 % zu erreichen.

Ein neues Verfahren, die „Resonante Induktion“, verspricht nutzbare Reichweiten von mehreren Metern und damit eine wesentliche Erweiterung des Anwendungsspektrums. Hier sind die Spulen so aufeinander abgestimmt, dass das Magnetfeld nur bei einer bestimmten Frequenz Energie übertragen kann, während andere Gegenstände in der Umgebung nur sehr wenig Energie aufnehmen sollen. Es bestehen derzeit allerdings noch Bedenken bezüglich der Exposition von Menschen mit dem elektromagnetischen Feld und Unklarheit über die bei akzeptablem Wirkungsgrad erzielbaren Reichweiten.

Bei direkter Sichtverbindung lässt sich auch mit Lasern Energie übertragen, wobei die Empfängerseite mit einer speziellen Solarzelle ausgerüstet ist. Diese ursprünglich für große Reichweiten gedachte Technik wird wegen der Fortschritte bei kompakten Halbleiterlasern auch für Kleinverbraucher im Nahbereich interessant. Es werden hier Wirkungsgrade von 15 – 30 % erwartet. Für langreichweitige Energieübertragung eignen sich auch Mikrowellen, hier fungieren Antennen als Sender und Empfänger. Wegen der deutlich höheren Wandlereffektivität sind mit Mikrowellen wesentlich höhere Wirkungsgrade als mit der Laserübertragung zu erreichen.

Viele Anwendungen der kontaktlosen Stromversorgung finden sich im Alltag dort, wo bewegliche Geräte häufig verwendet und oft aufgeladen werden. So ist bei den meisten elektrischen Zahnbürsten bereits eine induktive Aufladung über die Halterung realisiert, ähnliches ist z. B. für diverse Küchengeräte denkbar. Als lästig wird oft die Vielzahl an benötigten Ladegeräten für völlig mobile Geräte empfunden. Als alternative Ladestationen bieten sich Matten an, in die elektrische Spulen integriert sind, um ein oder mehrere darauf liegende Geräte zu laden.

In der Industrie gibt es viele Anlagen, in denen die Energie heute über Schleppkabel, Stromschienen oder Schleifringe auf rotierende oder linear bewegte Verbraucher übertragen wird. Durch drahtlose Energieversorgung wäre hier eine höhere Zuverlässigkeit erreichbar.

Medizinische Implantate und Sensoren erfüllen schon heute eine Vielzahl therapeutischer, diagnostischer oder prosthetischer Funktionen. Ein wesentliches Problem ist hier die Energieversorgung. Mit der Resonanten Induktion könnten zukünftig auch tiefer im Gewebe liegende elektrische Verbraucher effizient aufgeladen werden. Chirurgische Eingriffe zum Batteriewechsel würden völlig entfallen können. Ganze Netzwerke medizinischer Sensoren ließen sich dann von nur einer Quelle aus mit Energie versorgen.

Bei elektrischen Fahrzeugen ist generell die Energiespeicherung die limitierende Größe. Beim Schienenverkehr umgeht man dies z. B. durch Energiezuführung über Oberleitungen. Inzwischen wurde aber auch für Straßenbahnen eine Technik mit induktiver Stromversorgung vorgestellt. Auch in der Industrie werden schon länger fahrerlose Transportsysteme in Fabrikhallen induktiv gespeist. Zukünftig könnten auch Elektroautos bequem während des Parkens aufgeladen werden. Besonders bei feuchter Witterung ist ein kontaktloses

Laden auch für den Bediener sicherer. Selbst ein dynamisches Aufladen während der Fahrt über die Straße eingebrachte Induktionsschleifen ist denkbar und würde das Reichweitenproblem von Elektrofahrzeugen beheben. Auch fliegende Systeme lassen sich vom Boden aus mit Energie versorgen, so wurden unbemannte Fluggeräte (UAVs) bereits experimentell sowohl mit Lasern als auch mit Mikrowellen betrieben. Damit ließe sich die Missionsdauer von UAVs wesentlich verlängern.

Eine besonders visionäre Anwendung drahtloser Energieübertragung ist die Nutzbarmachung von Sonnenenergie mit weltraumbasierten Solarzellen, wobei sowohl Satelliten in verschiedenen Orbits vorgeschlagen werden als auch solare Kraftwerke auf dem Mond. Dabei würde die Energie quasi kontinuierlich anfallen und nicht wie auf der Erdoberfläche mit der Tageszeit und der Wolkenbedeckung variierend. Die Übertragung zur Erde könnte über Laser oder Mikrowellen erfolgen. Letztere bieten bei Nutzung geeigneter Wellenlängen den Vorteil, dass sie Dunst, Wolken oder leichten Regen ohne nennenswerte Verluste durchdringen können. Allerdings würde die Ausdehnung von Sende- und Empfangsantennen im Bereich von Kilometern liegen. Damit sind auf absehbare Zeit sehr hohe Transportkosten in den Weltraum verbunden, die die Investitionskosten für erdglobale Alternativen deutlich übersteigen.

Der Energiebedarf vor allem der stark zunehmenden Zahl elektronischer Kleinverbraucher wird in Zukunft vermehrt durch drahtlose Energieversorgungssysteme gedeckt werden. So hat sich kürzlich eine große Gruppe von Elektronikherstellern auf einen gemeinsamen Standard geeinigt, so dass das kabellose Aufladen der Akkus von unterschiedlichen elektronischen Geräten wie Mobiltelefonen oder Kameras auf einer genormten induktiven Matte schon bald Verbreitung finden wird. Mit der Realisierung besonders investitionsintensiver Anwendungen wie der dynamischen Ladung von Elektroautos auf der Straße oder der Energiegewinnung im Weltraum ist dagegen allenfalls sehr langfristig zu rechnen.

Dr. Ulrik Neupert, September 2010

3D-Displays

Getrieben durch die Bedürfnisse und Marktinteressen der Unterhaltungsindustrie erfahren 3D-Displays heute einen starken Entwicklungsschub, der technisch auf der zunehmenden Digitalisierung der Aufnahme- und Wiedergabetechnik basiert.

3D-Displays sind spezielle Bildschirme oder Projektionssysteme zur Darstellung dreidimensionaler Bilder. Ihre Stärke liegt darin, dass sie dem Betrachter komplexe räumliche Anordnungen auf besonders einfache und intuitive Art verständlich machen können. Davon macht man schon seit vielen Jahren im professionellen Bereich Gebrauch, beispielsweise in der Produktentwicklung zur räumlichen Darstellung digitaler Modelle, in der Medizin zur virtuellen Operationsplanung oder in der Wehrtechnik zur Simulation von Flugmanövern. Getrieben durch die Bedürfnisse und Marktinteressen der Unterhaltungsindustrie erfahren 3D-Displays heute einen starken Entwicklungsschub, der technisch auf der zunehmenden Digitalisierung der Aufnahme- und Wiedergabetechnik basiert.

Es gibt viele unterschiedlich funktionierende 3D-Displays, die alle gewisse Vor- und Nachteile haben und prinzipiell auf jeweils einem von drei völlig verschiedenen Verfahren beruhen. Bei Volumendisplays sind die erzeugten Bilder nicht aus Pixeln auf einer Fläche aufgebaut, sondern aus sog. Voxeln in einem räumlich begrenzten und abgeschlossenen Volumen. Die Voxel werden durch schnell bewegte Objekte erzeugt, wie z.B. rotierende Scheiben, die entweder selbst leuchten oder als Projektionsfläche dienen. Solche Volumendisplays lassen sich ohne Brille aus beliebigen Positionen und von mehreren Nutzern gleichzeitig betrachten, liefern aber nur sehr kleine 3D-Bilder und eignen sich allein für computeranimierte Inhalte, so dass sie immer ein Nischenprodukt sein werden.

Bei holografischen Verfahren wird bei der Bilderfassung zusätzlich zur Intensität (Helligkeit) und zur Farbe auch die Phasenlage der von den abgebildeten Objekten reflektierten Lichtwellen aufgenommen. Dazu nutzt man Laserlicht, das in diesen drei Grundeigenschaften

definiert und kontrollierbar technisch einsetzbar ist. Dadurch kann bei der Bildwiedergabe das von den Objekten ursprünglich ausgehende Lichtfeld exakt rekonstruiert werden, einschließlich der relativen Lage der Ausgangspunkte der Lichtwellen. So nimmt der Betrachter die Objekte wie reale, dreidimensionale Kopien wahr. Damit wäre die Holografie die ideale 3D-Technik. Allerdings würden bei der Aufnahme und Darstellung von fotorealistischen Bewegtbildern Datenraten in der Größenordnung von 100 Terabyte pro Sekunde anfallen, die mit heutiger Technik und auch in absehbarer Zeit weder übertragbar noch verarbeitbar sind. Es gibt jedoch vielversprechende Ansätze zur Reduzierung der Datenmengen, indem nur die Teile des Lichtfeldes erzeugt werden, die der Betrachter auch sieht.

Am weitesten verbreitet und entwickelt sind stereoskopische Displays. Deren Grundprinzip besteht darin, dem linken und dem rechten Auge Bilder mit leicht unterschiedlichen Perspektiven der dargestellten Szene zu liefern. Wie beim natürlichen Sehen setzt das Gehirn diese beiden verschiedenen Halbbilder zusammen und erzeugt damit eine räumliche Wahrnehmung. Für einen einzelnen Nutzer eignen sich sog. Head-Mounted-Displays, bei denen zwei in einer Brille oder einem Helm montierte kleine LCDs die Halbbilder getrennt für das linke und rechte Auge liefern.

Um stereoskopische Bilder einer größeren Anzahl von Zuschauern zugänglich zu machen, nutzt man Projektionstechniken in Verbindung mit speziellen Brillen zur Trennung der Halbbilder. Im Kino kommen heute drei verschiedene Techniken zum Einsatz. Bei der Verwendung von Polarisationsfilterbrillen schwingen die von den beiden projizierten Halbbildern ausgehenden Lichtwellen in unterschiedlichen Polarisationsrichtungen. Die beiden Gläser der Brillen sind jeweils nur für eine der beiden Polarisierungen transparent und trennen so die Halbbilder für das linke oder rechte Auge. Ein neueres Verfahren, das ohne teure polarisationserhaltende Leinwand auskommt, nutzt Interferenzfilterbrillen. Hier werden Halbbilder mit jeweils leicht unterschiedlichen Grundfarbtönen von Rot, Grün und Blau erzeugt. Die äußerst trennscharfen Interferenzfilter der Brille sorgen dafür, dass die farbig leicht verschiedenen Halbbilder getrennt die Augen erreichen.

Durch eine Farbkorrektur im Filmmaterial sind die resultierenden 3D-Bilder genauso farbgetreu wie bei der Polarisationstechnik. Das dritte Verfahren, das ebenfalls ohne spezielle Leinwand auskommt, nutzt sog. Shutter-Brillen. Hier werden die beiden Halbbilder von einem Projektor nacheinander projiziert oder von einem schnellen Flachbildschirm nacheinander angezeigt. Die Gläser der Shutter-Brillen sind aktive LCD-Elemente, die elektronisch

im Wechsel lichtdurchlässig und -undurchlässig geschaltet werden und so nur die für das jeweilige Auge bestimmten Halbbilder durchlassen.

Besonderen, insbesondere kommerziellen Erfolg verspricht man sich von autostereoskopischen Displays, die ohne Brillen auskommen und derzeit in den Mittelpunkt der Entwicklungsbemühungen rücken. Bei den gängigsten Verfahren werden die Stereo-Halbbilder in abwechselnde vertikale Streifen zerteilt auf einem Bildschirm dargestellt. Eine Maske vor dem Bildschirm bewirkt dann, dass ein einzelner Betrachter in einer bestimmten Position mit dem linken Auge nur die Streifen des linken Halbbildes und mit dem rechten nur die des rechten Halbbildes sieht. Als Maske werden Linsenraster aus streifenförmigen Linsen verwendet, die die Halbbilder in getrennte Winkelbereiche abstrahlen, oder Linienraster aus lichtundurchlässigen Streifen, die in einer bestimmten Position des Betrachters jeweils die Streifen der Halbbilder des anderen Auges verdecken. Auf dem Markt gibt es bereits erste autostereoskopische Displays mit Linienrastern auf LCD-Basis, die sich abschalten lassen, so dass das Display wahlweise 2D- oder 3D-Inhalte wiedergeben kann. Zurzeit arbeitet man daran, autostereoskopische Displays so weiterzuentwickeln, dass sie in einem größeren Winkelbereich von mehreren Nutzern gleichzeitig zu betrachten sind, so dass sie sich auch für zukünftige 3D-Fernseher eignen würden.

Ein anderes sehr vielversprechendes autostereoskopisches Verfahren ist die Integral-Imaging-Technik, bei der hunderttausende Mikrolinsen die Betrachtung aus einem großem Winkelbereich nicht nur in horizontaler, sondern auch vertikaler Richtung ermöglichen. Erste Prototypen mit sehr geringer Auflösung konnten schon scheinbare Tiefen von mehreren Metern erzeugen.

Dr. David Offenberg, Oktober 2010

Compressed Sensing

Compressed Sensing bietet einen neuen Ansatz auf dem Gebiet der Sensorsignalverarbeitung, indem die Sensordatengewinnung und -komprimierung nicht mehr nacheinander, sondern in einem einzigen Schritt gewissermaßen gleichzeitig erfolgt.

Compressed Sensing (CS, auch: Compressive Sensing oder Compressive Sampling; deutsch: komprimierte Abtastung) stellt eine neue Entwicklung auf dem Gebiet der Sensorsignalverarbeitung dar. Gegenwärtig ist es vielfach üblich, dass die bei einem Sensorsystem, wie z.B. einer Digitalkamera, anfallenden Sensordaten nach ihrer Erfassung komprimiert werden, um sie dadurch besser speichern oder auch übertragen zu können. Nach dieser Komprimierung verbleibt dann oft nur noch ein Bruchteil der ursprünglich gewonnenen Datenmenge, so dass wesentlich mehr Daten gemessen wurden als anschließend tatsächlich auch genutzt werden. Diese Vorgehensweise ist daher entsprechend ineffizient. CS bietet hier einen neuen Ansatz, indem die Sensordatengewinnung und -komprimierung in einem einzigen Schritt gewissermaßen gleichzeitig erfolgt (woraus auch die Namensgebung resultiert). Die Daten werden also schon in einer komprimierten Form erfasst.

Eine wesentliche Basis der Signalverarbeitung ist traditionell durch die so genannte Shannon-Nyquist-Regel gegeben, die eine wichtige Grundlage für die Digitalisierung von analogen Signalen bildet. Allgemein werden bei einer Digitalisierung kontinuierliche Signalverläufe in eine Abfolge von diskreten Messwerten überführt. Nach der Shannon-Nyquist-Regel muss ein Signal dabei mit einer Frequenz abgetastet werden, die mindestens doppelt so hoch ist, wie die höchste in diesem Signal enthaltene Frequenz. Nur dann ist es zumindest prinzipiell möglich, aus diesen so erhaltenen Messwerten das ursprüngliche Signal ohne Informationsverlust wieder zu rekonstruieren. Der neue Ansatz des CS benötigt hierfür unter gewissen Bedingungen deutlich weniger Messwerte. Eine dieser Voraussetzungen besteht dabei darin, dass das zu messende Signal eine erhebliche Komprimierung der zu dessen Beschreibung erforderlichen Daten gestattet. Dies bedeutet, dass der

letztendlich relevante Informationsinhalt aufgrund der Struktur des Signals eher gering ist, wenn man sich auf dessen wesentliche Merkmale konzentriert. Interessanterweise besitzen etliche natürliche Signale, wie z. B. viele natürliche Bilder, genau diese Eigenschaft. Eine weitere Bedingung für die Anwendbarkeit von CS betrifft die Art und Weise, wie die erforderlichen Messungen des Signals vorgenommen werden müssen. Diese sollten in ihrer Struktur möglichst wenig derjenigen der zu messenden Signale ähneln, sondern stattdessen eher unstrukturiert sein, d. h. zufalls- bzw. rauschartig. Da das Signal nach seiner Erfassung im Rahmen von CS bereits in einer komprimierten Form vorliegt, müssen die gewonnenen Daten vor ihrer Nutzung noch in einem geeigneten Rekonstruktionsverfahren dekomprimiert werden.

Die Eigenschaft von CS, ein Signal mit potenziell deutlich weniger Messwerten erfassen zu können, als dies traditionell möglich erscheint, ist in verschiedenen Situationen von Interesse. Hierzu zählen Aufgabenstellungen, bei denen die Anzahl der einsetzbaren Sensoren begrenzt ist, wie z. B. bei Sensornetzwerken mit nur vergleichsweise wenigen Sensorknoten. Außerdem bietet diese Methode auch Vorteile, wenn der einzelne Messvorgang, wie in verschiedenen bildgebenden Verfahren, extrem aufwändig oder sehr langwierig ist, so dass hier nur eine geringe Anzahl von Messungen sinnvoll durchgeführt werden kann. Aufgrund des effizienteren Ansatzes der gleichzeitig erfolgenden Signalerfassung und -komprimierung gestattet CS darüber hinaus auch energiesparendere Sensorsysteme.

Ein vielversprechendes denkbare Einsatzgebiet von CS liegt im medizinischen Bereich. Hier konnten bereits erste Ergebnisse im Rahmen der so genannten Magnetresonanztomographie gewonnen werden. Bei diesem bildgebenden Verfahren lässt sich durch den Einsatz von CS die Bildgewinnung deutlich beschleunigen, so dass die Zeitspanne, in welcher der Patient möglichst bewegungslos verharren muss, erheblich verkürzt werden kann. Darüber hinaus befinden sich noch weitere interessante Anwendungen zurzeit in der Entwicklung. Hierzu zählen z. B. CS-basierte Digitalkameras. Derartige Kameras können unter anderem auf der Grundlage eines einzelnen Lichtsensors in Verbindung mit einer schachbrettartigen Anordnung von Mikrospiegeln verwirklicht werden. Die Mikrospiegel reflektieren dabei das Licht der aufzunehmenden Szene auf den Sensor. Der CS-spezifische Messprozess beruht dann auf einer zufälligen Ausrichtung der einzelnen Mikrospiegel. Solche Systeme könnten insbesondere für die Realisierung von kostengünstigen Kameras von Interesse sein, die außerhalb des sichtbaren Spektrums operieren, z. B. im Infrarot- oder Terahertzbereich.

Ein weiteres Anwendungsgebiet findet sich im Rahmen der Verarbeitung von Funksignalen mit sehr hoher Signalbandbreite. Hier bietet CS möglicherweise eine aussichtsreiche Grundlage für deutlich leistungsfähigere Analog-Digital-Wandler. Außerdem können zukünftig auch Sensornetzwerke vom Ansatz des CS profitieren. Auf diese Weise lassen sich beispielsweise energiesparende Sensornetzwerke realisieren oder die bei umfangreichen Sensornetzwerken anfallenden großen Datens Mengen besser handhaben. Andere mögliche Anwendungsbereiche von CS beinhalten Radargeräte, die z.B. über eine potenziell höhere Auflösung als klassische Systeme verfügen, oder auch energiesparende Sensorsysteme für einen Einsatz in der Raumfahrt.

Die im Rahmen von CS gewonnenen neuen Erkenntnisse haben die bisher vorherrschenden Ansichten auf dem Gebiet der Signalverarbeitung in gewisser Weise revolutioniert. Allerdings verbleiben noch einige Herausforderungen für diesen neuen Ansatz. So ist es unter anderem erforderlich, ganz neue Arten von Sensorsystemen zu konzipieren, welche die besondere Form des für CS erforderlichen Messprozesses in einer geeigneten Weise implementieren. Darüber hinaus stellt die Entwicklung effizienter Algorithmen, welche die erfassten Sensordaten sehr schnell dekomprimieren können, ein wichtiges aktuelles Forschungsthema dar. Generell gilt, dass die möglichen Grenzen dieser Technologie noch nicht vollständig verstanden sind.

Dr. Klaus Ruhlig, November 2010

Bioremediation

Eine zunehmende Rolle in der Optimierung geeigneter Mikroorganismen im Hinblick auf die biologische Schadstoff-eliminierung in der Umwelt spielen heute gentechnische Verfahren.

Unter dem Begriff Bioremediation versteht man Methoden zur biologischen Schadstoff-eliminierung in der Umwelt. Entsprechende Verfahren zielen im Grundsatz darauf ab, vorhandene Schadstoffkontaminationen möglichst vollständig abzubauen, indem diese durch Mikroorganismen verstoffwechselt werden. Im Mikrokosmos gibt es eine große Vielfalt dazu im Prinzip geeigneter Organismen. Diese Tatsache ist die Basis für die Entwicklung effizienter Abbauverfahren. Dabei ist die prinzipielle biologische Abbaubarkeit einer Kontamination hier zwar eine Grundvoraussetzung, aber keine Erfolgsgarantie für die Anwendung eines biotechnologischen Remediationsverfahrens. Von Bedeutung ist darüber hinaus, dass die Schadstoffe unter Praxisbedingungen in ausreichender Konzentration ohne toxische Effekte biologisch verfügbar sind. Eine zunehmende Rolle in der Optimierung geeigneter Mikroorganismen im Hinblick auf die abzubauenden Schadstoffe und auf die Vermeidung unerwünschter Abbauprodukte spielen heute gentechnische Verfahren.

Die verschiedenen derzeit verfügbaren Bioremediationsverfahren lassen sich unterteilen in natürliche Selbstreinigungsprozesse (Natural Attenuation), Biostimulierung und Bioaugmentation. Unter Natural Attenuation versteht man die Abbauleistung der standorteigenen Mikroorganismen unter den am Standort vorherrschenden Bedingungen. Es handelt sich also um ein passives Verfahren, welches lediglich ein Monitoring der Fortschritte beim Schadstoffabbau erfordert. Auch die Biostimulation beruht auf der Abbauleistung von im kontaminierten Medium selbst vorhandenen Mikroorganismen. Durch Belüftung oder Nährstoffzufuhr wird hier jedoch versucht, die physikochemischen Voraussetzungen und die Nährstoffbedingungen, die für den Abbau limitierend sind, zu verbessern. Das aufwändigste Verfahren ist die zumeist als Bioaugmentation bezeichnete Beimpfung mit Spezialkulturen.

Der Einsatz von Spezialkulturen ist vor allem dann sinnvoll, wenn die natürliche mikrobielle Abbauaktivität im kontaminierten Medium unzureichend ist.

Bei der Bioremediation wird zudem zwischen Verfahren, bei denen das kontaminierte Material direkt am Kontaminationsstandort behandelt wird (In-situ-Verfahren), und solchen, bei denen die Behandlung nach Transport in einer Behandlungsanlage erfolgt (Ex-situ-Verfahren), unterschieden. Letztere erfordern zwar schon allein wegen des nötigen Transports einen höheren Aufwand, bieten jedoch auf der anderen Seite mehr Möglichkeiten zur Förderung des mikrobiellen Abbaus. So kann man hier die Bioverfügbarkeit relativ einfach mittels Homogenisierung, Auflockerung, Belüftung oder Nährstoffzufuhr erhöhen sowie Spezialkulturen oder Zuschlagstoffe wie z.B. Holzschnitzel zusetzen.

Die In-situ-Bioremediation ist von der Verfahrenstechnik her deutlich anspruchsvoller. Sie wird insbesondere dann eingesetzt, wenn aufgrund des Umfangs Ex-situ-Verfahren nicht einsetzbar bzw. zu kostspielig sind, etwa bei tiefliegender Bodenkontamination bis zum Grundwasser, großflächiger Kontamination von Meeresküsten oder Ähnlichem. Bei Bodenkontaminationen können die oberen Bereiche durch Bodenlüftung (Bioventing) von flüchtigen Kontaminanten gereinigt werden. Zudem sind hydraulische Verfahren möglich, bei denen tiefer liegende Bodenschichten mit Wasser durchströmt werden, welches durch den kontaminierten Boden gepumpt und dann an der Oberfläche in Bioreaktoren gereinigt wird. Zur Beurteilung der Möglichkeiten mikrobieller Abbauprozesse in situ und der dafür notwendigen Verfahrenstechnik ist eine detaillierte Bestandsaufnahme der geologischen, hydrogeologischen, mechanischen und chemischen Standortparameter sowie deren Integration in Computermodelle und in Vorversuche nötig.

Die In-situ-Sanierung kontaminiert Standorte kann auch die Animpfung und damit die Freisetzung von Mikroorganismen, die entweder natürlichen Ursprungs oder gentechnisch verändert sind, beinhalten (Bioaugmentation). Solche Mikroorganismen könnten sich z.B. besonders für die Mineralisierung verschiedener organischer Schadstoffverbindungen eignen. Ein bekanntes Beispiel für eine biologische Sanierung mit natürlich vorkommenden Bakterien im Freiland ist die des Prince William Sound (Alaska) nach der Havarie des Tankers Exxon Valdez im Jahre 1989.

In Verbindung mit der Animpfung stellt sich vor allem die Frage, ob die Freisetzung großer Mengen von Mikroorganismen, insbesondere dann, wenn sie gentechnisch verändert sind,

nicht doch unerwünschte Folgen für die Umwelt haben wird. Besondere Aufmerksamkeit widmet man der möglichen Ausbreitung von Genen. Der Gentransfer zwischen Bakterien kann durch die direkte Übertragung chromosomaler DNA (Transformation), durch Viren als Überträger (Transduktion) oder durch einen plasmidvermittelten Prozess, der Konjugation genannt wird, erfolgen. Plasmide sind kleine, in der Regel ringförmige, sich selbstständig vermehrende DNA-Moleküle. Unter natürlichen Umweltbedingungen sind jedoch sowohl die Transformation als auch die Transduktion durch natürliche Abwehrmechanismen der Mikroorganismen, durch Beschränkung auf nähere Verwandtschaft zwischen Spender- und Empfängerbakterium bzw. durch ein schmales Infektionspektrum der Viren stark eingeschränkt. Hingegen ist allgemein anerkannt, dass der plasmidvermittelte Gentransfer eine signifikante Rolle bei der Verbreitung von Genen in Böden spielt. Von speziellem Interesse für die Ausbreitung von Genen ist dabei das Vorhandensein bestimmter Plasmide, die einen breiten Wirkungsbereich haben und in verschiedenen Bakterienarten vorkommen können. Die zuverlässige Vermeidung solcher Nebenwirkungen wird sicher Einfluss auf die weitere Verbreitung von Bioremediationsverfahren haben.

In der Vergangenheit wurden Bioremediationsverfahren hauptsächlich bei Mineralölschadensfällen und bei der Altlastensanierung eingesetzt. Aber auch bei der Behebung von Umweltschäden durch schwer abbaubare Xenobiotika (z. B. Lösungsmittel, Kunststoffe und Schwermetalle) sowie Giftstoffe (z. B. DDT, Dioxine oder TNT) wird zukünftig verstärkt mit Bioremediation gearbeitet werden. Darüber hinaus gibt es einen Trend, Bioremediationsverfahren über die reine Schadensbehebung hinaus zur allgemeinen Verbesserung von Böden und Gewässern einzusetzen.

Dezember 2010

Beiträge aus 2011

Evolutionäre Robotik	94
Text Mining	97
Siliziumcarbid in der Elektronik	100
Homomorphe Verschlüsselung	103
Quantencomputer	106
Eisenbasierte Hochtemperatursupraleiter	109
Agentenbasierte Modelle	112
Climate Engineering	115
Drahtlose UV-Kommunikation	118
Magnetische Kühlung	121
Neue Werkstoffe für den Korrosionsschutz	124
Elektromobilität	127





Evolutionäre Robotik

Auch für die ferne Zukunft bleibt es fraglich, ob die Entwicklung von Robotern jemals streng evolutionär, also vollkommen ohne menschliches Zutun wird stattfinden können.

Evolutionäre Robotik ist eine neue, aufstrebende Disziplin, die noch am Anfang ihrer Entwicklung steht. Ermöglicht wurde sie durch die stetig wachsende Rechenleistung moderner Computersysteme im letzten Jahrzehnt. In dieser Disziplin soll sich ein neuer Roboter größtenteils selber oder mit Hilfe von anderen Maschinen, z. B. computergestützt, möglichst autonom entwickeln. Die Maschine ist also selbst ihr eigener Schöpfer oder erschafft andere Maschinen. Der Mensch gibt dabei lediglich die Rahmenbedingungen vor, d. h. er definiert das Umfeld, in dem sich der Roboter bewegen können muss, sowie die vom Roboter zu lösenden Aufgaben.

Der Entwicklungsprozess ist dabei inspiriert durch die natürliche Evolution und beruht ähnlich wie sein biologisches Vorbild auf den vier Säulen der Population, Diversität, Selektion und Mutation. In einer Menge (Population) von Lebewesen (oder hier: technischen Lösungen) mit unterschiedlich ausgeprägten genetischen und phänotypischen, d.h. äußereren Merkmalen (Diversität) werden die unterschiedlichen Individuen in einer Umgebung getestet. Dabei stehen sie in gegenseitiger Konkurrenz. Setzen sie sich durch, weil sie durch ihre Leistungsmerkmale bzw. wegen ihrer „Fitness“ den anderen überlegen sind (Selektion), vererben sie ihre genetischen und phänotypischen Eigenschaften in die nächste Generation. Bei der Vererbung werden die Eigenschaften jedoch zufällig mehr oder weniger stark verändert. Dies geschieht z.B. durch Mutationen. Anschließend treten die Mitglieder der nächsten Generation in Konkurrenz zueinander usw.

Um eine solche Strategie technisch umzusetzen, bedient man sich der sog. Evolutionären Algorithmen. Diese sind als eine Art Regelsatz zu verstehen, durch den der künstliche

evolutionäre Prozess geleitet wird. Allerdings gibt es einen essenziellen Unterschied zwischen dem biologischen Vorbild und der künstlichen Nachahmung. In der natürlichen Evolution setzt sich derjenige Organismus durch, der sich am erfolgreichsten fortpflanzt. Die Fitness wird also bestimmt durch den reproduktiven Erfolg. In der evolutionären Robotik gibt es dieses Kriterium noch nicht, da Roboter bisher nicht in der Lage sind sich fortzupflanzen. Stattdessen bedient man sich einer Fitnessfunktion. Diese beschreibt, wie gut der jeweilige Roboter angepasst ist, um die ihm gestellten Aufgaben in seiner Umgebung zu bewältigen. Die Fitness in der Evolutionären Robotik ist demnach vor allem abhängig von der zu leistenden Aufgabe und nicht von der Reproduktionsrate.

Eine Optimierung mittels Evolutionärer Algorithmen besitzt gegenüber herkömmlichen (z. B. mathematischen) Optimierungsverfahren einige grundlegende Vorteile, die sie für den Bereich der Forschung und Entwicklung attraktiv erscheinen lassen. So werden nur wenige Informationen über das zu optimierende System benötigt. Daher lassen sich auch solche Systeme optimieren, die mathematisch nur schwer oder gar nicht beschreibbar sind. Die Lösungssuche beruht auf dem Prinzip Zufall, ist somit ungerichtet, nach allen Seiten offen und nicht auf die Fantasie des menschlichen Bedieners beschränkt. So können vollkommen überraschende Lösungen entstehen. Da eine Population von Individuen/Robotern untersucht wird, können mehrere Lösungsstrategien gleichzeitig verfolgt werden. Der Prozess führt also nicht nur zu einer, sondern zu einer Vielzahl von Lösungen.

Durch die Vorteile sind allerdings auch schon fast automatisch die Nachteile gegeben. Da ungerichtet mehrere Wege gleichzeitig verfolgt werden, kann ein solcher Prozess sehr zeitintensiv sein. Hier sorgen jedoch die inzwischen sehr guten Rechenleistungen moderner Computer für Abhilfe, indem ein Großteil der evolutionären Entwicklung computergestützt in künstlichen physikalischen Realitäten beschleunigt simuliert werden kann und erst am Ende des Prozesses die entwickelten Roboter real gebaut und getestet werden.

Ein bahnbrechendes Projekt vor allem bezogen auf die Methodik war „The Golem Project“, durchgeführt von Lipson und Pollack an der Brandeis University in den Vereinigten Staaten. Hierbei wurden in einem Computerprogramm Roboter in einer künstlichen physikalischen Welt mittels evolutionärer Prozesse unter definierten Rahmenbedingungen entwickelt, die sich möglichst gut fortbewegen sollten. Neben dem äußeren Erscheinungsbild wurde parallel ein künstliches neuronales Netz im Computer für die Bewegungssteuerung entwickelt. Letztendlich wurden die entwickelten Robotergestalten mit einem 3D-Drucker in

die reale Welt transferiert und getestet. Es entstanden viele höchst unterschiedliche Roboterformen, die sich auf unterschiedlichste Art und Weise kriech- bis gangähnlich fortbewegen konnten.

Die Evolutionäre Robotik startete damit, die äußere Gestalt oder einfache Verhaltensweisen, wie z. B. die Fortbewegung, das Navigieren durch einen definierten Raum oder die neuronale Bewegungssteuerung, zu optimieren. Inzwischen widmet man sich aber auch wesentlich komplexeren Fragestellungen. Eine der größten Einschränkungen evolutionär erschaffener Roboter ist bisher das Fehlen von adaptiven Fähigkeiten. Die Eigenschaften werden zwar durch Mutationen variiert, im Laufe der Lebenszeit eines Roboters können diese Eigenschaften dann aber nicht mehr verändert werden. Der Roboter vermag es somit nicht, auf Veränderungen in seiner Umwelt zu reagieren. Um derartige Eigenschaften zu ermöglichen, beschäftigen sich die Forscher zunehmend damit, adaptive Fähigkeiten wie Lernen oder Wachstum zu implementieren. Dabei könnten auch Lernmechanismen mit neuronalen Netzen simuliert und diese mittels Evolutionärer Algorithmen optimiert werden.

Obwohl der Optimierungsprozess größtenteils bioinspiriert ist, entstehen bei der Anwendung von evolutionären Methoden nicht zwangsläufig auch Roboter, die biologischen Systemen ähnlich sind. Die Natur dient lediglich als Vorbild, wie Systeme in einer Umgebung aus sich selbst heraus entstehen und optimiert werden können. Damit dieser Prozess noch autonomer ablaufen kann, möchte man den Robotern auch die Fähigkeit zur Reproduktion geben. Das ist allerdings ein noch weit entferntes Ziel. Aber auch für die ferne Zukunft bleibt es fraglich, ob die Entwicklung von Robotern jemals vollkommen ohne menschliches Zutun wird stattfinden können.

Dr. Martin Müller, Januar 2011

Text Mining

Text Mining dient zur Gewinnung von neuen Erkenntnissen aus in digitaler Form gespeicherten Texten. Ein vollständiges automatisches Verständnis der Inhalte ist aber vorläufig nicht zu erwarten.

Das Text Mining ist ein Begriff aus der Informations- und Wissensverarbeitung. Er beschreibt Methoden zur Gewinnung von neuen Erkenntnissen aus in digitaler Form gespeicherten Texten. Im Einzelnen geht es um Prozesse der Zusammenstellung, Organisation und Analyse großer Dokumentensammlungen mit dem Ziel einer bedarfsgerechten Extrahierung von Informationen und der Entdeckung bisher unbekannter Beziehungen zwischen Texten. Seine wachsende Bedeutung verdankt das Text Mining vor allem der Tatsache, dass der Großteil aller weltweit vorhandenen Informationen inzwischen in digitaler Form vorliegt.

Gleichzeitig profitieren die eingesetzten Verfahren und Programme von den immer größeren Fortschritten bei der Computerhardware und -software. Dabei steht das Text Mining heute erst am Anfang einer prognostizierten weiten Verbreitung in viele Gebiete unseres beruflichen und privaten Umfelds hinein.

Die möglichen Aufgabengebiete des Text Mining sind vielfältig. Zu ihnen gehören z. B. die Klassifikation oder die Clusterung von Textbestandteilen, die Erzeugung von Begriffsrelationen, Beschreibungen und Textzusammenfassungen sowie die semantische Suche nach Sinnzusammenhängen. Methoden des Text Mining stellen außerdem ein leistungsstarkes Werkzeug im Bereich der maschinellen Übersetzung und der Erschließung anderssprachiger oder fachspezifischer Dokumente dar.

Wichtige Anwendungsgebiete sind ferner das Erkennen und Beobachten von Trends, Themen und Meinungen, die Ermittlung thematischer oder kooperativer Netzwerke sowie die Strukturierung und Analyse wissenschaftlicher Publikationen und Patente.

Als Gesamtprozess umfasst das Text Mining die Einzelschritte Dokumentauswahl, Vorverarbeitung, Analyse und Ergebnisrepräsentation. Bei der Dokumentauswahl kommen verschiedene Methoden des Informationsabrufs (Information Retrieval) zum Einsatz. Wichtig sind z. B. die konzeptbasierten Methoden. Diese verarbeiten nicht einzelne Begriffe, sondern so genannte Konzepte, die mehrere Begriffe ähnlicher Bedeutung beinhalten. Unter dem Konzept Automobil z. B. lassen sich Begriffe wie Auto, Personenkraftwagen, Karre, fahrbarer Untersatz usw. zusammenfassen. Mit diesem Ansatz lassen sich dann ähnliche Dokumente finden, die nicht notwendigerweise identische Begriffe enthalten müssen.

In der Vorverarbeitungsphase müssen die in der Regel in schwach strukturierter bzw. unstrukturierter Form vorliegenden Texte zur Weiterverarbeitung erst strukturiert werden. Dazu finden neben musterbasierten hauptsächlich statistische und computerlinguistische Verfahren Anwendung. Die Nutzung statistischer Verfahren setzt dabei voraus, dass im konkreten Untersuchungsfall die Häufigkeit sowie das gemeinsame Vorkommen von Begriffen überhaupt Schlüsse über Relevanz und inhaltliche Zusammenhänge erlauben.

Wichtige computerlinguistische Verfahren sind die morphologische, die syntaktische und die semantische Analyse. Bei der morphologischen Analyse wird der Text erst in einzelne Wörter zerlegt. Dann werden die Wortstämme oder Grundformen der einzelnen Wörter ermittelt und Wörter geringer Bedeutung aussortiert. Der Fokus einer syntaktischen Analyse liegt in der Analyse der Satzstrukturen. Hierzu zählen die vollautomatische Zuordnung der Wortarten und das Zusammenfassen identifizierter Wörter zu Wortgruppen wie z. B. Redewendungen. Bei der semantischen Analyse wird der Text in bedeutungsabhängige Einheiten zerlegt. Das hierfür erforderliche kontextuelle Wissen ist u. a. über Referenztexte, Wörterbücher und externe Wissensressourcen wie Nachrichten oder Webseiten sozialer Netzwerke erhältlich. Viele der bislang nur unzureichend gelösten Probleme des Text Mining sind in dem Bereich der Semantik angesiedelt und begründen sich u. a. in Mehrdeutigkeiten von Begriffen, verschiedenen Formulierungsvarianten, multikulturell bedingten unterschiedlichen Darstellungen oder in außersprachlichen Kontexten.

Nachdem die textuellen Daten in der Vorverarbeitungsphase eine Struktur erhalten haben, erfolgt die eigentliche Auswertung. Auch hier steht eine Vielzahl von Methoden zur Auswahl. Einen hohen Stellenwert besitzt die graphische Datenanalyse. Sie erlaubt es, einen Einblick in zugrundeliegende Strukturen zu erhalten und ein tieferes Verständnis für die Infor-

mationen zu entwickeln. Von besonderem Interesse sind dabei Wissensnetze, mit deren Hilfe sich z.B. Beziehungen zwischen verschiedenen Forschungsgebieten, aber auch Zitationszusammenhänge, autoren- bzw. institutionsbasierte Kollaborationsmuster und die Vernetzung von Themen erkennbar machen lassen.

Anwendung findet das Text Mining z.B. bereits im Bereich der Wettbewerbsanalyse oder Kundenbeziehungspflege. Ein interessantes Einsatzgebiet ist die Ermittlung der auf den Webseiten sozialer Netzwerke geäußerten Meinungen zu einem Unternehmen bzw. zu dessen Produkten. Auch in so unterschiedlichen Bereichen wie der automatischen Filterung und Verteilung von Nachrichten, dem Schutz geistigen Eigentums oder bei Firmenkauf- und Beteiligungsprüfungen werden Methoden des Text Mining eingesetzt. Dazu kommen in den letzten Jahren zunehmend die Bereiche vermögens- und wirtschaftsrechtliche Delikte und Terrorismusabwehr.

In der Forschung und Entwicklung gewinnt das Text Mining in Verbindung mit der Bibliometrie, d.h. dem statistischen Vermessen von Publikationen, ebenfalls verstärkt an Bedeutung. Hier liefert es ergänzend tiefergehende Informationen und kann sich bis zur Volltextauswertung erstrecken. Einer der herausragenden Vorteile des Text Mining ist die Herstellung fachdissziplinübergreifender Zusammenhänge. Auf diese Weise wurde z.B. der Zusammenhang zwischen Magnesiummangel und Migräne entdeckt.

In den kommenden Jahren wird die Bedeutung des Text Mining u.a. durch die ständig zunehmenden Einsatzmöglichkeiten im Unternehmensumfeld, im Wissensmanagement und im Bereich des „Semantic Web“ weiter ansteigen. So wird es in Zukunft wesentlich dazu beitragen, dass sich multilinguale, multimediale sowie multimodale, d.h. über verschiedene Sinneseindrücke erfahrbare Inhalte aus ständig wachsenden Datenbeständen erschließen lassen. Das Text Mining erfordert dafür auch weiterhin in einem iterativen und interaktiven Prozess die kognitiven Fähigkeiten des Menschen. Ein vollständiges automatisches Verständnis von Texten ist vorläufig nicht zu erwarten.

Dr. Birgit Weimert, Februar 2011

Siliziumcarbid in der Elektronik

Die weitere Verbreitung von SiC als Halbleitermaterial in der Elektronik wird wesentlich davon abhängen, wie wirtschaftlich es in geeigneter Form herstellbar ist.

Siliziumcarbid (SiC) zählt zu den Keramiken und wurde in der Technik ursprünglich vor allem wegen seiner Härte und seiner Hochtemperaturfestigkeit eingesetzt. Auf Grund weiterer herausragender physikalischer Eigenschaften ist es allerdings auch ein viel versprechendes Halbleitermaterial insbesondere für die Leistungs- und Höchstfrequenzelektronik. Bereits in den 1970er Jahren basierten die ersten LEDs auf SiC. Vor etwa 20 Jahren gelang es zum ersten Mal, SiC auch in der für die Elektronik notwendigen Weise als Wafer kommerziell herzustellen. Seitdem werden weltweit intensive Forschungsanstrengungen unternommen, das Material für die verschiedensten Bereiche der Elektronik auch wirtschaftlich nutzbar zu machen.

SiC ähnelt der Kohlenstoffmodifikation Diamant, erreicht aber nicht deren Härte. Außerdem zeigt SiC eine ausgeprägte Polytypie, kann also in einer Vielzahl von atomaren Anordnungen kristallisieren. Derzeit sind über 200 Varianten bekannt, die sich im Wesentlichen durch unterschiedliche Stapelfolgen der Atomlagen unterscheiden. Die anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung konzentriert sich überwiegend auf drei Polytypen mit drei-, vier- oder sechslagigen Stapelfolgen. Derzeit wird der vierlagige Typ aufgrund seiner insgesamt betrachtet besten Materialeigenschaften bevorzugt in der Elektronik eingesetzt. Dagegen hat eine Variante des dreilagigen Typs aufgrund ihrer strukturellen Nähe zu Silizium den großen Vorteil, dass sie auf Silizium aufgewachsen und in siliziumbasierte mikromechanische Systeme (MEMS) integriert werden kann.

Durch den Einbau von Fremdatomen („Dotieren“) lassen sich die Halbleitereigenschaften von SiC in weitem Bereich modifizieren. Hierfür werden vor allem die Elemente Stickstoff,

Phosphor, Aluminium und Bor genutzt. Ein weiterer Vorteil von SiC ist seine sehr gute Wärmeleitfähigkeit, die über der von Kupfer liegt.

Die im Vergleich zu Silizium sehr große elektronische Bandlücke verringert die thermische Aktivierung von Elektron-Loch-Paaren und damit der elektrischen Leitung. Dies ermöglicht den funktionellen Einsatz von SiC bei relativ hohen Temperaturen. Während Si-Elektronik ihr Temperaturlimit bei ca. 150°C hat, wird derzeit für SiC-basierte Elektronik ein praktischer Grenzwert von ca. 600 °C, ein theoretischer von ca. 1000 °C angegeben. Darüber hinaus ist SiC sehr strahlungsresistent und hat eine hohe Durchschlagsspannung. Damit eignet es sich z. B. als Werkstoff für Leistungselektronik oder für elektronische Bauteile zur Überwachung und Regelung von Verbrennungsprozessen in Motoren und Energieerzeugern ebenso wie für neuartige ungekühlte Strahlungssensoren in Weltraumsonden. Die derzeit interessantesten elektronischen Anwendungen sind Bipolartransistoren, Sperrsicht-Feldeffekttransistoren (SFETs), Schottky-Dioden und Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren (MOSFETs).

Bipolartransistoren werden zum Schalten und Verstärken von Signalen eingesetzt. SiC erweitert sowohl den Temperatur- als auch den Spannungsbereich erheblich, in dem diese Transistoren arbeiten können. SFETs aus SiC ermöglichen z. B. hochwertige Photodetektoren und piezoelektrische Sensoren, die in rauer Umgebung eingesetzt werden können. Wesentlicher Vorteil ist jedoch ihre Anwendbarkeit bei sehr hohen Spannungen. Schottky-Dioden werden in Hochfrequenzanwendungen bis weit in den Mikrowellenbereich hinein verwendet. Im Vergleich zu reinem Silizium hat SiC hier den Vorteil geringerer Leckströme und höherer Spannungsverträglichkeit auch bei hohen Anwendungstemperaturen. MOSFETs auf der Basis von SiC sind für die Hochleistungselektronik an sich vielversprechend, haben aber u. a. aufgrund zu geringer Zuverlässigkeit der als Isolator dienenden Oxidschicht und der nicht ausreichenden Stabilität der Durchschlagsspannung noch Forschungsbedarf. Allerdings basiert der derzeit effektivste Photovoltaik-Wechselrichter auf SiC-MOSFETs.

In der Sensorik ermöglicht SiC eine Aufweitung des Anwendungsspektrums siliziumbasierter MEMS, aber auch neue Gas- und Strahlungssensoren mit neuartiger Elektronik. Im Bereich der MEMS wird SiC insbesondere für so genannte RF-MEMS sowie Druck-, Beschleunigungs- und Magnetsensoren für harsche Umweltbedingungen als idealer Werkstoff gesehen. RF-MEMS arbeiten mit Frequenzen im Megahertzbereich. SiC bietet die hierfür benötigte mechanische Festigkeit und Elastizität und ermöglicht damit den Bau von Mikroschaltern,

stimmbaren Kondensatoren, Antennen oder Resonatoren, die zugleich sehr störresistent sind. Die gleichen Eigenschaften machen MEMS-Drucksensoren aus SiC geeignet für Anwendungen in der Prospektion von Bodenschätzten oder im Tunnelbau sowie als Beschleunigungs- und Magnetsensoren in unterschiedlichsten Anwendungen.

Die Gassensorik auf SiC-Basis funktioniert meist über einen kapazitiven Widerstand mit einem katalytischen Metallkontakt, an dem die Gasmoleküle dissoziieren und eine geladene Schicht erzeugen, die wiederum das Messsignal verändert. Im Unterschied zu herkömmlichen keramischen Gassensoren, wie z. B. aus Zirkondioxid, arbeitet dieser Typ fast verzögerungsfrei und misst sowohl im kalten Zustand (Anlass- und Warmlaufphase eines Motors) wie auch bei üblichen Betriebstemperaturen von Verbrennungsmotoren exakt.

Ein weiteres interessantes Anwendungsgebiet für SiC ist die Strahlungssensorik im UV- und Röntgenbereich. Im UV-Bereich werden Messungen mit SiC nicht bzw. nur unwesentlich von sichtbarem Licht gestört, da eine Auslösung des Signals hier erst unterhalb von ca. 370 nm erfolgt. Röntgenstrahlung kann mit SiC-Sensoren im Gegensatz zu herkömmlichen Silizium- oder Germaniumdetektoren ohne Kühlung des Sensors detektiert werden, was sowohl medizinische als auch weitere Anwendungen vereinfacht.

Die weitere Verbreitung von SiC in der Elektronik wird wesentlich davon abhängen, wie wirtschaftlich es in geeigneter Form herstellbar ist. Während Silizium-Wafer aus der Schmelze bei relativ niedrigen Temperaturen hergestellt werden können, basiert die Fertigung von SiC-Wafern auf sehr aufwändigen Verfahren der Einkristallzüchtung. Als Halbleitermaterial wird SiC also auch langfristig eher als Ergänzung zum Silizium für spezielle Anwendungen eingesetzt werden.

Stefan Reschke, März 2011

Homomorphe Verschlüsselung

Homomorphe (strukturerhaltende) Verschlüsselungsverfahren erlauben eine Verarbeitung verschlüsselter Daten ohne vorherige Entschlüsselung. Als aussichtsreiches zukünftiges Anwendungsfeld für homomorphe Verschlüsselungsverfahren wird das zukunftsträchtige Gebiet des Cloud Computings angesehen.

Seit dem Altertum werden zum Schutz der Vertraulichkeit von Informationen Verschlüsselungs- bzw. Kryptographieverfahren eingesetzt. Dabei werden die Informationen, oftmals ein klar lesbarer Text, unter Zuhilfenahme eines so genannten Schlüssels in eine „unleserliche“ Zeichenfolge (Chiffre) transformiert. Die originären Informationen können nur diejenigen Nutzer wieder rekonstruieren, die auch im Besitz des Schlüssels sind. Auf diese Weise können sensible Informationen vor der Kenntnisnahme durch Unbefugte geschützt werden, was gerade im militärischen Bereich schon immer von essentieller Bedeutung gewesen ist. Inzwischen basieren aber auch zivilgesellschaftliche Prozesse in sehr starkem Ausmaß auf einem vertrauenswürdigen und sicheren Austausch von Informationen. Ein großes ziviles Anwendungsgebiet ist z.B. der Schutz von im Internet übertragenen sensiblen personenbezogenen Daten, wie z.B. Passwörtern oder Kreditkartennummern beim Online-Banking oder E-Commerce.

Ein Problem bei den derzeit aktuellen kryptographischen Verfahren ist, dass die verschlüsselten Informationen nicht weiterverarbeitet werden können. Sollen beispielsweise verschlüsselt vorliegende Zahlen addiert oder die verschlüsselten Einträge einer Datenbank einer Abfrage unterworfen werden, so müssen die Daten zunächst entschlüsselt werden, da nur die Klardaten diesen Fragestellungen zugänglich sind. Das Ergebnis der vorgenommenen Operation kann dann wieder verschlüsselt und in einem Speicher abgelegt werden. Die Offenlegung der Originaldaten kann jedoch zu einem Verlust der Vertraulichkeit führen, insbesondere wenn die Daten auf einem externen Server ausgelagert sind. Momentan besteht keinerlei Möglichkeit, auf den verschlüsselten Daten zu operieren. Diese Schwäche beseitigen die so genannten homomorphen (strukturerhaltenden) Verschlüsselungsverfahren.

Diese erlauben generell eine Verarbeitung verschlüsselter Daten ohne vorherige Entschlüsselung. Im Falle der einfachen Addition von Zahlen beispielsweise kann diese anhand der verschlüsselt vorliegenden Zahlen erfolgen. Das am Ende, wiederum verschlüsselt, vorliegende Ergebnis ist exakt dasselbe, als wenn die einzelnen Zahlen zuerst entschlüsselt, dann addiert und das Ergebnis letztlich wiederum verschlüsselt worden wären. Auf diese Weise ist die Vertraulichkeit der betreffenden Daten jederzeit sichergestellt. Ebenso ermöglichen homomorphe Verschlüsselungsverfahren die Durchführung von verschlüsselt vorliegenden Suchanfragen, z. B. im Internet, an verschlüsselt vorliegende Daten. Der Nutzer erhält dann seine Anfrageergebnisse in verschlüsselter Form und kann sie lokal in lesbare, d. h. für ihn verwertbare, Daten transformieren. Auf diese Weise werden Suchanfrage, die Daten des Suchraums sowie insbesondere die Ergebnisse der Anfrage vor der Kenntnisnahme durch den Suchmaschinenprovider und aller an der Anfrage beteiligten Stellen geschützt.

Die Idee der homomorphen Verschlüsselung wurde bereits vor rund 30 Jahren vorgestellt und fand große Aufmerksamkeit. Bis 2008 existierten jedoch nur so genannte teilhomomorphe Verschlüsselungsverfahren. Diese erlauben nur eine Rechenoperation (Addition oder Multiplikation). Das in der Praxis vielfältig eingesetzte Verschlüsselungsverfahren RSA (Rivest, Shamir, Adleman) ist beispielsweise teilhomomorph bezüglich der Multiplikation. Sämtliche Vorteile homomorpher Verschlüsselungsverfahren lassen sich jedoch nur mit so genannten vollhomomorphen Verfahren erzielen, die nahezu beliebige komplexe Operationen auf verschlüsselten Daten zulassen. Die generelle Existenz vollhomomorpher Verfahren wurde lange Zeit bezweifelt.

Im Jahr 2008 wurde jedoch ein neuer Ansatz zur Konstruktion vollhomomorpher Systeme vorgestellt, der den Glauben an die generelle Realisierbarkeit solcher Verfahren neu belebte. Dieser Vorschlag zur Verschlüsselung macht sich im Kern die Schwierigkeit zu Nutze, in bestimmten mathematischen Strukturen (so genannten Gittern) spezielle Problemstellungen effizient berechnen zu können. Generell wird Verschlüsselungsverfahren, die auf Problemen der Gittertheorie basieren, ein großes Zukunftspotenzial beigemessen, da sie sich nach derzeitigem Stand als sehr resistent gegen Angriffe mit eventuell zukünftig zu erwartenden Quantencomputern erweisen. Letztere können ihre inhärente massive Parallelität nutzen, um viele derzeit eingesetzte Verschlüsselungsverfahren, die auf zahlentheoretischen Problemen (z.B. der Primfaktorisierung) basieren, zu brechen. Das zuerst vorgeschlagene, auf Gittern aufbauende vollhomomorphe Verschlüsselungsverfahren ist jedoch für die meisten praxisrelevanten Fälle ungeeignet, weil sowohl die Länge des Chiffres als auch die Berech-

nungszeit mit zunehmendem Sicherheitsniveau drastisch ansteigen. Daher wurde die geschilderte Grundidee zur Konstruktion vollhomomorpher Verschlüsselungsverfahren in den letzten beiden Jahren sukzessive verbessert. Bis zur Praxistauglichkeit sind jedoch noch vielfältige Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen vonnöten.

Als aussichtsreiches zukünftiges Anwendungsfeld für homomorphe Verschlüsselungsverfahren wird das zukunftsträchtige Gebiet des Cloud Computings angesehen. Bei diesem Konzept werden IT-Ressourcen, wie z. B. Speicher- und Rechenkapazität, nicht mehr auf der lokalen Festplatte, sondern in einem Netzwerk, z. B. dem Internet, zur Verfügung gestellt. Der einzelne Nutzer nimmt diese Ressourcen dann über das Netzwerk in Anspruch. Um die Vertraulichkeit der ausgelagerten Daten und Anwendungen sicherzustellen, bieten sich homomorphe Verschlüsselungsverfahren an. Auf diese Weise kann ein Nutzer, wie z. B. eine Firma, rechenintensive Programme mit großen sensiblen Datensätzen verschlüsselt auf einer Vielzahl von Computern in der Cloud laufen lassen, ohne dass die Betreiber der jeweiligen Computer Kenntnis sowohl von den Anwendungen als auch den Daten nehmen können. Wegen des zu erwartenden großen Bedarfs an der Auslagerung von Daten und Programmen könnten in der nahen Zukunft bereits eingeschränkt leistungsfähige homomorphe Verschlüsselungen in solchen Szenarien zum Einsatz kommen.

Thomas Euting, April 2011

Quantencomputer

Quantencomputer sollen aufgrund ihrer potenziell sehr hohen Rechenleistung Anwendungen erlauben, die klassischen Computern nur sehr eingeschränkt zugänglich sind. Sie befinden sich noch in einem frühen Forschungsstadium.

Die technische Nutzbarmachung quantenphysikalischer Effekte ist in den letzten Jahren zunehmend in den Fokus wissenschaftlicher Forschung gerückt. So konnten bereits erste Erfolge auf dem Gebiet der abhörsicheren Übertragung von Informationen erzielt werden (Quantenkryptographie). Fortschritte gibt es auch bei den schon seit längerer Zeit erforschten Quantencomputern. Diese sollen aufgrund ihrer potenziell sehr hohen Rechenleistung Anwendungen erlauben, die klassischen Computern nur sehr eingeschränkt zugänglich sind.

Im Vergleich zur klassischen Physik müssen sich in der Quantenphysik Systeme nicht in einem scharf definierten Zustand befinden, sondern können in Form einer Überlagerung, einer so genannten Superposition, von mehreren unterschiedlichen Zuständen gleichzeitig existieren. Dieser Umstand wird bei Quantencomputern dadurch ausgenutzt, dass hier Quantenbits (Qubits) anstatt klassischer Bits zum Einsatz gelangen. Während ein klassisches Bit zu jedem Zeitpunkt entweder den Wert Null oder Eins aufweist, kann ein Quantenbit in einer Superposition existieren, die beide Zustände gleichzeitig enthält. Quantencomputer können diese verschiedenen Zustände einer Superposition parallel verarbeiten. Diese Form der parallelen Informationsverarbeitung kann dabei erheblich leistungsfähiger sein als bei einem klassischen Parallelrechner, da die Anzahl der möglichen Zustände mit der Anzahl der Qubits sehr schnell zunimmt.

Die physikalische Realisierung der Qubits kann z.B. durch Ionen gelingen, die mit Hilfe von elektromagnetischen Feldern in so genannten Ionenfallen festgehalten werden. Qubits können auch auf der aus der Medizin bekannten Kernspinresonanz beruhen. Andere Ansätze verwenden z.B. supraleitende oder Photonen-basierte Qubits. Eine aussichtsreiche

Herangehensweise besteht darüber hinaus in der Verwirklichung von Quantencomputern, bei denen die einzelnen Qubits in einen Festkörper integriert sind. Dieser Ansatz könnte von den jahrzehntelangen Erfahrungen bei der Fabrikation von Halbleiterchips profitieren. Vielversprechende Ergebnisse konnten hierbei in letzter Zeit z.B. bei Systemen auf der Basis von Silizium oder Diamant gewonnen werden.

Eine erhebliche Herausforderung bei der Verwirklichung von Quantencomputern besteht darin, dass die jeweiligen Superpositionen von Quantenzuständen durch Wechselwirkungen mit der Umgebung zerstört werden können. Dieses Phänomen der so genannten Dekohärenz ist auch die Ursache dafür, dass man im Alltag keine Superpositionen von makroskopischen Objekten beobachten kann, da diese nahezu andauernd mit ihrer Umgebung interagieren. Bei der Konstruktion von Quantencomputern konzentriert man sich daher üblicherweise darauf, diese ungewollten Wechselwirkungen der Qubits mit der Umgebung zu minimieren. Wenn der Grad der Dekohärenz hinreichend gering ist, dann lassen sich die dadurch verursachten Fehler wieder korrigieren. Im Prinzip basieren die hier zugrunde liegenden Verfahren auf einer redundanten Ausrüstung der Systeme mit mehr Qubits als für die logischen Funktionalitäten eigentlich nötig.

Mittlerweile sind einige Einsatzgebiete von Quantencomputern bekannt, bei denen deren Überlegenheit gegenüber klassischen Computern zum mindest theoretisch nachgewiesen werden konnte. Eine Anwendung dieser Art existiert z.B. in Gestalt eines von Peter Shor entdeckten Quantenalgorithmus zur Zerlegung einer großen Zahl in ihre Primfaktoren. Dieser Algorithmus stellt eine potenzielle Bedrohung für einige derzeit im Internet genutzte, so genannte asymmetrische Verschlüsselungsverfahren dar. Deren Sicherheit beruht gerade auf der Annahme, dass eine derartige Aufgabenstellung durch einen Computer praktisch nicht durchgeführt werden kann. Allerdings existieren mittlerweile Vorschläge für neue asymmetrische Verschlüsselungsverfahren, bei denen man davon ausgeht, dass sie auch vor einem Angriff durch Quantencomputer sicher sind. Des Weiteren hat Lov Grover einen vielseitig verwendbaren Quantenalgorithmus für die Suche nach einem bestimmten Eintrag in einer unsortierten Datenbank entwickelt. Eine attraktive Anwendung dieses Algorithmus könnte sich dabei unter anderem im Bereich der künstlichen Intelligenz finden, da sich hier einige Probleme auf eine derartige Aufgabenstellung reduzieren lassen. Quantencomputer sind außerdem in idealer Weise dazu geeignet, quantenphysikalische Systeme effizient zu simulieren. Solche Quantensimulationen sind in einer Reihe von wichtigen Einsatzgebieten von großer Relevanz, z.B. in den Materialwissenschaften, der Nanotechnologie oder der

Arzneimittelforschung. Eine interessante neue Entwicklung stellt ein Quantenalgorithmus dar, der potenziell nützliche Informationen über die Lösung eines linearen Gleichungssystems extrahieren kann. Die Lösung solcher linearen Gleichungssysteme bildet generell eine wichtige Grundlage für viele Problemstellungen in Wissenschaft und Forschung.

Allgemein sind bisher erst relativ wenige Quantenalgorithmen bekannt, die leistungsfähiger sind als ihre klassischen Gegenstücke. Dies könnte einen Hinweis dafür liefern, dass Quantencomputer klassische Computer in der Zukunft nicht generell ersetzen werden, sondern stattdessen eher für spezielle Aufgabenstellungen eingesetzt werden. Derzeit geht man davon aus, dass die Simulation von quantenphysikalischen Systemen dabei eine der wichtigsten Anwendungen sein wird.

Zu diesem Zeitpunkt ist noch nicht ersichtlich, welche Art der Implementierung von Quantencomputern letztendlich zum gewünschten Erfolg führen wird. Quantencomputer befinden sich dementsprechend zurzeit noch in einem frühen Forschungsstadium. Die Firma D-Wave Systems behauptet zwar, einen Rechner mit bis zu 128 Qubits konstruiert zu haben. Allerdings bezweifeln viele Experten, dass es sich hierbei tatsächlich um einen echten Quantencomputer handelt. Die am weitesten fortgeschrittenen experimentellen Systeme verfügen derzeit nur über bis zu ca. zehn Qubits. Um Probleme lösen zu können, die für heutige Computer nicht lösbar sind, müsste ein Quantencomputer aber wohl über Hunderte bis Tausende von Qubits verfügen. Die Konstruktion eines Quantencomputers mit derartig vielen Qubits stellt jedoch eine sehr große technologische Herausforderung dar, weshalb mit einem solchen System voraussichtlich frühestens in einem Jahrzehnt zu rechnen sein wird.

Dr. Klaus Ruhlig, Mai 2011

Eisenbasierte Hochtemperatursupraleiter

Die wesentliche Rolle eisenbasierter Hochtemperatursupraleiter wird heute darin gesehen, die grundlegenden Fragen der Funktionsweise von Hochtemperatursupraleitern lösen zu helfen.

Unter Supraleitung versteht man das physikalische Phänomen, dass bestimmte Materialien unterhalb einer für sie typischen Temperatur (so genannte Sprungtemperatur) ihren elektrischen Widerstand vollständig verlieren und ideale Leiter werden. Ab Ende der 1980er Jahre kam es zu einem regelrechten Hype um die damals entdeckten Hochtemperatursupraleiter (HTSL) auf Kupferoxidbasis. Die anfängliche Euphorie mit der Aussicht auf Materialien mit immer höheren Sprungtemperaturen ist inzwischen einer gewissen Ernüchterung gewichen. Probleme gibt es insbesondere mit der Fertigung in Form langer Drähte, und auch die erforderlichen Temperaturen liegen immer noch weit unterhalb der Raumtemperatur. Die größte Herausforderung für eine gezielte Weiterentwicklung liegt in der immer noch fehlenden geschlossenen Theorie und Modellbildung. Gerade hier erhofft man sich Abhilfe durch eine vor kurzem entdeckte neue Klasse von Supraleitern auf Eisenbasis, die ein Schlüssel zum Verständnis der Hochtemperatursupraleitung werden könnte.

Die bereits seit 1911 bekannten „konventionellen“ metallischen Supraleiter besitzen so niedrige Sprungtemperaturen, dass eine aufwändige Kühlung mit flüssigem Helium (Siedetemperatur 4,2 K; 0 K = -273,15 °C) erforderlich ist. Sie sind im Moment immer noch die einzigen großtechnisch eingesetzten Supraleiter und werden etwa in Kernspintomographen zur Erzeugung hoher Magnetfelder genutzt. Das am häufigsten verwendete Material sind immer noch Niob oder bestimmte Niob-Legierungen, welche aufgrund ihrer ausgezeichneten Verformbarkeit die problemlose Herstellung von Drähten auch in einer für den Magnetbau erforderlichen Länge von mehreren Kilometern erlauben.

Die wichtigsten Vertreter der keramischen Hochtemperatursupraleiter basieren bis heute auf so genannten Cupraten (Kupferoxiden). Nachdem man zunächst Sprungtemperaturen über 30 K realisiert hatte, fand man innerhalb kurzer Zeit zahlreiche Stoffe, die bereits oberhalb der Siedetemperatur des flüssigen Stickstoffs (77 K) supraleitend werden. Diese zunächst rasante Entwicklung stagniert jedoch schon seit Jahren. Der derzeit höchste Wert für die Sprungtemperatur liegt bei ungefähr 138 K. Ein weiteres wesentliches Problem für die Anwendung der HTSL ist 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.

Neuen Schwung hat die Erforschung der Hochtemperatursupraleitung inzwischen durch die Entdeckung einer neuen Klasse von eisenhaltigen Supraleitern bekommen, den so genannten Eisen-Pniktiden. Diese neuen Verbindungen basieren wie die Cuprate auf Kristallstrukturen aus sich abwechselnden Schichten. Im Fall des ersten entdeckten supraleitenden Eisen-Pniktids bestanden diese Schichten alternierend aus Lanthanoxid und aus Eisenarsenid, wobei ein geringer Teil der Sauerstoffatome durch Fluor substituiert war („Dotierung“). Es hatte eine Sprungtemperatur von 26 K. Der aktuelle Rekord liegt bei ca. 56 K. Alle in diesem Zusammenhang bisher untersuchten Substanzen basieren auf Eisenarsenid.

Trotz der immer noch niedrigen erreichten Sprungtemperaturen könnten eisenhaltige Supraleiter langfristig auch für den technischen Einsatz interessant werden, da sie neuesten Forschungsergebnissen zufolge je nach Konfiguration relativ hohe Stromstärken und Magnetfeldstärken aushalten. Damit wären sie z. B. für den Einsatz in supraleitenden Magneten prädestiniert.

Ihre wichtigste Bedeutung wird bisher allerdings darin gesehen, dass sich an ihnen grundlegende Effekte und Mechanismen der Hochtemperatursupraleitung besser untersuchen lassen als an den Cupraten. So reagieren Eisen-Pniktide im Vergleich zu den Cupraten sehr robust auf chemische Veränderungen. Diese Tatsache ermöglicht es, die Auswirkungen verschiedener chemischer Parameter auf die Supraleitung zu untersuchen.

Des Weiteren ist es inzwischen gelungen, den supraleitenden Zustand der Pniktide statt durch Dotierung auch durch Ausübung hoher Drücke zu erreichen. Bei beiden Prozessen

wird das Kristallgitter verzerrt und die Position der Atome zueinander verändert. Optimale Ergebnisse für die Supraleitungsfähigkeit haben sich ergeben, wenn die Eisen- und Arsenatome regelmäßige Tetraeder bilden. Daraus kann man schließen, dass die Geometrie der Atomanordnung eine entscheidende Rolle beim Entstehen der Supraleitung spielt. Demnach könnte die Supraleitung auch beim Dotieren nicht wie bisher angenommen nur durch die zusätzlichen Ladungsträger begünstigt werden, sondern auch auf Grund der Verzerrung des Kristallgitters durch die eingebrachten Fremdatome. Mit großer Wahrscheinlichkeit sind derartige Ergebnisse auch auf die Cuprate übertragbar.

Für viele Anwendungen bleiben konventionelle metallische Supraleiter auf absehbare Zeit die einzige realistische Option, zumal der durch die einfachere Kühlung zu erzielende Einsparungeffekt der HTSL oft einen überraschend geringen Anteil an den Gesamtkosten einer Anlage ausmacht. Das gilt z.B. für die Erzeugung starker Magnetfelder in Kernspin-tomographen oder Teilchenbeschleunigern. Das wichtigste Anwendungsfeld für Cuprate ist heute die hochgenaue Messung von Magnetfeldern z.B. im menschlichen Gehirn oder in der zerstörungsfreien Materialprüfung. Hier werden sie für so genannte SQUIDs verwendet, welche die Magnetfeldabhängigkeit des bei Supraleitern auftretenden quantenmechanischen Josephson-Effektes nutzen.

Die eisenhaltigen Hochtemperatursupraleiter sind ebenso wie die Cuprate Keramiken mit allen damit zu erwartenden Schwierigkeiten z.B. bei der Fertigung ausreichend langer Drähte. Außerdem sind sie gegenüber den Cupraten in ihrer Entwicklung noch einige Jahre im Rückstand. Ihre wesentliche Rolle wird heute darin gesehen, die grundlegenden Fragen der Funktionsweise von Hochtemperatursupraleitern lösen zu helfen. Sie könnten damit dazu beitragen, dass HTSL langfristig auch in spektakulären Anwendungen wie dem verlustfreien Stromtransport über weite Strecken oder in Magnetschwebebahnen zuverlässig und wirtschaftlich einsetzbar werden.

Jürgen Kohlhoff, Juni 2011

Agentenbasierte Modelle

Agentenbasierte Modelle stellen einen vielversprechenden Ansatz für die Modellierung komplexer Systeme und der sie bestimmenden Prozesse dar. Sie könnten sich zu einem wertvollen Instrument für die Lösung ökonomischer oder sicherheitspolitischer Probleme entwickeln.

Hätte man die jüngste Finanzkrise verhindern können, wenn man die Funktionsweise der Finanzmärkte besser verstanden hätte? Auch wenn sich diese Frage im Nachhinein nicht mehr beantworten lässt, so verdeutlicht sie doch, dass die Analyse komplexer Systeme, wie sie Finanzmärkte darstellen, nicht nur von rein akademischem Interesse ist. Agentenbasierte Modelle stellen einen vielversprechenden Ansatz für die Modellierung solcher komplexen Systeme und der sie bestimmenden Prozesse dar. Dabei handelt es sich um eine computergestützte Simulationstechnik, die sich auf vielfältige Fragestellungen und Szenarien anwenden lässt. Erste Vorläufer dieser Methode lassen sich bereits Mitte des letzten Jahrhunderts nachweisen. Allerdings ermöglichte erst die signifikante Verbesserung der Computertechnik, dass Agentenbasierte Modelle mittlerweile weit verbreitet sind und einen neuen Wissenschaftszweig maßgeblich befruchtet haben, der als computergestützte Soziologie bezeichnet wird.

Wie schon der Name vermuten lässt, ist der (Software-)Agent das Schlüsselkonzept dieser Methode. Darunter versteht man die Idee einer autonom (d. h. ohne Eingriffe von außen) handelnden Einheit, die als Bestandteil eines Computerprogramms realisiert wird. Ein solcher Agent kann beispielsweise Personen, Firmen oder ähnliche soziale Gruppierungen darstellen. Ähnlich wie in der Realität besteht er im Wesentlichen aus zwei Komponenten, nämlich seinen Eigenschaften (oft auch als Zustand bezeichnet) und seinem Verhalten, welches durch Regeln bestimmt wird. Außerdem ist er noch in eine entsprechende Umgebung eingebettet, die wiederum seinen Zustand und sein Verhalten beeinflussen kann. Diese Umwelt der Agenten kann je nach Problemstellung sehr konkret oder eher immaterieller Natur sein. Wenn man beispielsweise die Evakuierung eines Gebäudes simuliert, umfasst die

Umgebung ganz konkret die Position von Wänden und Türen. Im Rahmen einer Simulation, die sich mit einem politischen oder sozialen System befasst, wird die Umgebung eher durch immaterielle Begriffe wie Rechtmäßigkeit oder Zufriedenheit charakterisiert.

Das Problem besteht nun darin, die wesentlichen Eigenschaften und Verhaltensweisen, die man in einem realen System beobachtet, in geeigneter Weise auf das Computermodell abzubilden. Simuliert man beispielsweise mittels eines Agentenbasierten Modells Finanzmärkte, so wird man die Eigenschaft „Gesundheit“ unberücksichtigt lassen können. Ist man hingegen an der Ausbreitung ansteckender Krankheiten interessiert, ist genau dies die Eigenschaft von Interesse. Ferner ist es durchaus möglich, unterschiedliche Arten von Agenten in einem Modell zu nutzen. Untersucht man beispielsweise die Entstehung ethnischer Unruhen, so ordnet man die Agenten den unterschiedlichen Ethnien zu oder man unterscheidet zwischen Aufständischen und Polizeikräften.

Ferner wird mittels eines Satzes von Regeln bestimmt, wie die Agenten untereinander interagieren, aber auch, wie sie auf ihre Umgebung und deren Veränderung reagieren. Diese Regeln werden lediglich auf lokaler Ebene der Agenten formuliert und nicht auf der globalen Ebene des Gesamtsystems. Hierin liegt die besondere Stärke Agentenbasierter Modelle begründet, da hiermit ein Bottom-up-Ansatz verfolgt wird. Dadurch wird es möglich, dass sich im simulierten System globale Ordnungsmuster ausbilden, die nicht explizit auf der lokalen Ebene der Agenten und der sie bestimmenden Regeln festgelegt wurden. Solche sogenannten emergenten Phänomene sind ein Charakteristikum komplexer Systeme.

Allerdings erweist sich die Aufgabe, „passende“ Regeln zu finden und zu formulieren, als eines der Kernprobleme Agentenbasierter Modelle. Die Gefahr besteht vor allem darin, eine zu große Anzahl an Regeln für ein Modell aufzustellen. Dieses verfügt dann bildlich gesprochen über sehr viele Stellschrauben, an denen der Nutzer drehen könnte. Meistens existiert auch keine Möglichkeit, notwendige Parameter anhand empirischer Daten abzuschätzen. Es ist in einem solchen Fall mitunter schwierig abzuschätzen, wovon die beobachtete Übereinstimmung zwischen Modell und Realität abhängt und ob sie womöglich auch mit völlig anderen Einstellungen zu erzielen wäre. In der Praxis hat es sich bewährt, zunächst einfache Modelle zu entwickeln, die bestimmte Phänomene zumindest qualitativ reproduzieren können. Bereits relativ einfache Modelle dieser Art sind beispielsweise in der Lage, bestimmte Schlüsselaspekte, die bei ethnischen Unruhen beobachtet werden,

zu reproduzieren. So ist es durchaus möglich, den positiven und friedensstiftenden Effekt des Einsatzes von Blauhelmsoldaten zu modellieren. Allerdings gehen solche Ergebnisse derzeit noch nicht über einen Machbarkeitsnachweis hinaus. Um realistisch abschätzen zu können, wie groß solche Eingreiftruppen sein müssten und wann und wo sie einzusetzen wären, fehlt es den Modellen noch an Detailtreue.

Recht fortgeschritten ist die Entwicklung Agentenbasierter Modelle im Bereich der Simulation von Finanzmärkten, wo sie ihre Stärke, dynamische, sich möglicherweise selbst verstärkende Prozesse zu simulieren, voll ausspielen können. Börsenchrashs sind mit diesen Modellen wesentlich besser zu verstehen und möglicherweise auch vorherzusagen als mit klassischen Methoden. Noch werden sie allerdings nicht systematisch im Sinne eines Frühwarnsystems eingesetzt.

Insgesamt betrachtet stellen Agentenbasierte Modelle eine vielversprechende Möglichkeit dar, die es erlaubt, komplexe Systeme zu simulieren und dadurch besser zu verstehen. Dabei liegt ein wichtiger Anwendungsschwerpunkt derzeit auf der Simulation sozialer Systeme und der sich in ihnen abspielenden Prozesse. Diese Modelle liefern zum einen wichtige Einblicke in die grundlegenden Prozesse dieser Systeme. Sie erlauben es zunehmend aber auch, Vorhersagen zu treffen und verschiedene Szenarien durchzuspielen. Sie könnten sich damit zu einem wertvollen Instrument für die Lösung ökonomischer oder sicherheitspolitischer Probleme entwickeln. Die Nachbildung der gesamten Welt im Computer zwecks ökonomischer oder politischer Entscheidungsfindung, wie sie in manchen Science-Fiction-Romanen postuliert wird, wird aber auch künftig nicht realisierbar sein.

Dr. Marcus John, Juli 2011

Climate Engineering

Der Einsatz von technischen Methoden zur Bekämpfung des bereits in die Atmosphäre freigesetzten Kohlendioxids und seiner Auswirkungen bleibt höchst umstritten, auch wenn einzelne Möglichkeiten bereits heute vorhanden sind.

Weltweit wird die zunehmende globale Erwärmung als Gefahr für die Menschheit eingeschätzt. Entsprechend vielfältig und aufwändig sind die Bemühungen zur Bekämpfung des als Hauptursache erkannten vom Menschen verursachten Treibhauseffektes. Eine wesentliche Rolle spielt hier die Verringerung der CO₂-Emissionen. Daneben werden in letzter Zeit erste Ansätze diskutiert, mit technischen Maßnahmen gezielt in das Klimasystem einzugreifen, um die globale Erwärmung zu regulieren. Beim sogenannten Climate Engineering (auch: Geo-Engineering) geht es um technische Methoden, die nicht die CO₂-Emissionen als eigentliche Ursache des Problems bekämpfen, sondern das bereits freigesetzte CO₂ in der Atmosphäre und seine Auswirkungen. Die damit verbundenen umfangreichen Eingriffe in das komplexe und noch nicht vollständig verstandene Klimasystem bergen jedoch auch unkalkulierbare Risiken. Daher bleibt der Einsatz von Maßnahmen zum Climate Engineering höchst umstritten, auch wenn technische Möglichkeiten bereits heute vorhanden sind.

Die Vielzahl der vorgeschlagenen Methoden zum Climate Engineering lässt sich in zwei Gruppen unterteilen, die auf grundlegend unterschiedlichen Strategien beruhen: der Reduktion der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre (Carbon Dioxide Removal, CDR) und der Beeinflussung der Sonneneinstrahlung auf die Erde (Solar Radiation Management, SRM).

Bei CDR-Methoden geht es darum, bereits in der Atmosphäre vorhandenes CO₂ langfristig zu binden und dadurch den Treibhauseffekt zu verringern. Bisher wurde noch keine Methode gefunden, die gleichzeitig effektiv, kostengünstig und sicher ist. Ein bereits in Feldversuchen erprobtes Verfahren beruht auf einer künstlichen Düngung der Meere mit

Eisensulfat. Die eingebrachten Nährstoffe regen die Bildung von mikroskopischen Algen an, die beim Wachsen CO₂ aus dem Oberflächenwasser aufnehmen, so dass sich zusätzliches CO₂ aus der Luft im Wasser lösen kann. Die Algen sinken in tiefere Wasserschichten, wo das von ihnen aufgenommene CO₂ über Jahrhunderte gebunden bleibt. Dieses Verfahren ist zwar vergleichsweise kostengünstig, aber nach einer neuen Studie des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung weit weniger effektiv, als bisher angenommen wurde. Zusätzlich könnten unerwünschte Nebeneffekte eintreten, wie ein Sauerstoffmangel im Wasser oder eine Emission anderer Treibhausgase, deren Ausmaß aufgrund der Komplexität des Ökosystems Meer kaum abzuschätzen ist.

Eine andere Möglichkeit, CO₂ aus der Atmosphäre zu binden, ist die massive Aufforstung von Wäldern. Diese Methode wird von den Vereinten Nationen als eine Schlüsselstrategie gegen die globale Erwärmung betrachtet. Kanadische Forscher haben jedoch kürzlich mit Computersimulationen berechnet, dass selbst eine vollständige Aufforstung aller Acker- und Brachflächen auf der Erde die Erwärmung nur um weniger als 0,5 °C bremsen könnte. Konflikte in der Landnutzung wären vorprogrammiert. Zudem speichern Wälder Sonneninstrahlung stärker als Ackerflächen, so dass es lokal sogar zu einer messbaren Erwärmung kommen würde.

Eine direkte Abscheidung von CO₂ aus der Luft auf chemisch-technischem Wege ist im Prinzip frei von direkten ökologischen Nebenwirkungen. Auch die technische Machbarkeit wurde bereits in Laborversuchen nachgewiesen. Allerdings ist das CO₂ in der Luft so stark verdünnt, dass die Abscheidung äußerst energie- und damit kostenaufwändig ist. Zurzeit würde es etwa 10-mal soviel kosten, eine Tonne CO₂ aus der Luft zu binden, als sie direkt z. B. in einem Kohlekraftwerk abzufangen. In beiden Fällen würde das abgeschiedene CO₂ verflüssigt werden, um es unterirdisch oder untermeerisch zu lagern. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf darüber, wie langfristig diese Art der Lagerung tatsächlich ist.

Bei SRM-Methoden geht es darum, die Rückstrahlung des auf die Erde fallenden Sonnenlichts zu erhöhen. Dadurch stellt sich ein kühleres, aber vermutlich auch niederschlagsärmeres Klima ein. Die CO₂-Konzentration der Atmosphäre wird dabei nicht reguliert. Zu keinem der bisher vorgeschlagenen Verfahren sind bisher Feldversuche durchgeführt worden. Bei den vorliegenden Studien handelt es sich um Computersimulationen, die auf komplexen Modellen des Klimas beruhen. Das bisher aussichtsreichste Verfahren besteht darin, in der Stratosphäre (etwa in 25 km Höhe) durch das Einbringen von Schwefeldioxid kleine Schwefelsäuretröpf-

chen zu erzeugen, die einen Teil des einfallenden Sonnenlichts zurück ins Weltall reflektieren. Die kühlende Wirkung dieser sogenannten stratosphärischen Aerosole ist durch Vulkanausbrüche in der Vergangenheit in globalem Maßstab belegt. So wurden 1992 beim Ausbruch des Pinatubo etwa 20 Millionen Tonnen Schwefeldioxid in die Atmosphäre ausgestoßen, die kurzfristig zu einem globalen Temperaturabfall von 0,5°C führten. Mit vergleichsweise geringem Kostenaufwand könnte mit Flugzeugen eine ähnliche Menge an Schwefeldioxid in die Stratosphäre gebracht und eine deutliche Abkühlung um mehrere Grad Celsius erreicht werden. Es besteht jedoch noch eine sehr große Unsicherheit darüber, in welchem Ausmaß es zu schädlichen Nebenwirkungen wie einem Abbau der Ozonschicht oder lokalen Wetterveränderungen kommen würde.

Ein anderer Vorschlag ist das Versprühen von Salzwassertröpfchen über den Meeren, um zusätzliche Wolken zu erzeugen, die Sonnenlicht ins All reflektieren. Neuere Studien haben gezeigt, dass der Effekt deutlich geringer ist als bisher angenommen. Weder mögliche Nebenwirkungen, noch die Physik der Wolkenbildung sind im Detail verstanden und müssen weiter erforscht werden.

Im Gegensatz zu CDR-Methoden entfalten SRM-Methoden ihre Wirkung deutlich schneller (innerhalb von ein bis zwei Jahren). Allerdings ist diese Wirkung auch viel kurzlebiger, da es nach einer Beendigung der Maßnahmen zu einem sprunghaften Anstieg der globalen Temperatur kommen würde. Insbesondere deswegen würde man bei einem Einsatz von Maßnahmen zum Climate Engineering die längerfristig wirkenden CDR-Methoden vorziehen und SRM-Methoden allenfalls als schnell wirkende Maßnahmen in globalen klimatischen Notständen einsetzen.

Dr. David Offenberg, August 2011

Drahtlose UV-Kommunikation

Die drahtlose UV-Kommunikation wird zukünftig auf Funk und IR basierende Systeme nicht ersetzen, kann aber eine interessante Ergänzung zu beiden darstellen.

Drahtlose Kommunikation ist heute im Wesentlichen funkbasierte Kommunikation, z.B. in Mobilfunknetzen. Ein Problem der Funkkommunikation ist, dass der prinzipiell zur Verfügung stehende Frequenzbereich insgesamt sehr stark belegt ist und weite Teile dieses Bereiches lizenziert sind. Neue Kommunikationssysteme können daher oftmals nur in einem sehr engen Frequenzband untergebracht werden, was eine Begrenzung der möglichen Übertragungsrate zur Folge hat. Im Gegensatz dazu bietet der optische Bereich, der sowohl das infrarote (IR) als auch das sichtbare Licht sowie den ultravioletten Bereich (UV) umfasst, große unlizenzierte Bereiche, die prinzipiell hohe Übertragungsraten ermöglichen. Seit längerer Zeit wird bereits der IR-Bereich für verschiedene kurzreichweite drahtlose Anwendungen genutzt. Jedoch ist hier, im Gegensatz zur Funkkommunikation, immer eine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger erforderlich. Auch beeinträchtigt die von anderen Quellen, insbesondere der Sonne, ausgehende IR-Strahlung derartige Systeme. Die drahtlose UV-Kommunikation, die im Prinzip Wellenlängen zwischen 10 nm und 400 nm nutzt, wird zukünftig auf Funk und IR basierende Systeme nicht ersetzen, kann aber eine interessante Ergänzung zu beiden darstellen.

Besonders geeignet für die drahtlose UV-Kommunikation ist der Wellenlängenbereich zwischen 200 nm und 280 nm, der so genannte Solar-Blind-Bereich. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass die in diesem Spektralbereich von der Sonne ausgehende Strahlung nahezu komplett in der oberen Atmosphäre absorbiert wird, weswegen auf der Erdoberfläche keinerlei störende Hintergrundstrahlung festgestellt werden kann. Neben einer Kommunikation in direkter Sichtlinie zwischen Sender und Empfänger ermöglicht die im Solar-Blind-Bereich stattfindende starke Streuung der Strahlung in der unteren Atmosphäre

auch eine Kommunikation ohne direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger (NLOS = Non-Line-of-Sight). Aufgrund des fehlenden Strahlungshintergrundes können bei NLOS-Verbindungen insbesondere Empfänger mit breiten Strahlungskeulen (WFOV = Wide Field of View) verwendet werden, um möglichst viel der gestreuten Strahlung aufzufangen. Auf diese Weise lassen sich sehr hohe so genannte Signal-/Rauschleistungsverhältnisse erzielen, was zu einer hohen Qualität der Übertragung führt oder die Möglichkeit zur Reduzierung der Sendeleistung bietet. Derartige WFOV-Empfänger sind in anderen Wellenlängenbereichen, wie z. B. im Infrarotbereich, meistens nicht nutzbar, da sie zuviel störenden Strahlungshintergrund aufnehmen, was die Übertragung letztlich verschlechtert.

Nach derzeitigem Stand sollen mithilfe der drahtlosen UV-Kommunikation in der Praxis maximale Übertragungsraten von mehreren MBit/s in direkter Sichtlinie und mehreren Hundert kBit/s bei NLOS-Verbindungen erzielt werden können. Dabei sollen sich Reichweiten von maximal mehreren Kilometern (direkte Sichtverbindung) bzw. mehreren Hundert Metern (NLOS-Verbindungen) überbrücken lassen, wobei der zentrale reichweitenbegrenzende Faktor die starke atmosphärische Dämpfung ist. Daher scheint die drahtlose UV-Kommunikation generell für die kurzreichweite Kommunikation mit moderaten Übertragungsraten geeignet.

Ein großes Anwendungsfeld dieser Technologie wird in der Kommunikation im urbanen Umfeld gesehen, da hier im Allgemeinen keine Sichtverbindung zwischen den einzelnen Teilnehmern besteht. Ein großer Vorteil der UV-Kommunikation gegenüber sowohl der funkbasierten als auch der IR-basierten Kommunikation ist dabei ihre wesentlich geringere Abhängigkeit von den Wetterbedingungen, die letztlich zu einer höheren Verfügbarkeit der Verbindung führen kann.

Ebenfalls kann die drahtlose UV-Kommunikation bei der Kommunikation zwischen den Netzknoten eines über einen bestimmten räumlichen Bereich dislozierten Sensorsnetzes angewendet werden. Die Verwendung von WFOV-Empfängern bietet dabei eine größere Freiheit bei der Separierung der einzelnen Netzknoten. Von großem Interesse sind in diesem Zusammenhang Unterwassersensornetze zur Überwachung von Öl- und Gasinstallationen. Die UV-Kommunikation bietet in diesem Fall eine interessante Alternative zur bei der Unterwasserkommunikation etablierten akustischen Kommunikation. Übertragungsraten von bis zu 1 MBit/s bei Distanzen bis hin zu 20 m werden in diesem Szenario für möglich gehalten.

Bei so genannten mobilen Ad-hoc-Netzen (MANETs), die ohne feste Infrastruktur auskommen und bei denen die einzelnen mobilen Teilnehmer adaptiv auch die Weiterleitung nicht für sie bestimmter Nachrichten übernehmen, war eine Kommunikation zwischen mobilen Terminals (Comm-on-the-Move) bisher ausschließlich mit funkbasierter Übertragung möglich. Die drahtlose UV-Kommunikation eröffnet nun die Möglichkeit einer derartigen Kommunikation auch für den optischen Spektralbereich.

Aus militärischer Sicht besonders interessant ist weiterhin die Tatsache, dass die drahtlose UV-Kommunikation aufgrund der recht starken atmosphärischen Dämpfung eine relativ geringe Reichweite besitzt, weswegen sie eine hohe Resistenz gegenüber Detektion und Störung durch den Gegner besitzt. Daher ist sie besonders für eine verdeckte Kommunikation im taktischen Bereich prädestiniert.

Obwohl seit den 1960er Jahren Studien und Experimente zur drahtlosen UV-Kommunikation durchgeführt werden, befindet sich diese immer noch weitgehend im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Haupthemmnis für praxistaugliche Systeme waren bisher die relativ unhandlichen Sender, die darüber hinaus auch einen hohen Leistungsverbrauch aufwiesen und nur eine begrenzte Bandbreite bereitstellen konnten. Die im Zuge des 2002 begonnenen und inzwischen beendeten amerikanischen SUVOS-Programms (Semiconductor UV Optical Sources) entwickelten leistungsfähigen lichtemittierenden Dioden im UV-Bereich (UV-LEDs) sowie Verbesserungen bei den Empfängern lassen eine breite Nutzung der UV-Kommunikation mittelfristig möglich erscheinen.

Thomas Euting, September 2011

Magnetische Kühlung

Bereits mittelfristig könnten die ersten magnetbasierten Kühlschränke auf den Markt kommen, die bei einer Kühlleistung von einigen hundert Watt nur noch halb so viel Strom verbrauchen wie die besten bisher kaufbaren Geräte.

Ein großer Teil der Energiekosten moderner Haushalte, aber auch industrieller Anwendungen, resultiert aus dem hohen Energieverbrauch konventioneller Kühlsysteme, die auf Basis der Kompression von Gasen arbeiten. Eine weitere Effizienzsteigerung ist in diesen Systemen nur noch schwierig zu bewerkstelligen, so dass alternative Kühlmöglichkeiten erforscht werden, die eine erhebliche Reduzierung der benötigten Energie erwarten lassen. Eine besonders vielversprechende Technologie in diesem Zusammenhang ist die der Magnetischen Kühlung, die bis heute vor allem für Forschungszwecke in der Tieftemperaturphysik eingesetzt wird.

Anstelle eines Gases kommen in Magnetkühlmaschinen sogenannte magnetokalorische Werkstoffe zum Einsatz. Deren Wirkung beruht auf grundlegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Sie erwärmen sich stark, sobald sie in ein Magnetfeld eingebracht werden, weil sich die einzelnen magnetischen Momente nach diesem äußeren Feld ausrichten und weil gleichzeitig die ungeordnete Bewegung der Atome zunimmt. Der umgekehrte Prozess findet statt, wenn das Material das Magnetfeld verlässt. Dann resultiert eine Abkühlung.

Magnetkühlsysteme weisen entscheidende Vorteile gegenüber konventionellen Methoden auf. Letztere verwenden häufig Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) als Kompressionsgase, die bei Freisetzung als Treibhausgase wirken können. In Magnetkühlmaschinen wird dagegen nur eine Flüssigkeit wie Wasser benötigt, um Wärme abzutransportieren. Durch den Wegfall der Kompressoren sind Magnetkühlsysteme zudem deutlich geräusch- und vibrationsärmer, aber auch platzsparender. Der größte Vorteil wären jedoch deutlich geringere Energiekosten.

Der bisher am meisten erprobte Aufbau einer solchen Magnetkühlmaschine besteht aus einem hohlen Zylinder aus magnetokalorischem Werkstoff, der zur Hälfte von einem Permanentmagneten umgeben ist. Der Zylinder rotiert um seine Längsachse, so dass sich stets die Hälfte des Materials im Magnetfeld befindet, die andere Hälfte außerhalb.

Sobald der magnetokalorische Werkstoff in das Magnetfeld eintritt, erwärmt er sich. Die entstehende Wärme wird von einer Flüssigkeit, z. B. Wasser, abgeführt. Dadurch bleibt die Temperatur des Werkstoffs letztlich konstant. Verlässt das Material das Magnetfeld anschließend wieder, kühlt es sich deshalb unter die Ausgangstemperatur ab. Nun kann der Werkstoff Wärme aufnehmen und damit eine Kühlwirkung ausüben, ehe der Kreislauf erneut beginnt. Die Wärmeabfuhr gelingt besonders gut durch poröse Werkstoffe, in deren Poren das Wasser direkt eindringen kann. Dies ermöglicht eine große Grenzfläche zwischen Werkstoff und Flüssigkeit und damit einen schnelleren Wärmeaustausch.

Eine Anforderung an potenzielle Werkstoffe besteht in möglichst geringen magnetischen Hystereseverlusten. Diese entstehen, wenn das Material nach Entfernen des magnetischen Feldes nicht vollständig entmagnetisiert wurde und damit nur noch ein geringerer Teil zur erneuten Magnetisierung bereitsteht. Geeignete Werkstoffe gibt es schon lange, doch waren die mit Hilfe der Magnetkühlung erzeugten Temperaturdifferenzen noch zu klein für Anwendungen außerhalb der Forschung. In konventionellen Kühlgeräten bewegen sich die darstellbaren Temperaturdifferenzen üblicherweise in einem Bereich von 40 K, während durch Magnetkühlung bisher nur maximale Temperaturunterschiede von rund 20 K realisiert werden konnten. Auch die Kühlleistung der Prototypen war zu gering. Zudem konnten größere Temperaturänderungen nur bei großen Magnetfeldstärken von fünf Tesla oder mehr erzielt werden, wofür Supraleitermagneten notwendig waren. Diese benötigen jedoch selbst eine Kühlung und verbrauchen sehr viel Platz, was den Einsatz der Magnetkühlung stark einschränkte.

Erst in den 1990er Jahren wurden magnetokalorische Werkstoffe entwickelt, die auch bei magnetischen Feldstärken von rund 2 Tesla größere Temperaturänderungen durchlaufen. Dies ermöglicht den Einsatz von deutlich günstigeren und platzsparenden Permanentmagneten anstelle der Supraleitermagneten. Zunächst wurden hauptsächlich Gadoliniumlegierungen wie Gd₅Ge₂Si₂ verwendet. Diese wiesen zwar anfänglich zu niedrige Betriebstemperaturen auf, doch wurden in den letzten Jahren auch vielsprechende Verbindungen entdeckt, die große Temperaturänderungen bei Raumtemperatur ermöglichen.

lichen. Zudem konnten durch gezieltes Dotieren mit z. B. Eisen die Hystereseverluste weiter minimiert werden.

Weitere mögliche metallische Werkstoffe sind Legierungen auf der Basis von Mangan, Eisen, Phosphor und Germanium. Diese durchlaufen beim Eintreten in ein Magnetfeld bei Raumtemperatur zusätzlich zum Ordnungsprozess der magnetischen Momente auch eine Änderung der Kristallstruktur, wodurch der magnetokalorische Effekt besonders groß ausfällt. Der Vorteil gegenüber Gadoliniumverbindungen besteht hier in den deutlich geringeren Herstellungskosten.

Zusätzlich können die magnetischen Eigenschaften von Legierungen auch über die Optimierung der Mikrostruktur verbessert werden. So wurde anhand von Eisen-Silizium-Lanthan-Legierungen gezeigt, dass die magnetische Hysterese mit sinkender Korngröße abnimmt.

Parallel dazu wurden Keramiken entwickelt, die ebenfalls bei Raumtemperatur zum Einsatz kommen können. Ihr Nachteil war anfangs, dass sie das hochgiftige Element Arsen enthielten. In den letzten Jahren wurden jedoch vermehrt vielversprechende alternative Keramiken entwickelt, die ungiftig und günstiger in der Herstellung sind, aber einen vergleichbar großen magnetokalorischen Effekt aufweisen wie die vorgenannten Legierungen.

Derzeit sind Kühlsysteme basierend auf dem magnetokalorischen Effekt noch nicht konkurrenzfähig. Doch ist zu erwarten, dass durch Weiterentwicklung geeigneter Legierungen oder Keramiken noch größere Temperaturdifferenzen sowie deutliche Effizienzsteigerungen erreicht werden können. Gleichzeitig werden auch die Permanentmagneten ständig weiterentwickelt. So könnten bereits mittelfristig die ersten magnetbasierten Kühlschränke auf den Markt kommen, die bei einer Kühlleistung von einigen hundert Watt nur noch halb so viel Strom verbrauchen wie die besten bisher kaufbaren Geräte.

Dr. Ramona Langner, Oktober 2011

Neue Werkstoffe für den Korrosionsschutz

In jüngerer Zeit steht die Umweltverträglichkeit im Vordergrund der Bemühungen um die Entwicklung neuer Korrosionsschutzsysteme.

Korrosionsphänomene an metallischen Bauteilen sorgen für erheblichen wirtschaftlichen Schaden und werden schon seit langem untersucht und bekämpft. In jüngerer Zeit sind die diesbezüglichen Forschungs- und Entwicklungsbemühungen vor allem aufgrund neuer Richtlinien zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit noch einmal intensiviert worden.

Korrosionsschutzmaßnahmen zielen darauf ab, eine nachhaltige Schädigung von Bauteilen über deren gesamte Lebensdauer hinweg zu verhindern. In der Regel werden hierzu Beschichtungen auf den metallischen Basiswerkstoff aufgebracht, die auf ihn und die jeweiligen Umgebungsbedingungen optimiert sind. Ihre Betriebseigenschaften und Haltbarkeit hängen von vielen unterschiedlichen Faktoren ab. Diese definieren sich über das Wechselspiel von Beschichtungsmaterial und Vorbehandlung des metallischen Bauteils, über die Art, Adhäsion und Dicke der Schutzschicht sowie über die Umweltbedingungen. Im Allgemeinen werden nach ihrem Wirkmechanismus drei unterschiedliche Schichttypen unterschieden: Sperr- und Opferschichten sowie reaktionshemmende Schichten.

Sperrsichten dienen der vollständigen Unterbindung von Diffusionsprozessen korrosiver Medien durch die Schutzschicht an die Bauteilloberfläche. Ein solcher Schutz ist je nach Umweltbedingungen immer nur vorübergehend wirksam. Opferschichten enthalten elektrochemisch aktiverre, also unedlere Metalle oder Legierungen (wie z. B. Zink) als der zu schützende Basiswerkstoff. Zusammen mit dem Basiswerkstoff wird ein galvanisches Element gebildet. Die Schutzwirkung basiert auf der Korrosion bzw. Auflösung des Opfermetalls. Auch dieser Mechanismus ist nur zeitlich begrenzt funktionsfähig. Reaktionshemmende Schichten hingegen wirken dauerhaft über eine intrinsische Passivierung der Bauteillober-

fläche und die Bildung einer dichten Schutzschicht aus Metallverbindungen wie Phosphaten oder Chromaten, die den Transport aggressiver Medien behindern.

In jüngerer Zeit steht die Umweltverträglichkeit im Vordergrund der Bemühungen um die Entwicklung neuer Korrosionsschutzsysteme. Dabei geht es insbesondere um die Minimierung flüchtiger organischer Verbindungen und den (weltweit zunehmenden) Verzicht auf bestimmte chromhaltige Produkte. Neben der Umformulierung und Verbesserung konventioneller Verfahren, wie z. B. dem Übergang von organischen Lösungsmitteln auf Wasser, werden seit einiger Zeit vermehrt auch alternative Ansätze wie auf dem Sol-Gel-Verfahren, dem Einbau elektrisch leitender Polymere oder auf metallischen Gläsern basierende Beschichtungssysteme erprobt.

Der Übergang auf wasserbasierte Beschichtungen ist nach wie vor von einer Reihe zu lösender Fragen begleitet, die über die reine Entwicklung wasserlöslicher Binder, lösungsvermittelnder Additive oder geeigneter Reaktionspfade hinaus geht. Zum einen ist Wasser selbst ein korrosives Medium, das in kürzester Zeit z. B. an Schweißnähten Flugrost verursachen kann. Dadurch wird häufig der Zusatz eines Inhibitors wie Natriumnitrat notwendig. Auch der mögliche Temperaturbereich für die Verarbeitung und Aushärtung des Schichtsystems ist eingeschränkt und darf keine Frostperioden enthalten. Darüber hinaus ist bislang der Zusatz von Bioziden zur Verhinderung des Einnistens von Bakterien oder Algen während Lagerung, Auftrag und Abbindephase erforderlich.

Die Weiterentwicklung wasserlöslicher Binder hat bei den vier wichtigsten Harzgruppen über die letzten zwanzig Jahre zu einer Reihe guter Ergebnisse geführt. Auch wurden verschiedene Verfahren wie z. B. die Elektroabscheidung von Epoxid- oder Acrylatprimern in Wasser entwickelt, die zur Verbesserung der Schichtparameter beitragen. Allerdings sind die Applikations- und Schutzeigenschaften wasserbasierter Systeme bisher immer noch nur in Einzelfällen gleichwertig oder gar besser als die entsprechender lösungsmittelbasierter Binder.

Parallel zu der Verbesserung bestehender Systeme wird an der Entwicklung Sol-Gel-basierter Schichtmaterialien gearbeitet. Die hier zugrunde liegenden Verfahren liefern im Endzustand hoch vernetzte anorganisch-organische Produkte, so genannte organisch modifizierte Gläser und Keramiken. Hierbei handelt es sich derzeit überwiegend um wasserlösliche und reaktive Verbindungen auf der Basis von Polysiloxanen. Diese Materialien

sind sowohl über die Auswahl der Moleküle wie auch der einmischbaren Pigmente in weiten Eigenschaftsbereichen einstellbar. Über die Variation des organischen Anteils kann z. B. die Elastizität des Endproduktes, aber auch die Reaktionsfähigkeit beim Abbinden kontrolliert werden. Der anorganische Anteil kann ebenfalls eine Vielzahl von Funktionen definieren, z. B. Härte, UV-Beständigkeit oder Diffusionswiderstand. Sol-Gel-Systeme haben den Vorteil relativ einfacher Anpass- und Verarbeitbarkeit sowie Reparaturfähigkeit, befinden sich aber immer noch in der Frühphase der Erprobung für Schutzanwendungen in korrosiven Medien.

Ein weiterer sehr vielversprechender Ansatz ist die gezielte Entwicklung metallischer Gläser für Korrosionsschutzanwendungen. Hierbei handelt es sich um amorphe, also nichtkristalline Legierungen, die über verschiedene relativ einfach handhabbare Verfahren wie z. B. Hochgeschwindigkeitsflammspritzen, gepulstes thermisches Spritzen oder Hochgeschwindigkeitskaltsprühen auf metallische Bauteile aufgetragen werden können. Über die Auswahl, die exakte Einstellung der Mischungsverhältnisse sowie die homogene Verteilung der Legierungselemente im metallischen Glas lassen sich unterschiedlichste Parameter wie elektrochemisches Potential oder mechanische Eigenschaften der Schutzschicht problemgerecht einstellen und die Beschichtungen an eine Vielzahl metallischer Basiswerkstoffe anpassen. Ein inzwischen recht gut untersuchtes System besteht aus den drei Komponenten Aluminium, Seltene Erden und Übergangsmetalle. Da für viele Metalle und ihre Mischungen wichtige Eigenschaftsparameter bekannt sind, lassen sich metallische Gläser und ihre Eigenschaften auch sehr gut vorab über Modellrechnungen analysieren. Nicht zuletzt diese Tatsache begründet die guten Zukunftsaussichten auch dieser neuen Werkstoffgruppe für den Korrosionsschutz.

Stefan Reschke, November 2011

Elektromobilität

Insgesamt sind aus technologischer Sicht keine prinzipiellen Gründe erkennbar, warum die Schlüsseltechnologien für elektromobile Kraftfahrzeuge nicht zu einer praktikablen Leistungsfähigkeit weiterentwickelt werden könnten.

In elektromobilen Fahrzeugen basieren wesentliche Komponenten des Antriebsstrangs auf der Nutzung elektrischer Energie, wobei deren tatsächlicher Anteil am Vortrieb unterschiedlich groß sein kann. Elektromobilität war schon früh Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungsbemühungen. Im Schiffbau wird sie inzwischen zunehmend realisiert. So sind elektrische Antriebe, die den von Dieselpartikulatoren erzeugten Strom nutzen, bei Schiffen je nach Einsatzprofil bereits Stand der Technik. Sogar in der Luftfahrt, wo konventionelle Verbrennungskraftmaschinen noch sehr lange dominieren werden, gibt es erste Prototypen komplett elektrisch angetriebener bemannter Systeme. Im Bereich der Landfahrzeuge hat sich die Elektromobilität bisher nur im Schienenverkehr durchgesetzt. Im Straßenverkehr ist ihre großtechnische Verbreitung trotz unbestrittenen Vorteile letztlich immer an wirtschaftlichen Überlegungen gescheitert. Diese Situation ändert sich derzeit grundlegend.

Im Kraftfahrzeugbereich wird in den nächsten Jahren die größte Dynamik bei der Integration elektrischer Komponenten in den Antriebsstrang erwartet. Kaum ein anderes Forschungsthema erfreut sich heute einer derart hohen politischen Priorisierung und Förderung, und zwar in allen führenden Industrienationen. Die Ursachen dafür liegen vor allem in der erwarteten weiteren Steigerung der Rohölpreise und bei der aktuellen Umweltgesetzgebung zur Bekämpfung des Klimawandels. Vorteile verspricht man sich vor allem im Hinblick auf die Erhöhung der Effizienz beim Energiedurchfluss. Noch vor der weiteren Optimierung der Verbrennungskraftmaschinen und der Nutzbarmachung alternativer Kraftstoffe steht die Elektromobilität hier im Mittelpunkt der Bemühungen. So ist z. B. eine echte Rückgewinnung der beim Bremsen normalerweise verloren gehenden Energie in der Praxis überhaupt nur unter Einbeziehung elektrischer Komponenten möglich.

Dazu kommt eine sehr gute Wirkungsgradkette des Elektroantriebes. Weitere Vorteile können bei den Fahreigenschaften erwartet werden, z.B. aufgrund der prinzipiell sehr günstigen Drehmomentcharakteristik von Elektromotoren.

Zur Realisierung der Elektromobilität im Straßenverkehr gibt es verschieden weit gehende technische Lösungsmöglichkeiten. So genannte Mikrohybridfahrzeuge verfügen über eine Start-Stopp-Automatik und/oder Bremsenergierückgewinnung. Das bedeutet hier lediglich, dass die ohnehin vorhandene Lichtmaschine nur im Schiebemodus bzw. beim Bremsen zugeschaltet wird. Es gibt keine elektrische Antriebskomponente.

In allen weiter gehenden Varianten verfügt das Fahrzeug über mindestens einen Elektromotor, der zum Vortrieb beitragen kann. Bei oft als Mildhybride bezeichneten Systemen bleibt der Verbrennungsmotor die Hauptantriebsquelle, die von einem Elektromotor unterstützt werden kann. Ein sog. Starter/Generator lädt die Batterie im Schiebemodus bzw. beim Bremsen auf. Wenn das Fahrzeug außerdem auch rein elektrisch fahren kann, spricht man von Vollhybriden.

In der höchsten Stufe werden elektromobile Fahrzeuge ausschließlich elektrisch angetrieben. Der Fahrstrom kann über einen an einen Generator gekoppelten Verbrennungsmotor (z.B. dieselelektrischer Antrieb) oder von einer Brennstoffzelle erzeugt werden. Auch Systeme mit ausschließlicher Stromversorgung aus einer Batterie sind möglich. Dann muss die Batterie immer wieder getauscht oder neu aufgeladen werden (Plug-in).

Die Schlüsseltechnologien zur Realisierung elektromobiler Landfahrzeuge liegen neben einem besonders aufwändigen Energiemanagement in den Bereichen Hochleistungselektronik, Brennstoffzellen und Hochleistungsenergiespeicher. Ein wesentliches Problem für die Hochleistungselektronik (hohe Spannungen, sehr hohe Ströme) ist die Notwendigkeit zur Kühlung. Diese könnte überflüssig werden bei Verwendung sog. Large-Band-Gap-Halbleiter wie Siliziumcarbid, die aber noch nicht praktikabel bzw. wirtschaftlich sind.

Die Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie ist gerade in Deutschland schon sehr weit fortgeschritten. Ihre Anwendungen reichen von der Versorgung kleiner elektronischer Geräte bis hin zum Antrieb von U-Booten. Für den Einsatz in Kraftfahrzeugen scheinen insbesondere die Typen PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, mit Wasserstoff betrieben) und DMFC (Direct Methanol Fuel Cell, mit Methanol betrieben) in Frage zu

kommen. Probleme gibt es bisher insbesondere mit der Robustheit im praktischen Einsatz. Auch die Infrastruktur betreffende Fragen müssen noch geklärt werden.

Als zentrale Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität gilt die Energiespeicherung. Wichtigstes Kriterium ist die Energiedichte der dazu eingesetzten Systeme. Lithium-Ionen-Batterien sind im Automobilbau neu und werden hier auf absehbare Zeit eine dominante Rolle spielen. Mg-Luft- und Al-Luft-Systeme sowie weitere nicht lithiumbasierte Hochtemperaturbatterien könnten ab 2030 als Konkurrenz auftreten, Zink-Luft-Systeme vielleicht schon ab 2020. Bis 2030 sollte es jedoch keine ernsthafte Konkurrenz geben, die Li-Ionen-Batterien überholen oder überflüssig machen könnte. Interessante Entwicklungen gibt es auch bei elektrochemischen Doppelschicht-Kondensatoren, die einen Kompromiss zwischen den guten Energiedichten von Batterien und den hohen Leistungsdichten von Kondensatoren bieten sollen.

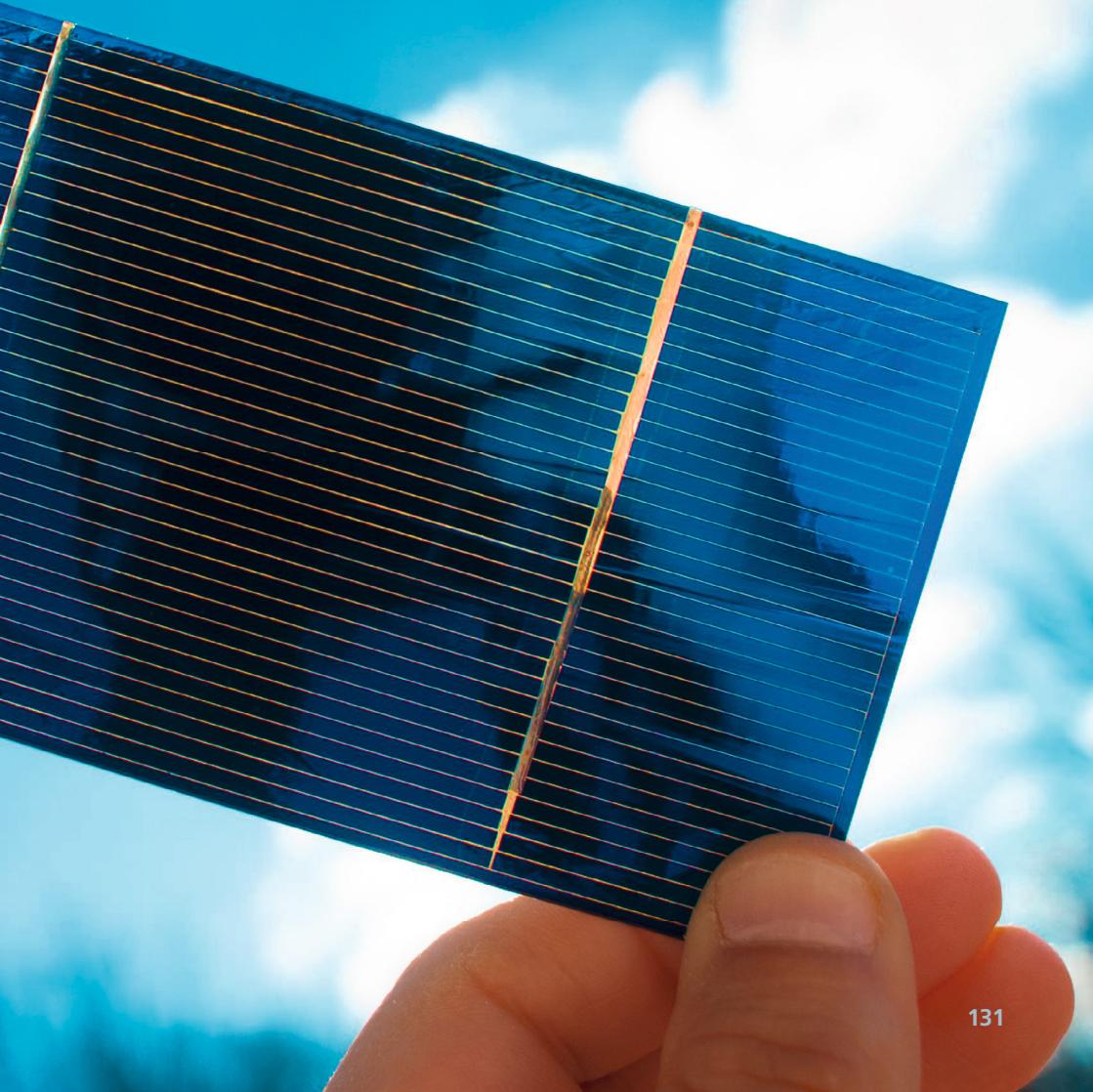
Insgesamt sind aus technologischer Sicht keine prinzipiellen Gründe erkennbar, warum die Schlüsseltechnologien für elektrische Kraftfahrzeuge nicht zu einer praktikablen Leistungsfähigkeit weiterentwickelt werden könnten. Im Prinzip ist Elektromobilität auch hier schon heute möglich, je nach Ausprägung allerdings mit wichtigen Einschränkungen bei Ökonomie und Praxistauglichkeit. Auch die tatsächlichen Auswirkungen auf die Umwelt sind für jede technische Lösung einzeln zu bewerten, z.B. wenn es um die Frage geht, wie der Strom eigentlich erzeugt worden ist, mit dem Plug-in-Fahrzeuge „betankt“ werden. Trotzdem kann man sagen, dass Elektromobilität im zivilen Kraftfahrzeugbau zukünftig immer dominanter werden wird. Im militärischen Bereich spielen vor allem auch spezifische einsatzrelevante Kriterien eine Rolle, sodass eine Vorhersage hier ungleich schwieriger zu treffen ist.

Jürgen Kohlhoff, Dezember 2011

Beiträge aus 2012

Alternative Kraftstoffe	132
Biomimetische UUV	135
Redox-Flow-Batterien	138
Neuromorphe Computersysteme	141
Hyperspektrale Bildgebung	144
Dünnschichtsolarzellen	147
Höhenplattformen	150
Massive Metallische Gläser	153
Laufmaschinen	156
Antimikrobielle Oberflächen	159
Exascale-Computer	162
Alternative Antriebe Luft	165





Alternative Kraftstoffe

Eine ideale Lösung wäre die photo- oder elektrochemische Umsetzung von CO₂ (etwa aus Industrieabgasen) zu einem Kraftstoff, also die Umkehrung des Verbrennungsprozesses. Dies stellt jedoch noch eine erhebliche Herausforderung an die Katalyseforschung dar.

Eine wachsende Weltbevölkerung sowie allgemein zunehmende Mobilität und Handelsströme führen auch weiterhin zu einem steigenden Bedarf an Kraftstoffen zum Antrieb von Fahrzeugen. Damit verbunden ist die Umweltbelastung z. B. durch CO₂-Emissionen, die den Treibhauseffekt erhöhen und deshalb eingedämmt werden müssen. Dazu kommen steigende Preise aufgrund der begrenzten Ressourcen fossiler Energieträger und die starke Abhängigkeit von erdölfördernden Staaten. Allerdings erweist sich die chemische Energiespeicherung in Flüssigkeiten als bislang konkurrenzlos bezüglich der Energiedichte, weshalb sie für mobile Anwendungen trotz aller Bemühungen z. B. um die sog. Elektromobilität auch zukünftig nicht vollständig abzulösen sein wird. Daher wird an der Entwicklung von alternativen Kraftstoffen gearbeitet.

Biokraftstoffe (Biofuels) werden aus Biomasse erzeugt. Zu den Biokraftstoffen der 1. Generation zählen die partiell bereits etablierten Biodiesel, Bioethanol und Biogas, die zum großen Teil aus landwirtschaftlichen Erzeugnissen stammen. Biokraftstoffe der 2. Generation schließen zusätzlich auch die Forstwirtschaft, neue Energiepflanzen wie die Jatropha sowie Reste und Abfälle der Nahrungsmittelherstellung mit ein. Die benötigten Herstellungsverfahren befinden sich in vielen Fällen noch in der Entwicklungsphase. Verfahren zur Herstellung von Biokraftstoffen der 3. Generation existieren zurzeit nur im Labormaßstab. Dazu gehört die Gewinnung von Biomasse oder Wasserstoff mit Hilfe von Algen oder Bakterien.

Die Nutzung von Biomasse hat jedoch entscheidende Nachteile. Ihre Erzeugung geht derzeit mit einem großen Bedarf an landwirtschaftlicher Fläche einher, durch die eine Ressourcenkonkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion entsteht. Viele aufwändige ver-

fahrenergietechnische Schritte und zusätzliche CO₂-Emissionen führen zu teils unwirtschaftlichen Prozessen und erhöhen die Kosten. Biokraftstoffe sind deshalb oft wirtschaftlich noch ökologisch konkurrenzfähig. Ein weiterer Nachteil ist die im Vergleich zur photovoltaischen Stromerzeugung wesentlich geringere Flächeneffizienz. Trotz allem hat die Biomasse auch Vorteile, weil sie auf nachwachsenden Rohstoffen beruht und in größeren Mengen zur Verfügung steht.

Ein heute bereits wichtiger Energieträger ist das Erdgas, welches zum größten Teil aus Methan besteht. Erdgas kann durch Biogas, das aus Energiepflanzen und biogenen Rohstoffen gewonnen wird, ersetzt werden. Das erfolgt zwar schon teilweise, ist jedoch noch nicht konkurrenzfähig. Biogas kann in das bestehende Erdgassystem eingespeist werden. Aus Biogas werden Strom, Wärme und Biokraftstoffe erzeugt. Sog. Synthetic Natural Gas (SNG) entspricht in seiner Zusammensetzung weitgehend dem Erdgas und wird aus Kohle oder auch aus Biomasse hergestellt, wobei die Verwendung von Kohle zu einer Verschlechterung der CO₂-Bilanz führt. Aktuelle Entwicklungen beschäftigen sich mit der Herstellung von Biomethan aus CO₂ und Wasserstoff. Einige Unternehmen des öffentlichen Nahverkehrs betreiben ihre Busse bereits mit Biomethan.

Synthetische Kraftstoffe werden nach Vergasung unterschiedlicher Ausgangsstoffe aus dem so gewonnenen Synthesegas (Kohlenmonoxid und Wasserstoff) über die sog. Fischer-Tropsch-Synthese synthetisiert. Die Ausgangsstoffe können sowohl Biomasse (Biomass-to-Liquid, BtL) als auch Kohle (Coal-to-Liquid, CtL) oder Erdgas (Gas-to-Liquid, GtL) sein. Das BtL-Verfahren verwendet als Ausgangsmaterial Lignocellulose aus Holz, Stroh, Ganzpflanzen oder biogenen Abfällen. Die unterschiedlichen Verfahrensvarianten führen nach Veredelungsprozessen wie Hydrocracken bzw. Isomerisierung zu Wachs, Diesel, Benzin, Flüssiggas oder auch Gas.

Ein Ziel für die Zukunft ist die wirtschaftliche Herstellung im großtechnischen Maßstab sowie die Kombination mit anderen Anlagen. Das CtL-Verfahren ist aus technischer Sicht schon lange ausgereift, seine wirtschaftliche Bedeutung ist allerdings gering. Nach dem GtL-Verfahren werden Kraftstoffe in ersten Pilotanlagen großtechnisch hergestellt und in Autos und Flugzeugen getestet.

Das Synthesegas aus der Fischer-Tropsch-Synthese kann alternativ auch nach dem Methanol-Verfahren über das Zwischenprodukt Dimethylether (DME) zu Flüssigkraftstoffen weiter verarbeitet werden. Methanol und DME zählen ebenfalls zu den synthetischen Kraftstoffen.

Neben diesem zweistufigen Prozess befindet sich noch ein einstufiges Verfahren in der Entwicklung.

Bei allen Bemühungen um die Etablierung von Alternativen ist festzustellen, dass die konventionellen Kraftstoffe bis mindestens 2030 bestimmt bleiben werden. Im Vergleich erzeugen alternative Kraftstoffe durch ihre Herstellung und Verbrennung bei Nutzung von Kohle deutlich mehr und bei Erdgas vergleichbare CO₂-Emissionen. Die Nutzung von Biomasse kann zwar prinzipiell CO₂-neutral erfolgen, in der Praxis ist sie, abhängig vom Rohstoff, oft sehr problematisch. Biokraftstoffe können aufgrund der limitierenden Verfügbarkeit von Biomasse und des hohen Investitionsbedarfs nur begrenzt hergestellt werden. Das wirtschaftliche Potenzial von Biogas ist noch nicht ausgeschöpft. Synthetische Kraftstoffe sind aufgrund der hohen Emissionen und Energieverluste sowie der aufwändigen und teuren Verfahrenstechniken zurzeit nicht oder kaum verfügbar. Im Prinzip bieten BtL-Kraftstoffe das größte Potenzial als alternative Kraftstoffe.

Aktuelle politische Entscheidungen zeigen, dass die konventionellen erdölbasierten Kraftstoffe zunehmend durch biogene ergänzt werden. Langfristig werden jedoch weder die Potenziale der biogenen noch die der erdölbasierten Kraftstoffe ausreichen. Im Fokus wird dann die Nutzung photovoltaisch erzeugter Elektrizität stehen, die jedoch geeignet gespeichert werden muss. Hier konkurrieren elektrochemische (Batterie-) Speicher mit chemischen Energiespeichern wie aus Strom erzeugtem Wasserstoff. Eine ideale Lösung wäre die photo- oder elektrochemische Umsetzung von CO₂ (etwa aus Industrieabgasen) zu einem Kraftstoff, also die Umkehrung des Verbrennungsprozesses. Dies stellt jedoch noch eine erhebliche Herausforderung an die Katalyseforschung dar.

Dr. Stefanie Labs, Januar 2012

Biomimetische UUV

Im Bereich der unbemannten Unterwasserfahrzeuge gibt es heute einen deutlichen Trend zu biomimetischen Konzepten. Im Fokus stehen dabei vor allem die Antriebskonzepte aquatischer Lebewesen.

Biomimetik, oder auch Bionik, bezeichnet den wissenschaftlichen Ansatz, Technologien und Erfindungen aus der Natur, die sich über einen langen Zeitraum im Laufe der Evolution entwickelt und bewährt haben, für technische Lösungen umzusetzen. Dabei zeichnen sich die Erfindungen der Natur zumeist durch einen hohen Wirkungsgrad und eine hohe Robustheit aus. Im Bereich der unbemannten Unterwasserfahrzeuge (engl. Unmanned Underwater Vehicles, UUV) gibt es heute einen deutlichen Trend zu biomimetischen Konzepten. Im Fokus stehen dabei vor allem die Antriebskonzepte aquatischer Lebewesen wie der Schwimmmechanismus von Fischen.

Der bei der Fortbewegung von Fischen erreichbare Wirkungsgrad wurde in der biologischen Grundlagenforschung ab Mitte der 1970er Jahre zunehmend erforscht. Der Nachweis eines hohen Wirkungsgrades weckte Interesse in den Ingenieurwissenschaften auf der Suche nach einer energiesparenden Alternative für den herkömmlichen Antrieb via Schiffsschraube. In der Folge startete Anfang der 1990er mit dem RoboTuna-Projekt eines der wichtigsten Vorhaben auf dem Gebiet biomimetischer UUV. Ziel dieses Projekts war es, den hocheffizienten Flossenantrieb des Thunfisches zu verstehen und technisch nachzubauen. Thunfische sind ausdauernde, schnelle Schwimmer, die eine Geschwindigkeit von bis zu zehn Körperlängen pro Sekunde erreichen (bis 75 km/h). Bereits die ersten Prototypen konnten zeigen, dass ein solcher biomimetischer Antrieb Wirkungsgrade von bis zu 86 % erreicht und somit deutlich effizienter ist als ein herkömmlicher Propellerantrieb mittels Schiffsschraube (Wirkungsgrad ca. 40 %). Der effiziente Antrieb von Fischen basiert vor allem auf der gezielten Erzeugung von Wirbelstraßen. Bei Propellerantrieben wird nicht nur Schub erzeugt, sondern das Wasser wird zudem durch die Rotation des Propellers

ebenfalls in Drehung versetzt, so dass ein großer Teil der Antriebsenergie keinen Beitrag zur eigentlichen Fortbewegung leistet und verloren geht. Fischähnliche Konzepte versprechen außerdem eine hohe Manövrierfähigkeit und Agilität. So ist z. B. ein Wenden auf der Stelle innerhalb weniger Sekunden bis hin zu Bruchteilen von Sekunden ohne nennenswerten Geschwindigkeitsverlust möglich.

Dass es bei UUV einen deutlichen Trend zu biomimetischen Konzepten gibt, kann anhand der Vielzahl, aber auch insbesondere anhand der Vielfalt unterschiedlicher verfolgter Ansätze erkannt werden. So stehen inzwischen nicht nur die ohnehin schon vielfältigen fischähnlichen Konzepte im Zentrum der Betrachtung. Auch Unterwasserlaufroboter inspiriert durch Hummer und hochflexible, krakenähnliche Systeme werden bereits erforscht und entwickelt. Weitere Formen des Schwimmens, die ebenfalls untersucht werden und zu denen es auch bereits erste Prototypen gibt, sind paddelartige Antriebe und solche, die einen flugartigen, gleitenden Vortrieb ähnlich den Pinguinen und Mantarochen nutzen.

Die Anzahl der relevanten Forschungsprojekte hat also in den letzten zehn Jahren deutlich zugenommen. So entstanden bereits einige Prototypen, die sich ferngesteuert oder teilweise autonom, wenn auch wenig intelligent, durch das Wasser bewegen können und dabei über sehr einfache sensorische Ausstattungen bis hin zu ausgeklügelten Sonar-Fähigkeiten verfügen. Da sich UUV prinzipiell vor allem für Überwachungs- und Aufklärungsmissionen eignen, sind auch biomimetische UUV besonders im Sicherheitsbereich von Bedeutung. Im zivilen Bereich können sie bei der Überwachung von Bohrinseln oder Küstenabschnitten von Interesse sein. In der Stadt Gijón ist sogar bereits ein erster kommerzieller Einsatz geplant. Dort soll bald die Wasserqualität im Hafen mit drei autonom navigierenden Roboterfischen überwacht werden.

Die angesprochenen Vorteile lassen biomimetische UUV auch für die Wehrtechnik relevant erscheinen. Durch den höheren Wirkungsgrad können größere Reichweiten und längere Tauchzeiten realisiert werden. Außerdem lassen sie sich nicht nur visuell kaum von ihren biologischen Vorbildern unterscheiden, sondern auch ihre hydrodynamischen Signaturen ähneln denen biologischer Lebewesen. Aufgrund ihrer Unauffälligkeit können sie daher für verdeckte Überwachungsmissionen eingesetzt werden. Durch ihre sehr gute Manövrierfähigkeit und Agilität können sie Angriffen und sonstigen Gefahren besser ausweichen.

Ihr Nutzen hängt dabei insbesondere von ihrer Intelligenz und ihrer sensorischen Ausstattung ab. In Verbindung mit visuellen, chemischen und hydrodynamischen Sensoren könnten sie ein detailliertes Bild z. B. feindlicher Küstenbereiche oder Häfen erzeugen. Biomimetische UUV könnten außerdem weit entfernt vor der Küste abgesetzt werden und unentdeckt tief bis in kritische Bereiche eindringen. Mit schlängelnden Systemen und Laufrobotern sind sogar amphibische Missionen möglich.

Sollten biomimetische UUV zukünftig in der Lage sein, intelligente, leistungsfähige Sensornetzwerke aufzubauen, könnten mit ihrer Hilfe sogar größere Areale überwacht werden. Außerdem ermöglichen die geschlossene Kontur und das Fehlen von sich drehenden Bauteilen eine Bewegung auch in sensibler Umgebung, so dass sich solche Systeme auch zur Inspektion und Wartung von Pipelines, Kabeln oder ähnlichem eignen könnten. Im Prinzip erscheint sogar die Beeinflussung von Fischschwämmen möglich und somit ein Einsatz im kommerziellen Fischfang.

So liefert die Biologie zwar eine Fülle von Ideen, die technische Umsetzung in praktisch nutzbare Systeme ist jedoch häufig schwierig. Neben der Ausstattung mit ausreichender Intelligenz und geeigneter Sensorik liegen die eigentlichen Herausforderungen für die weitere Entwicklung biomimetischer UUVs in angrenzenden Technologiebereichen. Wichtig zur Umsetzung eines Antriebs nahe dem biologischen Vorbild sind intelligente Materialien und Strukturen, die ähnliche Eigenschaften wie die von der Natur eingesetzten Biomaterialien bereitstellen. So bedarf es innovativer Aktuatoren, die eine muskelähnliche Kontraktion erlauben und somit die Bewegungsweise des biologischen Vorbilds besser nachvollziehen können. Vielversprechend erscheinen hier künstliche Muskeln auf Basis von Formgedächtniswerkstoffen, elektroaktiven Polymeren oder mit pneumatischer bzw. fluidischer Wirkweise.

Dr. Martin Müller, Februar 2012

Redox-Flow-Batterien

Redox-Flow-Batterien bieten eine Reihe interessanter Eigenschaften für stationäre Netzanwendungen, so können z. B. speicherbare Energiemenge und erreichbare elektrische Leistung unabhängig voneinander dimensioniert werden.

Im Zusammenhang mit der sog. Energiewende zur Realisierung einer nachhaltigen Energieversorgung steigt die Bedeutung von Speichern für elektrische Energie. Eine wichtige Rolle werden hier in Zukunft die im Prinzip zwar schon länger bekannten, aufgrund neuer Entwicklungen aber erst jetzt zunehmend in den Bereich technischer Realisierbarkeit vordringenden Redox-Flow-Batterien spielen. Dabei handelt es sich um elektrochemische Energiespeicher, bei denen die Energie in zwei Flüssigkeitstanks gespeichert ist. Diese Halbzellen der Batterie enthalten jeweils Elektrolytlösungen aus speziellen chemischen Stoffen, sog. Redox-Paaren, mit unterschiedlichen elektrochemischen Potentialen. Für den Lade- und Entladevorgang werden diese energiespeichernden Materialien durch eine Konverterzelle gepumpt. Der Konverter hat Ähnlichkeiten mit einer Brennstoffzelle, funktioniert aber in beiden Richtungen. An seiner ionenleitenden Membran findet durch chemische Reaktion nicht nur die Erzeugung, sondern in der Umkehrreaktion auch die Speicherung elektrischer Energie statt. Bei diesen Vorgängen verändert sich jeweils der Oxidationszustand der Redox-Paare in den Behältern.

Im Vergleich zu herkömmlichen Batterien, wo die elektrochemisch aktiven Verbindungen in den Batterieelektroden gespeichert werden, geschehen Energiewandlung und chemische Energiespeicherung bei der Redox-Flow-Batterie räumlich getrennt. So wird die speicherbare Energiemenge durch die Größe der Tanks mit dem chemischen Speichermedium bestimmt. Die erreichbare elektrische Leistung hängt dagegen von der Auslegung des Konverters ab. Dadurch wird eine vollständig unabhängige Dimensionierung dieser beiden Parameter ermöglicht, was im Batteriesektor einzigartig ist und in manchen Anwendungen einen großen Vorteil darstellt.

Daneben bieten Redox-Flow-Batterien einige weitere spezifische Vorteile. Es gibt keinen Memory-Effekt, keine Selbstentladung und sie sind unempfindlich gegenüber Tiefentladung. Der Speicherwirkungsgrad liegt mit typischerweise ca. 80 % recht hoch und übertrifft z. B. die Effizienz eines elektrochemischen Wasserstoffspeichers auf Basis von Wasserelektrolyse und Rückverstromung mit Brennstoffzellen bei weitem. Da die Komponenten beim Laden und Entladen keine strukturellen Änderungen erfahren, ist die Lebensdauer von Redox-Flow-Batterien dadurch auch nicht begrenzt. So wurden in der Praxis bereits mehrere Hunderttausend Ladezyklen demonstriert, was sich auch günstig auf die Lebenszeitkosten auswirkt.

Hauptnachteil des Redox-Flow-Batterieprinzips ist die Größe der Anlagen, da die bislang erreichten Speicherdichten mit 20 – 35 Wh/l ca. dreimal unter denen herkömmlicher Bleiakkus liegen.

In der Summe ihrer Eigenschaften bieten sich Redox-Flow-Batterien vor allem als stationäre Speicher im Stromnetz an. Dieses Anwendungsgebiet gewinnt derzeit sehr an Bedeutung, da der steigende Anteil der Photovoltaik und Windkraft an der Stromerzeugung im Stromnetz zu Schwankungen führt, die zunehmend schwieriger ausgeglichen werden können. In einem zukünftigen intelligenten Stromnetz (Smart Grid) werden dezentrale, netzintegrierte Redox-Flow-Batterien als Leistungs- und Regelreserve zu einer besseren Ausnutzung der regenerativen Energiequellen beitragen. Hierfür sind sie besonders geeignet, da sie selbst im Millisekundenbereich auf Schwankungen reagieren können.

Das unterscheidet sie von den großen Pumpspeicher- oder Druckluftkraftwerken, die zwar sehr große Energimengen speichern können, aber in der Stromabgabe eher träge reagieren. Außerdem erfordern diese Anlagen eine spezielle geographische Lage.

Grundlegende Untersuchungen zu Redox-Flow-Batterien begannen schon vor etwa 40 Jahren. Allerdings konnten erst mit der Verwendung von Vanadium-Verbindungen für beide Halbzellen die technischen Hürden auf dem Weg zur kommerziellen Einsatzreife genommen werden. Heute ist weltweit bereits eine Reihe von Demonstrationsanlagen mit bis zu 50 MWh Kapazität und 10 MW Leistung in Betrieb. Inzwischen wird weltweit an der Optimierung dieses Typs gearbeitet. Außerdem wird auch noch eine Vielzahl anderer Redox-Paare untersucht. Darunter sind auch Verbindungen, deren elektrochemisches Potential so hoch ist, dass Wasser nicht mehr als Lösemittel dienen kann, weil es sich

durch Elektrolyse zersetzen würde. Hier müssen andere ionische Flüssigkeiten verwendet werden, mit denen dann aber auch deutlich höhere Energiedichten denkbar sind.

Eine Variante der Redox-Flow-Batterie ist die Hybrid-Flow-Batterie in ihren verschiedenen Varianten. Diese unterscheiden sich generell dadurch, dass mindestens eine der Redox-Spezies nicht mehr komplett in Lösung vorliegt sondern fest oder gasförmig. Der bekannteste Vertreter ist die Zink-Brom-Batterie, bei der sich während des Ladevorgangs elementares Zink absetzt. Es wird auch an Systemen geforscht, bei denen das elektroaktive Material nicht gelöst, sondern als Suspension und damit wesentlich konzentrierter vorliegt. Ein weiterer interessanter Ansatz zur Erhöhung der Speicherdichte ist die Vanadium-Luft-Brennstoffzelle. Hier wird im Vergleich zur Vanadium-Redox-Flow-Batterie eine Vanadium-Halbzelle durch eine Gaselektrode ersetzt, an der Luftsauerstoff umgesetzt wird.

Trotz der relativ geringen Speicherdichte von Redox-Flow-Batterien wird ihre Eignung für hybridelektrische oder vollelektrische Fahrzeuge untersucht. Dies liegt zum einen in der Flexibilität bei der Auslegung und Unterbringung der einzelnen Komponenten, zum anderen an der Möglichkeit zur Schnellladung durch Austausch des flüssigen Speichers an speziellen Tankstellen.

Redox-Flow-Batterien haben also eine Reihe prinzipieller Vorteile gegenüber anderen Speichersystemen und bieten noch vielfältiges technisches Potential für Steigerungen bei der bisher noch relativ geringen Speicherdichte. Vor einer weiten Verbreitung müssen aber auch noch nicht-technische Probleme gelöst werden. So hat bei Vanadium, das zwar als Rohstoff nicht knapp ist, für das es aber in der für Batterien benötigten Form bislang nur geringen Bedarf gab, die vermehrte Nachfrage zu großen Preisschwankungen geführt. Auf jeden Fall hat diese Technologie das Potential, zukünftig eine wichtige Rolle im Stromnetz und in isolierten Kleinnetzen zu spielen.

Dr. Ulrik Neupert, März 2012

Neuromorphe Computersysteme

Insgesamt kann man sagen, dass neuromorphe Computersysteme mit den beabsichtigten kognitiven Fähigkeiten wohl erst langfristig zu erwarten sind.

Ein grundlegender Trend der modernen Technikentwicklung ist die heute wieder zunehmende Bedeutung der Bionik, also der Entschlüsselung und technischen Nutzbarmachung von „Erfindungen der Natur“. Besonders interessante Ansätze gibt es dabei u. a. im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien, wo z. B. neuromorphe Computersysteme noch ganz am Anfang ihrer Entwicklung stehen. Diese orientieren sich bezüglich ihrer Funktionsweise an der neurobiologischen Architektur des Nervensystems und sollen zukünftig kognitive Fähigkeiten aufweisen, die mit denen des Gehirns vergleichbar sind. Ihre Realisierung könnte dem Forschungsgebiet der sog. Künstlichen Intelligenz (endlich) die entscheidenden Impulse geben.

Als grundlegende biologische Funktionseinheit der Informationsverarbeitung im Gehirn gilt das Neuron. Neuronen sind eine spezielle Form von Zellen im Nervensystem. Sie dienen gewissermaßen dem Empfang, der Verarbeitung und der Weiterleitung von Informationen. Sie bilden untereinander Netzwerke, die eine deutlich anspruchsvollere Informationsverarbeitung als einzelne Neuronen erlauben. Neuronen bestehen hauptsächlich aus Dendriten, einem Zellkörper und einem Axon. Dendriten sind baumartige Strukturen, die Informationen von anderen Neuronen empfangen. Das Axon ist eine dünne längliche Struktur, die Informationen auch über größere Entfernung zu anderen Neuronen übertragen kann. Die Stelle, an der das Ende eines Axons mit einem Dendrit oder dem Zellkörper eines anderen Neurons zusammentrifft, wird Synapse genannt. Ein Großteil der Informationsverarbeitung im Gehirn basiert auf den in den Synapsen ablaufenden Vorgängen. Das menschliche Gehirn besteht aus Milliarden von Neuronen und Billionen von Synapsen.

Die Nachbildung der Vorgänge im Gehirn durch neuromorphe Computersysteme kann entweder soft- oder hardwarebasiert erfolgen. Softwarebasierte Ansätze verwenden spezielle Algorithmen zur Nachbildung der neurobiologischen Architektur des Gehirns. Diese Simulationen erfolgen auf der Basis von herkömmlichen Computersystemen. Die Architektur konventioneller Computer unterscheidet sich allerdings erheblich von der Architektur des Gehirns. Insbesondere sind im Gegensatz zu neuronalen Netzwerken bei einem herkömmlichen Computersystem der Ort, an dem die Daten verarbeitet werden, und der Ort, wo die Daten gespeichert werden, räumlich voneinander getrennt. Aufgrund dieser Architekturunterschiede sind Gehirnsimulationen auf konventionellen Computersystemen sehr ineffizient. Daher kommen hier typischerweise Hochleistungsrechner mit einem entsprechend hohen Platz- und Energiebedarf zum Einsatz. Dagegen erzielt das menschliche Gehirn seine große Leistungsfähigkeit bei einem Volumen von ungefähr eineinhalb Litern und einem Energiebedarf, der mit dem einer 20-Watt-Glühbirne vergleichbar ist. Dieser hohen Effizienz möchte man sich im Rahmen von hardwarebasierten Ansätzen für neuromorphe Computersysteme zumindest annähern. Daher orientiert sich deren Hardwarearchitektur an der des Gehirns, weshalb sie sich deutlich von der Hardwarearchitektur herkömmlicher Computer unterscheidet.

Ein mögliches Anwendungsgebiet für neuromorphe Computersysteme ist die Robotik. Hier könnte die Autonomie von Robotern, z.B. hinsichtlich der Navigation in unbekannten Umgebungen, voraussichtlich deutlich gesteigert werden. In einer ähnlichen Weise könnte die sog. Ambient Intelligence profitieren. Die Vision von Ambient Intelligence besteht in der Schaffung einer von Informationstechnologie durchdrungenen Umgebung aus intelligenten, miteinander vernetzten Alltagsgegenständen, die den Menschen situationsgerecht unterstützt. Auch in der Datenauswertung könnten neuromorphe Computersysteme eingesetzt werden. Beispiele hierfür finden sich u.a. bei der gezielten Suche nach bestimmten Informationen in einer großen Anzahl von Quellen, dem sog. Information Retrieval, oder beim Erkennen von gewissen Mustern und Zusammenhängen innerhalb von umfangreichen Datenbeständen, dem sog. Data Mining. Im Bereich der Benutzerschnittstellen könnten neuromorphe Technologien einen natürlicheren Umgang mit Computern gestatten, z.B. in Form von Interaktionen basierend auf natürlich gesprochener Sprache. Im medizinischen Bereich könnten neuromorphe Computersysteme durch Simulationen das Verständnis von neurologischen Erkrankungen verbessern und helfen, geeignete Medikamente zu entwickeln. Darüber hinaus ließe sich durch ihren Einsatz die Entwicklung von Neuroprothesen, z.B. für Patienten mit eingeschränktem Hör- oder Sehvermögen, erleichtern.

Neuromorphe Computersysteme befinden sich zurzeit noch in einem frühen Forschungsstadium. Die einzelnen Forschungsansätze unterscheiden sich unter anderem dadurch, wie naturgetreu die Nachbildung der neuronalen Prozesse im Gehirn jeweils erfolgt. Auf dem Gebiet der softwarebasierten Forschungsansätze wurden bereits Simulationen von Strukturen durchgeführt, die Milliarden von Neuronen beinhalteten. Aufgrund der eingeschränkten Leistungsfähigkeit aktueller Computer muss man derzeit allerdings wählen, ob man komplexe neuronale Strukturen eher grob oder kleinere Systeme detaillierter und daher realistischer simulieren möchte. Darüber hinaus können solche Simulationen zurzeit typischerweise nicht in Echtzeit erfolgen, obwohl hier Hochleistungsrechner mit teilweise Tausenden von Prozessoren eingesetzt werden.

Neuromorphe Computerhardware wird aktuell in erster Linie auf der Grundlage von konventioneller Siliziumelektronik erforscht. Neben Hardwareansätzen auf der Basis von analoger oder digitaler Elektronik werden auch Kombinationen beider Varianten genutzt. Hier existieren z. B. Systeme in der Größe eines Buches, die mit speziellen neuromorphen Mikrochips eine Million Neuronen in Echtzeit simulieren können.

Die weitere Entwicklung neuromorpher Computersysteme ist eng gekoppelt mit der Verbesserung des Verständnisses der Funktionsweise des Gehirns. Hier gibt es heute noch große Herausforderungen, z. B. die synaptischen Verschaltungen im Gehirn betreffend. Insgesamt kann man sagen, dass neuromorphe Computersysteme mit den beabsichtigten kognitiven Fähigkeiten wohl erst langfristig zu erwarten sind.

Dr. Klaus Ruhlig, April 2012

Hyperspektrale Bildgebung

Aktuelle Fortschritte in der Entwicklung kompakter oder sogar miniaturisierter hyperspektraler Sensoren zur gleichzeitigen Aufzeichnung von bis zu hunderten Spektralbändern könnten in den nächsten Jahren viele innovative Anwendungen ermöglichen.

Während herkömmliche Kameras in Wirklichkeit oft nur die Grundfarben Rot, Grün und Blau aufzeichnen, unterscheiden hyperspektrale Systeme dutzende bis hunderte Wellenlängenbereiche (sog. Spektralbänder). Dabei decken sie häufig ein breites Spektrum ab, das sich vom ultravioletten über den sichtbaren bis in den infraroten Spektralbereich erstrecken kann. Hyperspektrale Sensoren liefern so mehr Informationen pro Pixel als jede andere bildgebende Technologie. In den letzten 30 Jahren haben sie sich zu leistungsfähigen Werkzeugen der Fernerkundung entwickelt und etablieren sich mehr und mehr in Forschung und Industrie als berührungslose und zerstörungsfreie Analysegeräte. Kurzfristig ist auch mit ihrem Einsatz in vielen anspruchsvollen militärischen Anwendungsbereichen zu rechnen.

Das besondere Potenzial der hyperspektralen Bildgebung beruht darauf, dass jedes Material Licht auf eine eigene Weise reflektiert und absorbiert – je nach Wellenlänge unterschiedlich stark. Das von Gegenständen reflektierte (oder durchgelassene) Licht trägt dadurch charakteristische spektrale Signaturen, die bei einer hyperspektralen Aufnahme aufgezeichnet werden. In der nachgeschalteten Auswertung der Bilddaten können diese spektralen Signaturen genutzt werden, um verschiedene Materialien eindeutig voneinander zu unterscheiden oder um Materialien eindeutig zu identifizieren.

Inzwischen wurde eine Reihe von grundlegend verschiedenen hyperspektralen Aufnahmetechniken entwickelt. Die gängigsten basieren auf dispersiven Spektrometern, optischen Filtern oder sog. Fourier-Transformations-Spektrometern.

Hyperspektralkameras basierend auf dispersiven Spektrometern nehmen ein Bild zeilenweise auf, wobei das Licht einer Zeile mit einem Prisma oder einem Gitter in seine spektralen Bestandteile zerlegt und derartig aufgefächert auf einen Bildsensor abgebildet wird. Nachdem auf diese Weise jede Zeile des Bildes aufgenommen worden ist, werden die aufgezeichneten Daten zur weiteren Verarbeitung und Auswertung umsortiert und in Form eines sog. Hypercubes abgespeichert. Anschaulich ausgedrückt handelt es sich dabei um einen Stapel von Bildern, die räumlich das Gleiche zeigen, allerdings in unterschiedlichen, aneinander grenzenden Spektralbändern. Viele der neu aufkommenden Hyperspektralkameras arbeiten dagegen mit optischen Filtern, die Licht nur innerhalb eines schmalen, einstellbaren Spektralbandes passieren lassen. Hier werden die Bilder nicht zeilenweise, sondern üblicherweise vollständig aufgenommen. Die gesamte hyperspektrale Aufnahme entsteht dadurch, dass ein Spektralband nach dem anderen aufgenommen wird. Die Funktionsweise von Hyperspektralkameras basierend auf Fourier-Transformations-Spektrometern ist weniger anschaulich. Hier werden die räumliche und die spektrale Information gleichzeitig während der Aufnahmedauer erfasst. Mit Hilfe des mathematischen Verfahrens der Fourier-Transformation wird die spektrale Zusammensetzung des Lichts im Anschluss an die Aufnahme rechnerisch ermittelt.

Unabhängig von der Aufnahmetechnik hängt die Zeit zur Erfassung einer hyperspektralen Aufnahme ganz wesentlich von der zu erzielenden räumlichen und spektralen Auflösung ab und kann Bruchteile einer Sekunde bis hin zu einigen Sekunden betragen.

Je nach Anwendung unterscheidet sich die Art der Auswertung der hyperspektralen Bilddaten. Ist die spektrale Signatur eines Objekts bekannt, dann können die Daten gezielt nach dieser Signatur durchsucht werden. Mittlerweile gibt es etliche Datenbanken, die Reflexionsspektren beispielsweise von natürlichen Materialien oder chemischen Substanzen enthalten. Dadurch lassen sich Hyperspektralkameras an Bord von Flugzeugen oder Satelliten zur geographischen Fernerkundung einsetzen, um die Erdoberfläche in Hinblick auf Mineralien, Vegetation, Gewässer oder künstliche Strukturen zu kartieren. Ein weiterer Einsatzbereich ist das Umweltmonitoring nach Chemieunfällen, Naturkatastrophen oder Anschlägen, um das Ausmaß und die Art der entstandenen Schäden zu erfassen.

In der Lebensmittelproduktion dienen hyperspektrale Systeme zur Zustandsbeurteilung von Pflanzen im Hinblick auf Krankheitsbefall oder Nährstoffversorgung, zur Sortierung von Früchten nach Reifegrad oder zur Aussortierung von Fremdkörpern. Ein hohes Potenzial

haben auch medizinische Anwendungen, wie die Untersuchung von Gewebe auf Krebszellen oder die Beurteilung von Gewebe bei der Wundversorgung.

Zum Aufspüren von Objekten, deren spektrale Signatur nicht bekannt ist, verwendet man Auswertungsverfahren zur Erkennung von Anomalien. Sie suchen in den hyperspektralen Aufnahmen nach Pixeln, die sich spektral vom Hintergrund unterscheiden. So arbeitet man heute an Systemen, mit denen sich beispielsweise im Gelände getarnte Objekte oder Personen aufspüren lassen, die in der Regel nur vom gesamtfarblichen Eindruck, aber nicht spektral an den Hintergrund angepasst sind. Schon seit über 20 Jahren wird der Einsatz luftgestützter hyperspektraler Fernerkundung zur Detektion von Landminen untersucht. Neben oberflächlich ausgelegten, getarnten Minen sollen mit solchen Systemen auch vergrabene Minen aufgespürt werden, die sich durch spektrale Unterschiede zwischen gestörter und ungestörter Vegetation oder Erdoberfläche über den Minen bemerkbar machen. Ebenfalls von hohem Interesse ist die Fähigkeit hyperspektraler Sensoren, Reste von Sprengstoffen oder chemischen Kampfstoffen auf Oberflächen nicht nur entdecken, sondern auch eindeutig identifizieren zu können. Dadurch könnten hyperspektrale Systeme auch verwendet werden, um unkonventionelle Spreng- oder Brandvorrichtungen (IEDs) aufzuspüren.

Durch die vorgesetzte Optik zur spektralen Aufteilung des einfallenden Lichts sind heute verfügbare hyperspektrale Kameras in der Regel unhandlich und zudem teuer. Dadurch konnten sie bisher nur schwer in eine weit verbreitete praktische Anwendung überführt werden. Aktuelle Fortschritte in der Entwicklung kompakter oder sogar miniaturisierter hyperspektraler Sensoren könnten in den nächsten Jahren viele innovative Anwendungen ermöglichen.

Dr. David Offenberg, Mai 2012

Dünnschichtsolarzellen

Eine besondere Bedeutung kommt den Dünnschichtsolarzellen zu, die als sog. Solarzellen der zweiten Generation die bereits etablierten mono- und polykristallinen Siliziumsolarzellen der ersten Generation zunehmend ergänzen bzw. ersetzen.

Die Photovoltaik, d. h. die direkte Erzeugung von elektrischem Strom aus Sonnenlicht mit Solarzellen, wird in den nächsten Jahren eine immer wichtigere Rolle im Bereich der Erneuerbaren Energien spielen. Dazu tragen in erster Linie die sinkenden Anlagenkosten bei, die neben dem Konkurrenzdruck vor allem durch die Nutzbarmachung neuer Werkstoffe und Herstellungsverfahren verursacht werden. Eine besondere Bedeutung kommt dabei den Dünnschichtsolarzellen zu, die als sog. Solarzellen der zweiten Generation die bereits etablierten mono- und polykristallinen Siliziumsolarzellen der ersten Generation zunehmend ergänzen bzw. ersetzen.

Dünnschichtsolarzellen bestehen in der Regel aus einem preiswerten Träger (z. B. Glas), auf dem das Material zur Absorption des Sonnenlichts als ultradünne Schicht von bis zu wenigen Mikrometern Dicke aufgebracht wird. Auch wenn der Wirkungsgrad marktreifer Varianten mit rund 10 % im Vergleich zu herkömmlichen Solarzellen (polykristallin: 14 – 18 %, monokristallin: 17 – 21 %) vergleichsweise gering ist, zeigen sie ein enormes Entwicklungspotenzial mit einer Reihe von Vorteilen.

So können Dünnschichtsolarmodule mit großflächigen Beschichtungsverfahren hergestellt werden. Die Verschaltung der Einzelzellen kann im Gegensatz zu konventionellen Solarzellen, die untereinander verlötet werden müssen, in den Herstellungsprozess integriert werden. Die eingesetzten Verfahren zeichnen sich sowohl durch weniger Produktionsschritte als auch weniger Material- und Energieeinsatz aus. Darüber hinaus ist die Geometrie der Module leichter anpassbar, z. B. an die Oberflächen von Autos oder anderen Gegenständen.

Dünnschichtsolarzellen eröffnen eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten. Aufgrund ihres geringen Gewichts können sie auch in weniger tragfähige Dächer oder Fassaden integriert werden. Außerdem sind sie bei geeigneter Verschaltung in Teilschatten- oder Schwachlichtlagen besser geeignet als herkömmliche Solarmodule. Enormes Potenzial haben sie auch auf flexiblen Trägermaterialien, wie z.B. Bekleidung. Selbst bei der medizinischen Überwachung von Körperfunktionen als Bestandteil einer elektronischen Haut sind sie im Prinzip einsetzbar.

Als Absorbermaterial kommen neben amorphem und mikrokristallinem Silizium unterschiedliche Verbindungshalbleiter zum Einsatz. Silizium-Dünnschichtsolarzellen werden industriell derzeit ausschließlich mittels Abscheidung aus der Gasphase hergestellt, wobei sowohl Glas als auch Metall- und Kunststofffolien beschichtet werden können. Kostengünstigere Verfahren zur Herstellung von flexiblen Zellen befinden sich in der Entwicklung. Die bisher leistungsfähigsten nicht-einkristallinen Silizium-Dünnschichtmodule sind monolithische Tandemzellen, die aus einer unteren mikrokristallinen und einer oberen amorphen Siliziumschicht bestehen. Ihre Effizienz liegt bisher bei maximal 10 %.

In absehbarer Zeit soll eine neue Generation von Silizium-Modulen mit 12 % Wirkungsgrad entstehen. Dazu werden unter anderem verschiedene Nanomaterialien und optische Funktionsschichten untersucht.

Zu den nutzbaren Verbindungshalbleitern gehören Kupfer-Indium-(Gallium)-Schwefel-Selen-Verbindungen (sog. Chalkopyrite, CIS/CIGS), Kupfer-Zink-Zinnsulfid oder -Zinnselenid (CZTS/CZTSe), Cadmiumtellurid oder Galliumarsenid, wobei Galliumarsenid vorwiegend in der Raumfahrt oder im Satellitenbau verwendet wird. Allerdings besteht der Nachteil, dass einige der genannten Inhaltsstoffe nur begrenzt verfügbar und andere giftig sind, so dass zum Teil umweltschädliche Verfahren bei der Modulherstellung eingesetzt werden müssen. Es ist auch noch nicht hinreichend geklärt, ob im Betrieb oder beim Recycling solche Stoffe freigesetzt werden können. Die Lösung derartiger Probleme kann entscheidend für die weitere Verbreitung der entsprechenden Zellenvarianten sein.

Der Wirkungsgrad kommerziell hergestellter CIS/CIGS-Dünnschichtmodule auf Glassubstraten liegt derzeit bei 10 – 13 %. Im Gegensatz zu den siliziumbasierten Dünnschichtzellen zeigen sie keine lichtinduzierte Degradation, müssen aber gegenüber Umwelteinflüssen geschützt werden. Zur Herstellung flexibler Module kommen Substrate aus Titan, Edelstahl

oder Polyimid zum Einsatz, wobei die integrierte Verschaltung der Zellen zu Modulen noch eine große Herausforderung darstellt. Markttaugliche flexible Module sollen in absehbarer Zeit zur Verfügung stehen.

Deutlich kostengünstiger sollen sog. Kesterit-Solarzellen werden (CZTS, CZTSe). Die hier einzusetzenden Materialien sind ungiftig und in der Natur in ausreichender Menge vorhanden. Allerdings befinden sie sich noch im Entwicklungsstadium.

Weltweit gesehen sind Cadmiumtellurid-Solarmodule äußerst erfolgreich auf dem Markt. Sie werden hauptsächlich in großen Freiflächenanlagen eingesetzt. Allerdings gab und gibt es Bestrebungen, diesen Zelltyp aufgrund seiner gesundheitsgefährdenden Stoffe zu verbieten. Obwohl die aktive Schicht zwischen zwei Glasscheiben gekapselt ist, so dass unter normalen Betriebsbedingungen weder Cadmium noch Tellur oberhalb gesetzlicher Grenzen frei werden, kann dies z. B. bei einem Hausbrand unter Umständen nicht ausgeschlossen werden.

Je nach Ausführung werden auch Solarzellen aus organischen Materialien zu den Dünnschichtsolarzellen gezählt. Diese sind im Prinzip noch einfacher und kostengünstiger herzustellen als die anderen Varianten. Allerdings müssen ihre Lebensdauern und Wirkungsgrade noch deutlich verbessert werden. Unabhängig davon scheinen einige Massenanwendungen bereits realisierbar. Ein Beispiel ist die Stromversorgung von Leuchtanzeigen auf Verpackungen, die nach dem Kauf nicht mehr benötigt werden.

Eine wesentliche Erhöhung der Wirkungsgrade von Solarzellen verspricht die Anwendung neuartiger physikalischer Konzepte in Kombination mit Dünnschichttechnologien, wie z. B. das Einbringen von sog. Quantenpunkten oder die Erzeugung mehrerer Ladungsträgerpaare pro Photon. Dies führt zu Solarzellen der dritten Generation, für deren Wirkungsgrade theoretische Grenzen von bis zu 86 % vorhergesagt werden. Ihre Marktreife ist aber eher langfristig zu erwarten.

Dr. Claudia Notthoff, Juni 2012

Höhenplattformen

Mittel- bis langfristig könnten Höhenplattformen die z. B. für Kommunikationsaufgaben konventionell eingesetzten Satelliten teilweise ersetzen.

Neue technologische Entwicklungen auf den Gebieten der Energie- und Antriebstechnik sowie der Werkstoffe lassen bereits in einigen Jahren die Einsetzbarkeit von unbemannten Höhenplattformen möglich erscheinen, die quasi stationär aus der unteren Stratosphäre in 17 bis 22 km Höhe über der Erdoberfläche wirken sollen. Ihre Hauptaufgaben werden in der ständigen Überwachung von Krisengebieten oder als Fernmelderelaisstationen gesehen. Ersetzen könnten sie dann die bisher für diese Zwecke eingesetzten Aufklärungsflugzeuge, die ja nur Momentaufnahmen liefern, und teilweise auch Satelliten, die unflexibel sind und für viele Anwendungen zu weit weg stehen.

Die beiden prinzipiellen Möglichkeiten zur Realisierung von Höhenplattformen sind kreisend fliegende Leichtbau-Flächenflugzeuge mit aerodynamischem Auftrieb oder in der Luftströmung stehende Luftschiffe (aerostatischer Auftrieb). Sie sollen sich von mehreren Monaten bis hin zu fünf Jahren auf Station aufhalten können. Der einsatzmäßige Vorteil ist, dass sie rückholbar, wartbar und durch Hardwareupgrades aktuell zu halten sind.

Die angestrebten Flughöhen von 17 bis 22 km sind ein Kompromiss aus möglichst großer Flughöhe und günstigen Umweltbedingungen. Sie ermöglichen einen großen Erfassungsbereich auf der Erde von bis zu 1000 km Durchmesser. Dabei herrscht hier oberhalb der von Wetterphänomenen und Wolkenbildung beeinflussten Troposphäre noch eine ausreichende Luftdichte für den Flug vor (ca. 6 – 8 % des Werts am Boden). Die Temperaturen liegen bei –50°C bis –60°C. Gleichzeitig sind die Windgeschwindigkeiten relativ gering. Typischerweise können dabei Werte unter 10 m/s erwartet werden.

Das sich damit insgesamt für Höhenplattformen ergebende Anforderungsprofil führt zu besonderen technologischen Herausforderungen in den Bereichen Systemtechnik, Antriebe, Energieversorgung und Werkstoffe. In vielen Gebieten profitiert die Entwicklung dabei von der heute international mit starken finanziellen Mitteln ausgestatteten Forschung zur Photovoltaik, zum Leichtbau und zur Elektromobilität.

Die zu lösenden Probleme in der Beherrschung des Gesamtsystems ergeben sich insbesondere aus den extremen Abmessungen der Fluggeräte, welche aus der geringen Luftdichte in den angestrebten Flughöhen resultieren. Diese bewirkt, dass Flächenflugzeuge eine große Flügelstreckung und damit sehr große Spannweiten (über 50 m) haben müssen, um die beabsichtigte Nutzlast – angestrebt sind 450 kg – tragen zu können.

Bei Luftschiffen ist der Auftriebsgewinn durch das Traggas hier so gering, dass von Geräten von 250 m Länge und bis zu 90 m Durchmesser auszugehen ist, um eine Nutzlast von 2 t zu tragen.

Alle angedachten Fluggeräte für Höhenplattformen bewegen sich mittels Propellern. Für deren Antrieb bieten sich zunächst Verbrennungskraftmaschinen an, die allerdings ein regelmäßiges (möglichst autonomes) Auftanken erfordern würden. Geeigneter könnten Elektroantriebe sein, gespeist entweder allein aus Solarzellen und Speicherbatterien oder aus einer Kombination aus Solarzellen, Brennstoffzellen und Elektrolyseur, der die in den Brennstoffzellen verbrauchten Rektanten wiedergewinnen und somit einen Kreislaufprozess ermöglichen kann.

Als Solarzellen für die Versorgung mit elektrischer Energie kommen flexible Dünnschichtzellen in Frage, um Gewicht zu sparen und um sie der Oberfläche und den Verformungen des Fluggeräts anzupassen. Hier laufen vielfältige Entwicklungsbemühungen, zum Teil auf Basis konventioneller Halbleitermaterialien, zum Teil aber auch mit organischen Halbleitermaterialien und Farbstoffen.

Für die Energieversorgung wird weiterhin an Brennstoffzellen mit niedrigem Leistungsgewicht gearbeitet. Für die Verwendung in Höhenplattformen mit Wasserstoff als Treibstoff sind hier vor allem Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen relevant. In der Forschung befindet sich eine Weiterentwicklung reversibler Brennstoffzellen, die sowohl als Elektrolyseur als auch als Brennstoffzelle betrieben werden können.

Im Bereich leistungsfähiger Batterien mit hoher Energiedichte kann man vor allem von den Entwicklungen aus dem Bereich der Elektromobilität profitieren. Derzeit wird noch viel Potenzial in der Verbesserung der verschiedenen Typen von Lithium-Ionen-Batterien gesehen, langfristig sollen noch deutlich höhere Speicherdichten mit Metall-Luft-Akkumulatoren erreicht werden.

Ein weiterer Bereich, in dem auf Forschungs- und Entwicklungstätigkeit für terrestrische Anwendungen zurückgegriffen werden kann, ist der Bau von effektiven, leichten Elektromotoren, wie sie z.B. auch als Radnabenmotoren für elektrisch angetriebene Kraftfahrzeuge genutzt werden könnten.

Besonderen Anforderungen muss das Hüllenmaterial der Tragballons von Luftschiffen genügen. Es muss trotz großer Reißfestigkeit extrem dünn sein (wenig mehr als 100 g/m²), um Gewicht zu sparen. Gleichzeitig muss es verklebbar, ausreichend dicht gegen das Herausdiffundieren des Traggases und beständig gegen die niedrigen Temperaturen in der Stationierungshöhe, gegen Temperaturwechsel sowie gegen die aggressive Umgebung sein (Chemie, Strahlung). Diese Forderungen lassen sich durch mehrlagige Folien unterschiedlichen Materials erfüllen. Ähnliches gilt natürlich auch für die Bespannung der Leichtbau-Flugzeuge. Solche Materialien werden bereits jetzt für Stratosphärenballons (Sonden) angewandt. Daneben gibt es auch neuere Entwicklungen (z.B. auf Basis sog. Graphen-Oxid-Schichten), die erst in einigen Jahren großtechnisch zur Verfügung stehen könnten.

Heute befinden sich bis auf eine Ausnahme alle Konzepte für Höhenplattformen, die länger als einige Tage in der genannten Höhe bleiben sollen, bestenfalls im Entwicklungsstadium. Zum Teil werden erste Flüge von Prototypen, oft im verkleinerten Maßstab in niedrigeren Flughöhen, durchgeführt. Da Höhenplattformen jedoch neue, auch für die Privatwirtschaft sehr interessante Möglichkeiten eröffnen (hier insbesondere im Kommunikationsbereich), ist in Zukunft durchaus mit einer beschleunigten Weiterentwicklung zu rechnen. Ein umfassender Einsatz solcher Systeme ist mittelfristig bis langfristig möglich. Flächenflugzeuge werden dabei schneller realisiert werden können als Höhenluftschiffe.

Wolfgang Nätzker, Juli 2012

Massive Metallische Gläser

Insgesamt kann man sagen, dass Massiven Metallischen Gläsern mit zunehmender Überwindung der Probleme bei der Herstellung und der erreichbaren Bruchfestigkeit inzwischen eine erfolgreiche Zukunft vorhergesagt werden kann.

Metallische Gläser gehören zu den amorphen Festkörpern und verfügen damit im Gegensatz zu herkömmlichen kristallinen Legierungen über keine geordnete innere Struktur. Daraus resultieren einige einzigartige Eigenschaften, wie z.B. eine enorm hohe Festigkeit. Trotzdem und obwohl sie schon länger bekannt sind, sind Metallische Gläser bisher noch nicht zu einer breiten Anwendung gekommen. Grund sind unter anderem die schwierigen Herstellungsbedingungen, die noch bis vor wenigen Jahren nur die Produktion von dünnen Bändern und Folien sowie Beschichtungen erlaubten. Erst seit jüngerer Zeit gibt es vielversprechende Entwicklungen in der Herstellung sog. Massiver Metallischer Gläser (bulk metallic glasses, BMG), deren Anwendungsmöglichkeiten bereits kurz- und mittelfristig deutlich zunehmen könnten.

Neben der hohen Festigkeit besitzen Massive Metallische Gläser eine hohe Elastizität und eine gute Korrosions- und Verschleißbeständigkeit. Dank dieser Eigenschaften werden sie unter anderem schon als Material für Sportartikel wie Golfschläger verwendet. Zusätzlich verfügen sie über gute magnetische Eigenschaften und werden z.B. in Transformatoren oder zur Abschirmung elektromagnetischer Strahlung eingesetzt. Durch eine flexible Variation von chemischer Zusammensetzung und Mikrostruktur können zudem ihre mechanischen, magnetischen und elektrischen Eigenschaften maßgeschneidert werden, weshalb sie für die Zukunft vielfältige neue Einsatzmöglichkeiten erwarten lassen.

Die Herstellung Metallischer Gläser blieb lange Zeit schwierig und verhinderte so eine breitere Anwendung. Meist findet sie durch Einfrieren metallischer Schmelzen statt, wofür zunächst enorm hohe Abkühlraten von 105 – 106 °C pro Sekunde notwendig waren.

Dadurch konnten aber nur Bänder und Folien geringer Schichtdicke hergestellt werden. Durch gezielte Veränderung der chemischen Zusammensetzung ließ sich das Herstellungsverfahren inzwischen deutlich vereinfachen. So betragen die benötigten Abkühlraten in bestimmten Legierungen mit vier oder fünf unterschiedlichen Metallkomponenten nur noch wenige °C pro Sekunde, womit es seit einigen Jahren nun auch möglich ist, Bauteilabmessungen von mehreren Zentimetern Dicke zu erreichen. Problematisch bleibt jedoch weiterhin, dass die Herstellung hohe Reinheitsgrade der Ausgangsschmelze benötigt, denn schon geringe Verunreinigungen mit Metalloxiden können zu einer unerwünschten Kristallisation führen.

Einen bedeutenden Fortschritt brachte zudem die Entwicklung metallischer Massivgläser mit sehr niedriger Glastemperatur. Diese beschreibt den Übergang vom festen, spröden Zustand des Glases zum elastischen, niedrigviskosen Zustand der Schmelze und liegt bei einigen Zusammensetzungen bereits weit unterhalb von 100°C. Dadurch können solche Werkstoffe in Analogie zu Kunststoffen kostengünstig thermoplastisch verformt werden. Im Gegensatz zu letzteren verfügen sie aber bei Raumtemperatur über die typischen Eigenschaften eines Metallischen Glases, wie große Härte und gute elektrische Leitfähigkeit. Auf diese Weise geformte metallische Massivgläser kommen bereits als Gehäusematerial hochwertiger mobiler Elektronikgeräte zum Einsatz. Aufgrund der größeren Festigkeit können die Wandstärken der Gehäuse weiter reduziert werden, was Gewichtseinsparungen und weitere Miniaturisierungen ermöglicht.

Durch die fehlende Kristallisation kommt es bei der Herstellung von Formteilen aus Metallischen Gläsern nicht zu einer Schrumpfung beim Abkühlen, was ein hochpräzises Formen des Werkstoffs erlaubt. Dadurch können Metallische Gläser als Werkstoffe für nano- oder mikroelektromechanische Bauteile (sog. NEMS oder MEMS) eingesetzt werden. Auch als Form- und Prägeworkzeuge kommen sie in Frage.

Neben der Energieversorgung, wo Massive Metallische Gläser zukünftig vermehrt zur Minimierung von Energieverlusten in Großtransformatoren eingesetzt werden könnten, ist die Medizin ein weiteres großes Anwendungsfeld mit hohem Zukunftspotenzial. Hier werden metallische Massivgläser bereits als Materialien für Skalpelle eingesetzt, da sie zu besonders hoher Schärfe geschliffen werden können und diese dank ihrer Härte und Korrosionsbeständigkeit auch über einen langen Zeitraum beibehalten. Aber auch als Knochenimplantate könnten die Gläser in Zukunft zum Einsatz kommen. Legierungen

auf Basis von Calcium, Lithium und Magnesium sind beispielsweise durch ihre chemische Zusammensetzung günstig in der Herstellung und weisen eine geringe Dichte auf, verfügen zugleich aber über eine große Härte und Elastizität, die im Bereich menschlicher Knochen liegt. Eine Einsatzmöglichkeit bestimmter Legierungen auf der Basis von Magnesium, Zink und Calcium sind biologisch abbaubare Schrauben zur Fixierung von Knochen. Der relativ rasche und vollständige Abbau der Schrauben im Körper während des Heilungsprozesses würde dabei einen zweiten Eingriff zum Entfernen der Schrauben überflüssig machen.

Eine große Einschränkung der Einsetzbarkeit Metallischer Gläser stellte bisher ihre oftmals geringe Bruchfestigkeit dar, die bei Überbeanspruchung zum plötzlichen Totalversagen eines Bauteils führen kann. Eine Lösung dafür bietet die Einbettung nanokristalliner Strukturen, entweder durch gezielte Teilkristallisation oder durch Zufügen kristalliner Metallpartikel. Da solche Legierungen zumeist seltene und teure Elemente wie Palladium und Zirkonium enthalten, beschränken sich die Anwendungsmöglichkeiten hier augenblicklich noch auf die Luft- und Raumfahrt sowie auf den militärischen Bereich. Erforscht werden in diesem Zusammenhang beispielsweise neue Leichtbauwerkstoffe, korrosionsbeständige Beschichtungen sowie Munition auf Basis Metallischer Gläser.

Insgesamt kann man sagen, dass Massiven Metallischen Gläsern mit zunehmender Überwindung der Probleme bei der Herstellung und der erreichbaren Bruchfestigkeit inzwischen eine erfolgreiche Zukunft vorhergesagt werden kann. So ist zu erwarten, dass sich diese innovative Werkstoffklasse bei sinkenden Herstellungskosten immer mehr Einsatzmöglichkeiten erschließen wird.

Dr. Ramona Langner, August 2012

Laufmaschinen

Aus heutiger Sicht kann man davon ausgehen, dass es mittel- bis langfristig leistungsfähige 2- bzw. 4-beinige Laufmaschinen geben wird, die im Haushalt, in Pflegeeinrichtungen und im Freigelände sinnvolle, den Menschen entlastende Tätigkeiten ausführen können.

Laufmaschinen oder Laufroboter sind mobile Plattformen, die anstelle von Rädern künstliche Beine zur Fortbewegung nutzen. Dabei weisen typische Varianten ein bis vier Beinpaare auf, aber auch Systeme mit ungeraden Beinzahlen, angefangen bei einbeinigen Hüpfrobotern, sind möglich. Das Interesse an Laufmaschinen ist vor allem darin begründet, dass sie eine Menschen oder Tieren vergleichbare Mobilität und Geländegängigkeit erreichen können. Sie werden seit den 1970er Jahren aktiv erforscht. Inzwischen gibt es weltweit eine ganze Reihe von Prototypen, die mittel- und langfristig auch eine großtechnische Verbreitung z.B. im Bereich der Haushaltshilfen erwarten lassen.

Die zentralen Herausforderungen bei der Entwicklung von Laufmaschinen liegen im Aufbau eines effizienten Bewegungsapparates und in der Entwicklung ausgereifter Algorithmen zur Erzeugung stabiler Gangmuster. Bezüglich weiterer Komponenten wie Energiespeicher, Kommunikationsmodul oder vieler Autonomiefunktionen entsprechen die Anforderungen weitgehend denen (unbemannter) mobiler Systeme im Allgemeinen. Je nach angestrebter Anwendung gibt es hier also ebenfalls noch mehr oder weniger Problemlösungsbedarf.

Die verschiedenen Gangarten von Laufmaschinen erfordern entweder ein vordefiniertes Bewegungsmuster der Beine oder eine Echtzeit-Regelung des gesamten Bewegungsapparates. Vordefinierte Bewegungsmuster kommen häufig bei Robotern mit sechs oder mehr Beinen zum Einsatz, insbesondere auf ebenen Untergründen. In diesem Fall erzeugt ein sog. Central Pattern Generator ein sich stetig wiederholendes vorgegebenes Bewegungsschema der Beine. Da ein sechsbeiniger Laufroboter auch dann noch statisch stabil ist,

wenn die Hälfte seiner Beine in einem bestimmten Schema angehoben wird, kann hier auf eine Stabilitätskontrolle im Bewegungsablauf verzichtet werden.

Um stabile Laufbewegungen auf verschiedenen Untergründen zu ermöglichen, müssen Laufmaschinen über umfangreiche propriozeptive Sensorik verfügen, welche permanent den Eigenzustand des Systems überwacht. Hierzu dienen u.a. Trägheitssensoren, Winkelgeber an den Stellmotoren und Drucksensoren an den Füßen. Informationen über die Umgebung liefert die exterozeptive Sensorik, wozu optische Sensoren und Sensoren zur Ermittlung der Position (z.B. GPS-Empfänger) gehören können. Die Verarbeitung dieser Informationen und die Ableitung von Steuersignalen zur Aufrechterhaltung eines stabilen Gangs sind komplex, vor allem bei zwei- und vierbeinigen Systemen.

Von den verschiedenen möglichen Bewegungsarten beherrschen die meisten zweibeinigen Laufmaschinen entweder statisch stabiles Gehen oder dynamisches Gehen. Bei ersterem wird der Schwerpunkt der Plattform immer nur dann verlagert, wenn alle Füße Stand haben. Auf diese Weise kann die Bewegung jederzeit an beliebiger Position unterbrochen werden, ohne dass das System aus dem Gleichgewicht gerät. Der Bewegungsablauf wirkt allerdings unnatürlich ungelenk und ist sehr langsam. Beim dynamischen Gehen wird der Körperschwerpunkt gleichzeitig zur Bewegung des Schwungbeins verlagert, wodurch die Bewegung flüssiger wird. Wird eine Beinbewegung abgebrochen, kippt das System aber. Beim dynamischen Laufen existiert zusätzlich zum dynamischen Gehen eine kurze Flugphase, in der die Plattform keinen Kontakt mehr zum Boden besitzt.

Kontroll-Routinen zur Stabilisierung eines dynamischen zweibeinigen Gangs basieren seit den 1980er Jahren hauptsächlich auf der Technik des sog. Zero Moment Point (ZMP). Der Laufroboter Asimo von Honda setzt z.B. ZMP zur Stabilitätsregelung ein und beherrscht damit als einer von weltweit nur fünf zweibeinigen Robotern auch das dynamische Laufen. Da ZMP auf der exakten Vorausberechnung und anschließenden Echtzeit-Kontrolle aller Gelenkstellungen des Bewegungsapparates basiert, ist man auf präzise Sensordaten angewiesen. Aus diesem Grund werden für Laufmaschinen allgemein vorwiegend Elektromotoren als Aktuatoren verwendet, deren Stellung einfach erfasst werden kann. Nachteilig ist aber, dass jede Abweichung der vorausberechneten Fußposition von der späteren wirklichen Position durch aktives Nachsteuern exakt ausgeglichen werden muss. Das limitiert die Leistungsfähigkeit ZMP-basierter Verfahren vor allem in unebenem Gelände. Hydraulische und pneumatische Aktuatoren besitzen demgegenüber eine gewisse inhärente Elastizität,

wodurch die Bewegung fehlertoleranter wird. Aus diesem Grund werden zunehmend auch biomimetische Aktuatoren wie fluidische oder andere Formen künstlicher Muskeln eingesetzt.

Laufmaschinen kombinieren eine vergleichsweise hohe Tragfähigkeit mit einer hohen Geländegängigkeit. Im Vergleich zu radbasierten Plattformen können sie deutlich höhere Hindernisse überwinden. Auch sind Laufmaschinen in der Lage, nahezu beliebige Positionen und Ausrichtungen innerhalb eines Raumes einzunehmen, anders als Radfahrzeuge, die sich nur entlang ebener Bahnkurven fortbewegen können. Radfahrzeuge besitzen demgegenüber den Vorteil, auf befestigten Böden deutlich energieeffizienter zu sein. Auf unbefestigten Böden sind allerdings Laufmaschinen energetisch im Vorteil. Der Transport mittels schwerer Lasten in unstrukturierterem Gelände ist daher eine ihrer ersten zu erwartenden Einsatzformen. Auch das amerikanische vierbeinige, etwa eselgroße System LS3, bekannt geworden in seiner Prototypenversion BigDog, befindet sich derzeit in Entwicklung als Lastenträger. Wie alle anderen bekannten ähnlichen Systeme ist es bisher jedoch noch nicht in der Lage, im Freigelände auch dynamisch zu laufen.

Aus heutiger Sicht kann man davon ausgehen, dass es mittel- bis langfristig leistungsfähige 2- bzw. 4-beinige Laufmaschinen geben wird, die im Haushalt, in Pflegeeinrichtungen und im Freigelände sinnvolle, den Menschen entlastende Tätigkeiten ausführen können. Auch für verschiedene militärische Anwendungen werden Laufmaschinen in unterschiedlichen Ausprägungen in Zukunft einsetzbar sein. Denkbar sind dabei zunächst der Lastentransport sowie Rettungseinsätze in unwegsamem Gelände, die Bewachung von Feldlagern oder die Erkundung von Gebäuden und sonstigen Bauwerken.

Dr. Guido Huppertz, September 2012

Antimikrobielle Oberflächen

Nicht zuletzt aufgrund der Wandlungsfähigkeit der Mikroorganismen ist zukünftig zu erwarten, dass sich multifunktionale antimikrobielle Oberflächen durchsetzen werden.

Antimikrobielle Oberflächen können das Populationswachstum von Mikroorganismen hemmen, einer mikrobiellen Besiedlung von vornherein entgegenwirken und /oder Mikroorganismen abtöten. Sie werden bereits in vielen hygienerelevanten Lebensbereichen eingesetzt. In jüngerer Zeit wurden die Bemühungen zur Entwicklung neuer Varianten stetig verstärkt. Dies zeigt sich nicht zuletzt durch eine in den letzten zehn Jahren wesentlich gestiegene Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen zum Thema. Im Fokus steht hier die Verbesserung sowohl der Wirksamkeit als auch der Umweltfreundlichkeit im Gebrauch und bei der Entsorgung. Wesentliche Impulse hat die Entwicklung dabei auch von der inzwischen möglich gewordenen gezielten Mikrostrukturierung von Oberflächen zur Verhinderung der Anhaftung von Mikroorganismen erhalten.

Anhaftende Mikroorganismen können auf Oberflächen sog. Biofilme bilden. Dabei handelt es sich um Lebensgemeinschaften, deren Widerstandsfähigkeit gegenüber widrigen Umgebungsbedingungen höher ist als die freier Zellen. Mögliche Folgen sind Infektionen durch pathogene Mikroorganismen und eine zunehmende Gefahr durch antibiotikaresistente Bakterienstämme. Die Entfernung von bereits gebildeten Biofilmen auf Oberflächen ist oft schwierig, kostenintensiv und häufig unmöglich. Daraus resultieren die vielfältigen Bemühungen, solche Biofilme erst gar nicht entstehen zu lassen.

Antimikrobielle Oberflächen finden heutzutage vielerlei Anwendung in Krankenhäusern, Verkehrsmitteln, Klimaanlagen, sanitären Einrichtungen, der Wasserwirtschaft, der Lebensmittelindustrie, der Bekleidung, im Haushalt und für Wundaflagen. Naheliegende wehrtechnische Einsatzmöglichkeiten liegen auf den Gebieten B-Schutz und Dekonta-

mination. Zu beachten ist dabei, dass die verwendeten antimikrobiellen Substanzen grundsätzlich für Mensch und Umwelt toxikologisch unbedenklich sein müssen. In der Praxis ist diese Forderung heute längst nicht bei allen eingesetzten Varianten eindeutig erfüllt.

Bei manchen Anwendungen kann die Bildung von Biofilmen auch zu Korrosion und Funktionsstörungen führen. Ein klassisches Beispiel ist die Anhaftung von marin Organismen an Schiffsrümpfen, die durch Antifoulinganstriche verhindert werden kann. Hier wurde früher das inzwischen verbotene, giftige Biozid Tributylzinn (TBT) eingesetzt. Die Suche nach neuen Möglichkeiten besitzt daher auch auf diesem Gebiet eine hohe aktuelle Bedeutung.

Generell wird zwischen aktiven und passiven antimikrobiellen Oberflächen unterschieden. Bei den passiven Varianten wird die mikrobielle Besiedlung allein durch die Oberflächenstruktur verhindert. So können mikrostrukturierte Beschichtungen durch ihre gezielt einstellbare Rauigkeit die Haftung von Bakterien verhindern. Neueste Entwicklungen beschäftigen sich mit besonders „rutschigen“ Oberflächen, die Flüssigkeiten, Insekten und Bakterien abweisen können. Sie bestehen aus einer porösen Mikrostruktur und einem haftenden Schmiermittel, das die Hohlräume vollständig auffüllt. Diese Oberfläche besitzt zusätzlich eine selbstheilende Funktion, d. h. nach Schaden erhält sie schnell wieder ihre Funktion zurück.

Aktive Verfahren beruhen auf der Freisetzung von Bioziden, wie z.B. Metallen, Chlor und Antibiotika, die oft zu Umweltverschmutzungen und/oder Cytotoxizität, Hypersensibilität (Allergien) und Entzündungsreaktionen beim Menschen führen. Edelmetalle wie Silber oder Kupfer werden häufig als Nanopartikel eingesetzt und wirken durch kontinuierliche Freisetzung von Metallionen. Silber ist zwar nicht giftig für den Menschen, aber Nanopartikel, die im Körper als Ablagerungen verbleiben, stehen in der Diskussion krebserregend zu sein.

Eine andere Möglichkeit, eine antimikrobielle Wirkung zu erzeugen, ist die Bestrahlung von in die Beschichtung eingebrachtem Titandioxid mit UV-Licht. Dabei entstehen schließlich hochreaktive giftige Sauerstoffverbindungen, die Bakterien abtöten. Diese Methode findet allerdings nur eingeschränkte Anwendung, weil auch andere organische Stoffe z. B. im Substrat selbst zerstört werden und UV-Strahlung benötigt wird. Deshalb wird die Dotierung

mit Metallen, Photosensibilisatoren oder lichtaktiven Agenzien verfolgt, um eine antimikrobielle Wirkung im sichtbaren Licht zu erzielen.

Neuerdings werden auch Kohlenstoff-Nanoröhren (CNTs) untersucht, die ebenfalls eine antimikrobielle Wirkung haben. Sie können mit Polymeren, Metallen, Nanopartikeln, Biomolekülen und Metalloxiden kombiniert werden und zeigen eine verbesserte Wirkung durch die vergrößerte Oberfläche. CNTs stehen aber auch im Verdacht krebserregend zu sein.

Viele Forschungsansätze beruhen auf in der Natur vorkommenden antimikrobiellen Verbindungen und Enzymen wie z.B. Lysozym. Enzyme können die Freisetzung von Bioziden hervorrufen oder selbst antibakteriell wirken. Künstlich erzeugte antimikrobielle Peptide und Polymere imitieren die Struktur und Funktionalität dieser Verbindungen und besitzen unterschiedliche Oberflächeneigenschaften, deren Wechselwirkungen mit der Oberfläche mikrobieller Zellen gezielt optimiert werden können. Von besonderem Interesse ist auch die Immobilisierung solcher Enzyme, Peptide oder Polymere zur Erzeugung antimikrobieller Oberflächen, die ihre aktiven Komponenten nicht freisetzen und damit die Umwelt nicht belasten. Dadurch verlieren sie jedoch manchmal ihre Wirksamkeit und sind oft nicht stabil.

Eine verstärkte Wirksamkeit kann durch multifunktionale Oberflächen erfolgen, die auf der Kombination verschiedener synergetisch wirkender antimikrobieller Beschichtungen basieren. Dabei können bakterienabweisende Oberflächen mit kontaktaktiven Oberflächen kombiniert und/oder wahlweise zusätzlich Biozide freigesetzt werden.

Die Mechanismen der antimikrobiellen Wirkung von Oberflächen sind oft noch unklar. Hier besteht noch viel Forschungsbedarf, um neue kostengünstige, umweltfreundliche und nicht toxische antimikrobielle Beschichtungen zu entwickeln und/oder durch Optimierung die Reaktivität, Stabilität und langfristige Wirksamkeit zu verbessern. Nicht zuletzt aufgrund der Wandlungsfähigkeit der Mikroorganismen ist zukünftig zu erwarten, dass sich multifunktionale antimikrobielle Oberflächen durchsetzen werden.

Dr. Stefanie Labs, Oktober 2012

Exascale-Computer

Als nächster großer Meilenstein bei der Weiterentwicklung von Supercomputern gilt die Realisierung von so genannten Exascale-Computern. Hierunter versteht man Systeme mit Rechenleistungen im Bereich von 10^{18} Flops (Exaflops).

Viele Fortschritte in Wissenschaft und Technik basieren mittlerweile auf dem Einsatz von sehr leistungsfähigen Computern. Die augenblicklich schnellsten Computer bezeichnet man häufig auch als Supercomputer. Ihre Rechenleistung wird typischerweise in Form von elementaren Rechenoperationen pro Sekunde (eng. Floating-Point Operations per Second = Flops) angegeben. Die schnellsten Supercomputer erreichen gegenwärtig eine Rechenleistung in der Größenordnung von 10^{16} Flops (10 Petaflops). Damit sind sie ungefähr hunderttausendmal schneller als der Mikroprozessor eines handelsüblichen PCs. Als nächster großer Meilenstein bei der Weiterentwicklung von Supercomputern gilt die Realisierung von so genannten Exascale-Computern. Hierunter versteht man Systeme mit Rechenleistungen im Bereich von 10^{18} Flops (Exaflops).

Exascale-Computer werden ebenso wie aktuelle Supercomputer auf einer parallelen Rechnerarchitektur basieren. Bei solchen Parallelrechnern wird eine Berechnung in verschiedene Teilabschnitte aufgeteilt, so dass diese dann parallel zueinander ausgeführt werden können. Auch einzelne Mikroprozessoren stellen mittlerweile eine Form von paralleler Rechnerarchitektur dar, da sie mehrere Komponenten zur Befehlsverarbeitung, so genannte Prozessorkerne, enthalten. Gegenwärtige Mikroprozessoren für PC verfügen typischerweise über zwei bis acht Prozessorkerne. Dagegen nutzen die schnellsten Supercomputer zurzeit ca. eine Million Prozessorkerne. Exascale-Computer werden möglicherweise bis zu einer Milliarde Prozessorkerne enthalten müssen, um die angestrebte Rechenleistung zu erreichen.

Generell sind rechenintensive wissenschaftliche und technische Simulationen eine Hauptanwendung von Supercomputern. Zukünftige Exascale-Computer werden in diesem

Zusammenhang sowohl Simulationen von komplexeren Prozessen und Systemen als auch genauere und detailliertere Simulationen erlauben. Ein wichtiges Einsatzgebiet wird unter anderem die Simulation des Systems Erde bilden, z.B. im Hinblick auf Wettervorhersagen oder Klimaveränderungen. Exascale-Systeme könnten außerdem genutzt werden, um Werkstoffe bis in den Nanometerbereich für spezifische Anwendungen maßzuschneidern. Ein weiteres Einsatzfeld findet sich im Bereich der Energieerzeugung bzw. -umwandlung. Hier könnten z.B. Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der kontrollierten Kernfusion oder zur Optimierung von Verbrennungsprozessen in Motoren profitieren.

In der Medizin können Exascale-Computer für die Entwicklung neuer Medikamente genutzt werden. Darüber hinaus erlauben sie in der Biologie z.B. deutlich realistischere Simulationen des menschlichen Gehirns. Von den hierdurch gewonnenen Einsichten in die neurobiologische Architektur des Gehirns erhofft man sich wiederum neuartige Ansätze für Computerarchitekturen. Weitere Einsatzgebiete finden sich z.B. bei der Modellierung von Märkten in der Finanzwelt oder in der Teilchen- und Astrophysik, z.B. hinsichtlich eines besseren Verständnisses von Supernova-Explosionen. Im militärischen Bereich können Exascale-Computer unter anderem genutzt werden, um zu untersuchen, in welcher Form die Funktionsfähigkeit von Kernwaffen durch deren Lagerung beeinflusst wird. Derartige Simulationen können trotz Kernwaffenteststopp die Einsatzbereitschaft dieser Waffen gewährleisten.

Die größte Herausforderung bei der Realisierung von Exascale-Computern besteht in dem zu erwartenden Stromverbrauch dieser Systeme. Die schnellsten Supercomputer verbrauchen aktuell ca. 10 Megawatt an elektrischer Leistung. Dies liegt bereits in der Größenordnung des Bedarfs von zehntausend Haushalten. Würde man jedoch ein Exascale-System einfach dadurch verwirklichen, dass man ein aktuelles Supercomputerkonzept um entsprechend mehr Prozessoren erweitert, so würde der Leistungsbedarf in der Größenordnung von einem Gigawatt liegen. Dies entspricht ungefähr der elektrischen Leistung eines Kernkraftwerks. Diese Vorgehensweise ist demzufolge nicht sinnvoll umsetzbar. Daher sind neue, energieeffizientere technische Ansätze für Exascale-Computer erforderlich. Als Ziel wird dabei häufig ein Leistungsbedarf von maximal 20 Megawatt genannt.

Ein großer Teil des Energieverbrauchs aktueller Supercomputer entfällt auf die Übertragung von Daten innerhalb des Systems. Ein Ansatz zur zukünftigen Reduktion dieses Verbrauchs

besteht in der Nutzung von dreidimensionalen Mikrochips. Solche Mikrochips erlauben z.B. die Integration von mehreren Speicherchips, indem diese übereinander angeordnet werden. Hierdurch lassen sich die elektrischen Verbindungen zwischen den so integrierten Mikrochips entsprechend verkürzen, woraus unter anderem ein niedrigerer Stromverbrauch resultiert.

Die Programmierung einer Rechnerarchitektur mit bis zu einer Milliarde Prozessorkernen stellt ebenfalls eine große Herausforderung dar. Damit dieser hohe Grad an Parallelverarbeitung überhaupt genutzt werden kann, muss die jeweilige Software nämlich so in hinreichend viele voneinander unabhängige Programmabläufe unterteilt werden, dass diese Programmabläufe ohne Beeinflussung des gewünschten Endresultats parallel zueinander ausgeführt werden können. Hierfür müssen unter anderem die einzelnen Programmabläufe zeitlich aufeinander abgestimmt und deren Zugriffe auf gemeinsam genutzte Daten geeignet koordiniert werden. Manche Anwendungen lassen sich dabei einfacher in Form von parallelen Programmabläufen strukturieren als andere. Derzeit werden verschiedene Methoden untersucht, um den Programmierer bei dieser schwierigen Aufgabe geeignet zu unterstützen. Hierzu zählen z.B. neue Arten von Programmiersprachen.

Darüber hinaus stellt die Zuverlässigkeit eines Exascale-Computers eine große Herausforderung dar, da die Häufigkeit von Systemfehlern im Vergleich zu heutigen Supercomputern aufgrund der wesentlich größeren Komplexität voraussichtlich deutlich zunehmen wird. Die eingesetzte Software muss daher in der Lage sein, mit häufig auftretenden Fehlern in einer geeigneten Weise umzugehen.

Derzeit existieren in verschiedenen Ländern, wie z.B. den USA, China und Europa, Bestrebungen, Exascale-Computer innerhalb der nächsten zehn Jahre zu verwirklichen.

Dr. Klaus Ruhlig, November 2012

Alternative Antriebe Luft

Zusammen mit der internationalen Umweltgesetzgebung zur Bekämpfung des Klimawandels wird die zunehmende Verteuerung fossiler Energieträger in Zukunft auch im Flugzeugbau zu nachhaltigen Veränderungen führen. Die in diesem Zusammenhang absehbaren technischen Maßnahmen reichen bis hin zur Realisierung elektrischer Antriebe.

Zusammen mit der internationalen Umweltgesetzgebung zur Bekämpfung des Klimawandels wird die zunehmende Verteuerung fossiler Energieträger in Zukunft auch im Flugzeugbau zu nachhaltigen Veränderungen führen. Die in diesem Zusammenhang absehbaren technischen Maßnahmen reichen von der Nutzbarmachung alternativer Kraftstoffe über die Erhöhung der Wirkungsgrade konventioneller Antriebe bis hin zur Realisierung elektrischer Antriebe auch im Bereich der Luftfahrt. Zusätzliche Verbesserungen sollen z. B. durch neue Rumpf-/Flügelkonzepte und innovative Luftverkehrsmanagementsysteme erreicht werden.

Bei der Nutzbarmachung **alternativer Kraftstoffe** ist die Luftfahrtindustrie bereits relativ weit fortgeschritten. Man setzt hier auf synthetisches Kerosin, das als sog. Drop-in-Kraftstoff dem fossilen Kerosin beigemischt werden kann und keine signifikanten Änderungen an Flugzeug, Triebwerk oder Infrastruktur verlangt. Synthetisches Kerosin kann aus Kohle oder Erdgas hergestellt werden (Coal-to-Liquid, CtL; Gas-to-Liquid, GtL), hat dann aber keine oder nur geringe klimaschonenden Effekte. Diese wären jedoch gegeben bei der Herstellung aus allgemeiner Biomasse (Biomass-to-Liquid, BtL) oder speziell aus hydrierten Pflanzenölen (Hydrogenated Vegetable Oil, HVO). Sowohl für HVO als auch für BtL gibt es offizielle internationale Zulassungen als Luftfahrtkraftstoffe. Sie dürfen konventionellem Kerosin im Verhältnis von maximal 50% beigemischt werden.

Das wesentliche Problem mit dem Einsatz der Biokraftstoffe in der Luftfahrt ist die heute noch längst nicht ausreichende und auch langfristig ungeklärte Verfügbarkeit. Als mögliche Alternativen werden durch Kühlung verflüssigtes Erdgas (Liquified Natural Gas, LNG) oder Wasserstoff (Liquified Hydrogen, LH₂) untersucht. Beides sind jedoch keine Drop-in-Lösungen.

Ihr Einsatz würde zu einem mehr oder weniger massiven Änderungsbedarf am Flugzeug (z.B. größere Tanks) oder bei der Versorgungsinfrastruktur führen.

Parallel zur Nutzbarmachung alternativer Kraftstoffe gibt es intensive Bemühungen um die Erhöhung der Vortriebswirkungsgrade konventioneller Antriebe. Diese setzen auf Weiterentwicklungen der etablierten Mantelstromtriebwerke (Turbofan), bei denen der innere Kernstrom, der am eigentlichen thermodynamischen Kreisprozess der Gasturbine teilnimmt, von einem durch ein Gebläse (Fan) angetriebenen äußeren Nebenstrom „ummantelt“ wird. Charakteristisch für den Wirkungsgrad eines Turbofans ist das Nebenstromverhältnis, also das Verhältnis der Luftmenge des Nebenstroms zur Luftmenge, die durch die Gasturbine strömt. Die Erhöhung dieser Nebenstromverhältnisse ist das Ziel der Entwicklung. Allerdings sind die diesbezüglichen Bemühungen vor allem für Passagier- und Transportflugzeuge geeignet. Verbesserungen bei Kampfflugzeugen könnten sich durch die Realisierung sog. **Variable Cycle Engines** ergeben, die mittels variabler Komponenten und verstellbarer Bauteile gleichzeitig für den Reiseflug und für Extremsituationen auslegbar wären.

Der erste Schritt zur Erhöhung der Nebenstromverhältnisse sind die sog. **Getriebefans**, die inzwischen kurz vor ihrer Markteinführung stehen und z.B. von Airbus unter dem Namen New Engine Option (NEO) bereits vermarktet werden. Bei diesen sorgt ein Unter-
setzungsgtriebe dafür, dass die Drehzahl des Fans gesenkt und die der Turbine erhöht werden kann, damit beide Komponenten jeweils in ihrem optimalen Drehzahlbereich arbeiten. Getriebefans versprechen Treibstoffeinsparungen von ca. 15 % (im Vergleich zum „Jahr-2000-Triebwerk“), und das bei nicht wesentlich geänderten Triebwerksabmessungen.

Frühestens im Jahr 2020 könnten sog. **Open-Rotor-Triebwerke** fertig entwickelt sein, die mit zwei gegenläufigen Fans arbeiten, welche nicht mehr ummantelt sein sollen (und damit von außen frei sichtbar). Damit sind Treibstoffeinsparungen von ca. 20 % möglich (im Vergleich zum Jahr-2000-Triebwerk). Im Gegensatz zu den langsameren Turboprop-Antrieben, bei denen der Vortrieb beinahe ausschließlich durch von Gasturbinen angetriebene Propeller erzeugt wird (z.B. Airbus A400M), trägt bei Open-Rotor-Konzepten der Schub der eigentlichen Gasturbine immer noch signifikant zum Vortrieb bei.

Open-Rotor-Triebwerke erzeugen allerdings erheblich mehr Lärm als Getriebefans. Zur Vermeidung dieses Nachteils bemüht man sich um ummantelte Versionen dieser

Triebwerke. Diese könnten ab dem Jahr 2025 serienreif sein. Ein deutsches Entwicklungsprogramm in diesem Zusammenhang ist das nach inzwischen erfolgten grundlegenden technologischen Fortschritten wieder neu aufgelegte CRISP-Projekt (**Counter-Rotating Integrated Shrouded Propfan**). Bei derartigen Triebwerken drehen sich zwei Fans gegenläufig unter einer Verkleidung (Mantelrohr), und zwar vorn oder hinten am Triebwerk.

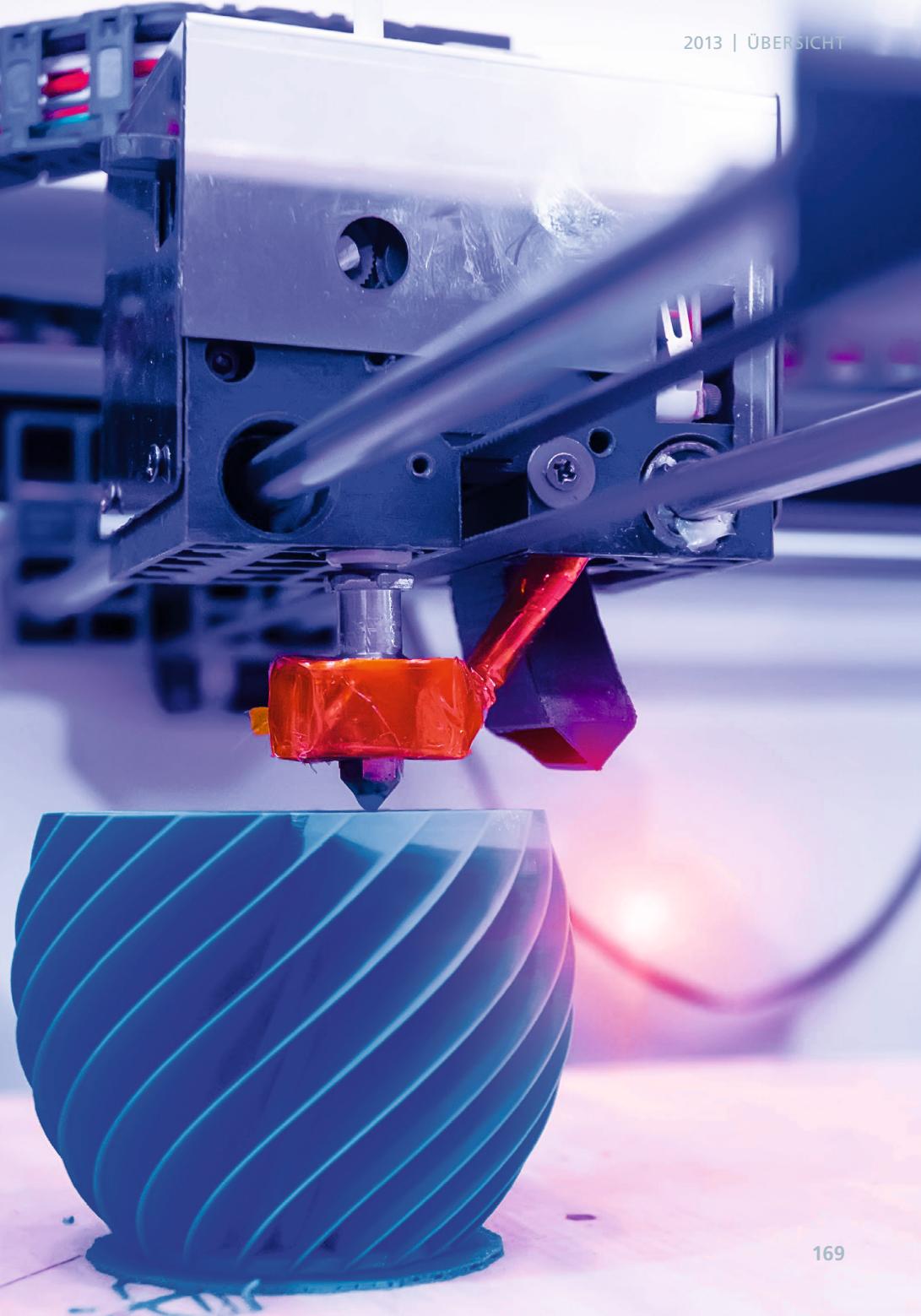
Parallel zur Erhöhung der Vortriebswirkungsgrade bemüht man sich um die Steigerung der thermodynamischen Wirkungsgrade der Gasturbinen selbst. Hier sollen Eingriffe in das Temperaturmanagement der Aggregate zu Verbesserungen führen. In einem ersten Schritt denkt man an die Integration eines Zwischenkühlers (Intercooled Core) und schließlich eines zusätzlichen Abgaswärmetauschers (**Intercooled Recuperated Core**). Ein Getriebefan-Triebwerk mit Zwischenkühlung und Abgaswärmetauscher könnte nach dem Jahr 2035 flugbereit sein und 30 % weniger Treibstoff verbrauchen als ein Jahr-2000-Triebwerk. Auch Hubschrauber-Triebwerke sollten sich in Zukunft durch Zwischenkühlung und Abgaswärmetauscher verbessern lassen.

Sehr langfristig ist auch im Luftverkehr mit **elektrischen Antrieben** zu rechnen. Erste bemannte Prototypen, die ihre elektrische Energie aus Batterie und Brennstoffzelle bezogen, sind bereits geflogen. Auch im kommerziellen Regionalverkehr sind rein elektrische Antriebe auf Batteriebasis denkbar, wenn die gewichtsbezogene Speicherdichte der Batterien noch um einen Faktor von mindestens fünf bis zehn vergrößert werden könnte. Das wird auch in der Fachwelt nicht ausgeschlossen und würde einen nachhaltigen Luftverkehr ermöglichen, wenn die Batterien z. B. mit Solarstrom gespeist wären. Im Fall hoher Leistungsanforderungen wie insbesondere bei Kampfflugzeugen wird man jedoch immer auf die Verbrennung flüssiger chemischer Energieträger angewiesen sein.

Jürgen Kohlhoff, Dezember 2012

Beiträge aus 2013

OTFT-Sensoren	170
Ultraleichte Werkstoffe	173
Computational Photography	176
Künstliche Exoskelette	179
Silent Speech Interfaces	182
Quantenkryptografie	185
3D-Drucker	188
Alternative Antriebe See	191
Physically Unclonable Functions	194
Intelligente Textilien	197
Mikrofluidtechnologie	200



OTFT-Sensoren

OTFT-Sensoren sind Organische Dünnschicht-Transistoren, mit denen man selektiv und hochsensitiv flüssige und gasförmige Analyten detektieren kann. Heute befinden sie sich noch weitgehend im Forschungs- bzw. Erprobungsstadium.

OTFT-Sensoren sind gewissermaßen zweckentfremdete Organische Dünnschicht-Transistoren (Organic Thin-film Transistor, OTFT), deren Funktion nun nicht mehr (nur) das Schalten und Verstärken von elektrischen Signalen ist, sondern auch die selektive und hochsensitive Detektion von flüssigen und gasförmigen Analyten. Die besonderen Vorteile von OTFT-Sensoren bestehen darin, dass sie als organische Halbleiter auf ebenfalls organischen, flexiblen und günstigen Trägermaterialien aufgebracht werden können. Dies ist nicht nur praktisch, um solche Sensoren z.B. in Kleidung zu integrieren, sondern auch sehr kostengünstig, so dass sogar ein Einmal-Gebrauch möglich wird. Heute befinden sich OTFT-Sensoren noch weitgehend im Forschungs- bzw. Erprobungsstadium.

OTFT nutzen einen dünnen Film aus organischem Halbleitermaterial als aktive Schicht. Daran liegen zwei Elektroden direkt an, Source und Drain (engl.) genannt, mit deren Hilfe eine elektrische Spannung angelegt wird. Der Source-Drain-Strom, der durch den organischen Halbleiter fließt, kann gemessen werden. Eine dritte Elektrode, das sog. Gate (engl.), ermöglicht die gezielte Veränderung und Justierung des Source-Drain-Stroms. So kann der Halbleiter mittels einer über die Gate-Elektrode angelegten Spannung leitend (bzw. nicht leitend) und somit der Transistor „eingeschaltet“ (bzw. „ausgeschaltet“) werden.

Die Nutzbarmachung der OTFT als hochempfindliche Sensoren basiert auf der Tatsache, dass auch verschiedene mit der aktiven Schicht in Kontakt kommende Substanzen einen Einfluss auf den Source-Drain-Strom haben können. Die dabei auftretenden Effekte ähneln dem sog. Dotieren. Dabei sorgen Fremdatome, die in den Halbleiter eingebracht werden oder sich an dessen Oberfläche befinden, dafür, dass die Anzahl der Ladungsträger im

Halbleiter ab- oder zunimmt. Bereits äußerst geringe Mengen reichen aus, um so die Leitfähigkeit und den Source-Drain-Strom um mehrere Größenordnungen zu verändern. Dieser Effekt ist zudem hochgradig reversibel.

Wie alle organischen Halbleiter können OTFT-Sensoren über herkömmliche, in der Mikrosystemtechnik zumeist bereits etablierte Methoden auf unterschiedlichste, auch flexible Substrate aufgebracht werden. Ein großer Vorteil dabei ist die Möglichkeit der Verwendung von Niedrigtemperaturprozessen, wie z. B. Printtechnologien, die das Herstellungsverfahren nicht nur vereinfachen, sondern potenziell auch kostengünstiger sind als die Herstellung von anorganischen Halbleiterstrukturen. Bei der Synthese des Halbleiters können außerdem Morphologie und hier insbesondere die Oberflächenstruktur sowie die chemische Zusammensetzung verändert und sehr fein auf die Verwendung als Sensor abgestimmt werden.

Trotz der geringen Kosten haben OTFT-Sensoren vom Prinzip her eine hohe Sensitivität, also Empfindlichkeit, und eine sehr hohe Selektivität, also ein hohes Potenzial zur Unterscheidung verschiedener Substanzen. Ihre ursprünglichen Funktionen als Transistor sind dabei ein essentieller Vorteil, da sie das Messsignal automatisch auch verstärken.

Das Einbringen bestimmter organischer Substanzen, wie z. B. von Enzymen oder DNA, in den Halbleiter führt zur gezielten Detektierbarkeit biologisch relevanter Substanzen. Durch die vergleichsweise einfache, kostengünstige Herstellung im Mikrometerbereich sind OTFT-Sensoren zudem besonders geeignet für die Herstellung von Sensorarrays. Diese bestehen aus einer Vielzahl von nebeneinander liegenden Sensoreinheiten, die wiederum aus unterschiedlichen organischen Halbleitermaterialien bestehen können. Mittels eines solchen sensorischen OTFT-Arrays könnten sich sog. Fingerabdrücke von Analyten und mittels nachgeschalteter Datenanalyse somit mehrere Substanzen selektiv, hochsensitiv und gleichzeitig erkennen lassen.

Aufgrund der genannten Eigenschaften und Vorteile können OTFT-Sensoren zukünftig für viele Sensoranwendungen im zivilen wie auch im wehrtechnischen Bereich von großem Interesse sein. Ein Schwerpunkt liegt dabei in der Verwendung als Bio- und Chemosensor, zumal OTFT-Sensoren sowohl zur Detektion in Flüssigkeiten als auch in Gasen einsetzbar sind. Auch gibt es in diesem Bereich kaum konkurrierende Technologien, die solche Leistungen versprechen. Aber auch physikalische OTFT-Sensoren, wie z. B. mechanische Sensoren, sind denkbar. Somit liegen mögliche Anwendungsgebiete vor allem in den Bereichen medizini-

sche Diagnostik, Medikamentenverabreichung, Lebensmittelsicherheit, Photosensorik und Umweltmonitoring. Als Array könnten sie auch als sog. elektronische Nase verwendbar sein.

Seit ca. zehn Jahren haben sich die Bemühungen um OTFT-Sensoren in Forschung und Entwicklung wesentlich verstärkt. In den Bereichen Herstellungsverfahren und Sensitivität ist man bereits relativ weit fortgeschritten. Aber gerade bezüglich der Selektivität befindet sich die Technologie noch vorwiegend im Status der Grundlagenforschung.

Zu diversen Anwendungen wurden bereits OTFT-Sensoren angedacht und demonstriert. Momentan liegt der Fokus häufig noch auf einfachen Anwendungen, wie z. B. Luftfeuchtigkeits-, pH- und Glukosesensoren. Die selektive Detektion einzelner Analyte, wie z. B. von Antikörpern, DNA-Sequenzen oder anderen organischen Verbindungen, wie z. B. Trinitrotoluol (TNT), wird erforscht. Dabei profitiert diese reifende Technologie von dem stetig wachsenden allgemeinen Trend hin zur Organischen Elektronik. Zunehmend werden in der Mikrosystemtechnik klassische, anorganische Materialien, und vor allem Halbleiter, durch organische ersetzt. Fortgeschrittene Beispiele hierfür sind neben den OTFT die organische Photovoltaik und organische lichtemittierende Dioden (OLED).

Aufgrund der rasanten Fortschritte bei den Fertigungstechniken in der Mikrosystemtechnik lassen sich erste, einfache OTFT-Sensoren bereits sehr gut im Mikrometermaßstab und zukünftig auch im Nanometermaßstab fertigen. Dabei bedingt eine Verkleinerung des aktiven Sensorbereichs nicht automatisch eine Verschlechterung der Sensitivität wie bei anderen Sensortechnologien. Im Gegenteil, sogar eine Steigerung der sensorischen Leistung durch Miniaturisierung ist möglich. Dies ist ein weiterer Vorteil, der OTFT-Sensoren zum Durchbruch verhelfen könnte.

Dr. Martin Müller, Januar 2013

Ultraleichte Werkstoffe

Erst kürzlich konnte im Labor mit dem sog. Aerographit das gegenwärtig leichteste für den technischen Einsatz geeignete Material der Welt hergestellt werden.

Werkstoffe werden als ultraleicht bezeichnet, wenn sie eine Dichte von unter 10 mg/cm^3 aufweisen. Unabhängig vom jeweiligen Grundgerüst ist das in der Praxis nur möglich, wenn sie zu über 90 % aus Hohlräumen bzw. Poren bestehen. Solche Materialien werden derzeit intensiv untersucht. Je nach Typ gibt es bereits erste Anwendungen. Erst kürzlich konnte im Labor mit dem sog. Aerographit das gegenwärtig leichteste für den technischen Einsatz geeignete Material der Welt hergestellt werden.

Aufgrund ihrer besonderen Netzwerkstruktur zeigen ultraleichte Materialien eine Reihe von herausragenden Eigenschaften, die ihre massiven Pendants nicht aufweisen. Besonders interessante Anwendungsmöglichkeiten liegen in den Bereichen Wärmedämmung und Sensorik.

Prinzipiell geeignet sind sie auch als Batterieelektroden, Trägermaterialien für Katalysatoren sowie Dämpfer von Vibrationen, Stößen und Schallwellen. Allerdings sind sie meist weniger stabil, was an ihrer hohen Porosität liegt. Nachteile haben sie auch bei den physikalischen Größen Leitfähigkeit, Energieabsorption und Steifigkeit.

Bisher gibt es nur wenige Vertreter in diesem Bereich, wie z.B. verschiedene Aerogele, Metall- oder Graphenschäume, die eine ungeordnete Porenstruktur aufweisen. Sie entstehen entweder direkt aus molekularen Vorstufen über geeignete Trocknungsprozesse oder durch Abscheidung auf so genannte Opfer-Template, die anschließend entfernt werden. Metallmikrogitterstrukturen sowie vernetzte Kohlenstoffröhrensysteme sind ebenfalls unter Verwendung geeigneter Template herstellbar.

Aerogele sind bereits seit den 1930er Jahren bekannt. Dennoch konnte bislang kein wesentlicher kommerzieller Erfolg erzielt werden. Ihre Kennzeichen sind extrem niedrige Dichten ($4 - 500 \text{ mg/cm}^3$) und Wärmeleitfähigkeiten sowie niedrige Schallgeschwindigkeiten bei großer optischer Transparenz. Ihre Herstellung erfolgt aus molekularen Vorstufen. Es entstehen zunächst mit Flüssigkeit gefüllte Gele, die über spezielle Trocknungsverfahren in Aerogele überführt werden, d. h. die Porenflüssigkeit wird unter Erhaltung der Struktur gegen Luft ausgetauscht. Nahezu alle für katalytische Anwendungen relevanten Oxide lassen sich in Form von Aerogelen herstellen. Die bislang bekanntesten ultraleichten Silikat-Aerogele sind transparent, ungiftig und nicht brennbar, aber auch spröde, starr und brüchig. In Reinform kommen sie eher für Nischenanwendungen in Frage, z. B. zur transparenten Wärmedämmung. Industriell werden sie verstärkt in Kombination mit anderen Materialien eingesetzt. Mit Verstärkungsfasern lassen sich biegsame Dämmmatte herstellen. Als Zuschlagsstoff in Dämmputzen liegt ihr besonderes Potenzial in der Sanierung historischer Gebäude, da sie die Dämmwerte bei unveränderter Optik verbessern.

Weitere interessante Anwendungen bieten **Graphenschäume**, also Schäume auf der Basis zweidimensionaler Kohlenstoffschichten mit bienenwabenförmiger Struktur. Diese werden auf Nickelschäumen abgeschieden, die anschließend herausgeätzt werden. Der Porenanteil von Graphenschäumen liegt bei 99,7 %, die Dichte beträgt 5 mg/cm^3 . In Größe einer Briefmarke und mit einer Dicke von 0,5 mm können sie bei Raumtemperatur als chemische Gassensoren für die Detektion von Ammoniak und Stickstoffdioxid in Luft eingesetzt werden. Dies ist besonders interessant, weil in vielen Sprengstoffen Ammoniumnitrat enthalten ist, das Spuren von Ammoniak freisetzt.

Der Nachweis von Stickstoffdioxid ist sowohl für die Abgasüberwachung wichtig, dient aber auch als Marker für Sprengstoffe wie Nitrozellulose. Die Gasmoleküle haften an der Oberfläche (Adsoption) und verändern den elektrischen Widerstand des Graphens, der die Messgröße darstellt. Der Sensor ist in derselben Messzeit und mit derselben Widerstandsänderung etwa 10fach sensitiver als herkömmliche leitfähige Polymersensoren für die getesteten Gase, was an der großen Oberfläche des Graphenschaums liegt.

Bis zur Herstellung des Aerographits galt das **ultraleichte Metallmikrogitter** einer Nickel-Phosphor-Verbindung als das weltweit leichteste Material. Es hat eine Dichte von ungefähr $0,9 \text{ mg/cm}^3$. Seine regelmäßige Struktur wird aus dreidimensional überkreuzenden hohlen Metallröhren gebildet, wobei von jedem Kreuzungspunkt acht Verbindungsäste ausgehen.

Mikrometallgitter könnten analog zu Metallschäumen als Schall- und Stoßdämpfer oder als Träger für Batterieelektroden eingesetzt werden.

Aerographit ist mit einer Dichte von ca. 0,2 mg/cm³ viermal so leicht wie die Nickel-Mikrogitterstrukturen. Es besteht aus porösen Kohlenstoffröhren mit einer nanoskopischen Wandstärke und einem mikroskopischen Röhrendurchmesser, die dreidimensional vernetzt sind. Aerographit ist pechschwarz (d. h. es kann sehr gut Licht absorbieren), stabil, elektrisch leitfähig, verformbar und wasserabweisend. Es kann bislang in einer Größe von einigen Kubikzentimetern hergestellt werden und ist bei Druck- und Zugbelastung außerordentlich stabil. Das Material lässt sich bis zu 95 % zusammenpressen bzw. komprimieren und wieder in die ursprüngliche Form bringen. Es wird dabei zu einem gewissen Grad sogar fester. Die Aerographitstruktur kann man sich wie ein schnell wachsendes Efeugeflecht vorstellen, das sich um einen Baum aus kristallinem Zinkoxid windet, der als Opfer-Templat anschließend aufgelöst wird. Dabei lassen sich die resultierenden Eigenschaften sowohl über den Abscheidungsprozess selbst als auch über die Struktur des Zinkoxidtemplats steuern.

Für Aerographit sind verschiedene Anwendungen denkbar. Als Elektrodenmaterial in Lithium-Ionen-Batterien würde es zu einer Verringerung der Elektrolytmenge und damit des Batteriegewichts beitragen und damit z. B. die Weiterentwicklung der Elektromobilität fördern. Ebenso könnte es nichtleitende Kunststoffe elektrisch leitfähig machen, ohne ihr Gewicht zu erhöhen. Damit ließen sich unerwünschte elektrostatische Aufladungen unterdrücken. Auch Luftfahrt- und Satellitenelektronik sowie Medizintechnik und Wasserreinigung könnten von den Eigenschaften des Aerographs profitieren. Erste kommerzielle Produkte werden wahrscheinlich mittelfristig zu erwarten sein.

Dr. Claudia Notthoff, Februar 2013

Computational Photography

Mit der Computational Photography kündigt sich nun die zweite Phase der digitalen Revolution der Fotografie an.

Im Gegensatz zur konventionellen digitalen Fotografie wird die Abbildung eines Motivs bei der sog. Computational Photography (auch: Computational Imaging) nicht alleine einer Optik überlassen. Das endgültige Bild entsteht hier erst durch zum Teil intensive Computerberechnungen. Dadurch lassen sich zum einen physikalische Grenzen der herkömmlichen Fotografie überwinden, z. B. hinsichtlich der Schärfentiefe, des Kontrastumfangs, der Bewegungsunschärfe oder der Auflösung. Zum anderen werden kompaktere und leichtere Optiken möglich bis hin zu extrem flachen Objektiven von weniger als 1 mm Dicke. Erste Realisierungen des Prinzips der Computational Photography sind bereits auf dem Markt, eine weitgehende Nutzung der sich hiermit bietenden neuen Möglichkeiten wird in Zukunft zu wesentlichen Veränderungen der digitalen Fotografie führen.

Das zugrundeliegende Prinzip, bei der Aufnahme mehr Informationen zu sammeln und diese im Anschluss rechnerisch zum endgültigen Bild aufzubereiten, wird durch neue Aufnahmetechniken mit herkömmlichen Kameras oder mit grundlegend neuartigen Optiken umgesetzt.

Computational Photography mit herkömmlichen Kameras beruht darauf, ein Motiv in mehreren Einzelaufnahmen mit unterschiedlichen Kameraeinstellungen zu erfassen, z. B. mit anderer Belichtungsdauer, Fokussierung, Blende, Beleuchtung oder Blickrichtung. Dadurch enthält jede Einzelaufnahme unterschiedliche Informationen über das Motiv, wodurch sich rechnerisch (in der Kamera oder am Computer) ein synthetisches Bild erzeugen lässt, das mit einer einzelnen Aufnahme nicht hätte erzeugt werden können. Eine relativ einfache und seit Jahren verbreitete Anwendung ist die Erstellung von Panoramabildern. Zunehmende

Verbreitung in Digitalkameras findet auch die Funktion zur Erstellung von sog. HDR-Bildern (High Dynamic Range, dt.: hoher Dynamikumfang). Dazu werden mehrere Bilder eines Motivs mit unterschiedlichen Belichtungsdauern zusammengefügt, so dass im Ergebnis sowohl in dunklen als auch in hellen Bereichen des erzeugten Bildes Details zu erkennen sind, die in einer Einzelaufnahme sonst unter- bzw. überbelichtet wären.

Aktuell in der Entwicklung befinden sich Verfahren zur Entfernung von Bewegungsunschärfe aus Aufnahmen, bei denen sich das Motiv oder die Kamera während der Belichtungsdauer bewegt hat. Ein Ansatz beruht darauf, dass der verschmierende Effekt der Bewegung rechnerisch rückgängig gemacht werden kann, wenn Bahn und Geschwindigkeit dieser Bewegung genau bekannt sind. Informationen über die Bewegung lassen sich auf unterschiedliche Art ermitteln, z.B. indem sie während der Aufnahme direkt gemessen oder durch Bildanalyse nachträglich aus einer einzelnen Aufnahme bzw. aus einer Belichtungsreihe mit genau definierten Belichtungsdauern abgeleitet werden.

Ebenfalls Gegenstand aktueller Entwicklungsarbeit sind Techniken zur Erhöhung der Schärfentiefe, so dass möglichst alle Bereiche des Motivs scharf abgebildet werden. Die herkömmliche Methode dafür ist, die Blende der Kamera möglichst klein zu wählen, wodurch jedoch nur noch wenig Licht auf den Bildsensor gelangt. Ein Verfahren der Computational Photography zu mehr Schärfentiefe ist, den Bildsensor während der Aufnahme entlang der Achse des Objektivs zu verschieben. Dadurch wird quasi die Schärfeebelebene durch das Motiv geschoben und man erhält zunächst eine völlig unscharfe Aufnahme, aus der jedoch ein überall scharfes Bild berechnet werden kann, da sämtliche Informationen dafür in der Aufnahme enthalten sind.

Computational Photography auf der Grundlage völlig neuartiger Optiken verfolgt die Philosophie, dass ein Kameraobjektiv nicht ein möglichst exaktes Abbild eines Motivs auf dem Bildsensor erzeugen muss, sondern dass es das einfallende Licht möglichst effektiv oder mit wenig Informationsverlust erfasst. Dabei entsteht zunächst ein Zwischenbild, das sich nicht vom Menschen, wohl aber von einem Computer interpretieren lässt. Ein Beispiel dafür sind Kameras, die nach dem Prinzip von Insektenaugen arbeiten. Dazu werden zehntausende mikroskopische Linsen flächig auf einem Bildsensor angeordnet und bilden ein sog. Mikrolinsen-Array. Die Mikrolinsen erzeugen jeweils Teilbilder von leicht unterschiedlichen Motivausschnitten mit sehr geringer Auflösung, die mit einer Software zu einem höher aufgelösten Bild des gesamten Motivs zusammengefügt werden können. Da neben dem

Mikrolinsen-Array keine weitere Optik benötigt wird, lassen sich extrem flache und kostengünstige Kameramodule im Millimetermaßstab konstruieren.

Ein anderes Beispiel für den Einsatz neuartiger Optiken ist die Lichtfeldkamera (auch: plenoptische Kamera). Zwar wurde ihr Prinzip schon in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts erdacht, aber auch hier gilt, dass erst heute die technischen Voraussetzungen für eine praktische Umsetzung gegeben sind. Eine Lichtfeldkamera erfasst das vom Motiv ausgehende Lichtfeld in vier Dimensionen, indem zusätzlich zur Position eines Lichtstrahls auf dem Bildsensor auch die Richtung aufgezeichnet wird, aus der der Lichtstrahl eingefallen ist. Dies wird in der Regel durch Mikrolinsen-Arrays erreicht, die in das Objektiv der Lichtfeldkamera integriert sind und die auf dem Bildsensor zehntausende Bilder mit leicht unterschiedlicher Perspektive erzeugen. Mit Hilfe einer Software können aus diesen Daten im Nachhinein Ansichten des Motivs von leicht unterschiedlichen Standpunkten aus berechnet oder sogar 3D-Ansichten erstellt werden. Seit Kurzem sind Lichtfeldkameras auf dem Markt, bei denen man den Fokuspunkt nach der Aufnahme beliebig wählen kann. So kann man im Nachhinein jederzeit entscheiden, ob z. B. der Vordergrund, der Hintergrund oder auch das ganze Motiv scharf erscheinen soll.

Bis heute kann man sagen, dass sich Kameras von ihrem optischen Prinzip her seit ihrer Erfindung kaum geändert haben. Zwar wurde die analoge Aufzeichnung auf Film durch eine digitale Aufzeichnung mit elektronischen Bildsensoren ersetzt. Aber erst durch die zunehmende Verbreitung von immer kostengünstiger und leistungsfähiger werdenden Prozessoren kündigt sich mit der Computational Photography nun eine zweite Phase der digitalen Revolution der Fotografie an.

Dr. David Offenberg, März 2013

Künstliche Exoskelette

Für alle bekannten Exoskelette ist die Energieversorgung ein kritischer Punkt.

Exoskelette (Außenskelette) sind Stütz- und Schutzstrukturen von Gliederfüßern, wie beispielsweise Insekten. Sie unterscheiden sich durch ihre äußere Lage von innen liegenden Knochenskeletten, wie sie z.B. beim Menschen vorkommen. Künstliche Exoskelette wurden von diesen natürlichen Vorbildern abgeleitet und sind äußere Stützstrukturen, die ihre Träger bei Bewegungen unterstützen und schützen sollen. Sie sind jedoch keine Roboter, da sie keine eigene externe Sensorik besitzen und nur im direkten Kontakt zu ihrem Träger wirken können. Obwohl Ideen zur Entwicklung von Ganzkörper-Exoskeletten bereits seit 50 Jahren verfolgt werden, konnten erst in den letzten 10 Jahren entscheidende technologische Impulse zu ihrer Realisierung gegeben werden. Heute befinden sie sich hauptsächlich im Prototypenstadium, während Teil-Exoskelette z.B. zur Unterstützung der Arme bereits seit längerem eingesetzt werden.

Vor allem im medizinischen Bereich sind künstliche Gliedmaßen zu Rehabilitationszwecken Stand der Technik, aber auch fernbediente Aktoren (elektromechanische Muskeln) zur Handhabung von nuklearem Material sind schon seit längerer Zeit bekannt. Lange Zeit mangelte es jedoch an den für Ganzkörper-Exoskelette, die den Träger komplett umfassen, nötigen technischen Voraussetzungen. Dazu zählen insbesondere ausreichende Rechnerleistungen für die Steuerung, entsprechend kleine und transportable Energiequellen sowie ausreichend schnelle und leichte Aktoren. Typische Schlüsselkomponenten solcher Exoskelette sind außerdem der Rahmen sowie die Sensoren für die Balance- und Gangkontrolle.

Hier gab es inzwischen enorme technische Fortschritte, so dass in den letzten 10 Jahren vor allem in Japan und in den USA verschiedene Prototypen für künstliche Teil- und Ganzkörper-

Exoskelette hergestellt werden konnten. Die bisher in Japan am weitesten entwickelten Exoskelette der **HAL-Serie** (Hybrid Assistive Limb; Firma Cyberdyne) wiegen knapp über 20 kg, die jedoch vom Rahmen selbst getragen werden. Die Steuerung von Anzügen der fortgeschrittenen Variante HAL-5 erfolgt über ein zweifaches Kontrollsysteem. Das bio-kybernetische System überwacht die sog. elektromyographischen Signale (EMG- Signale) des Trägers. Sensoren auf der Haut leiten diese Signale an den Steuerungscomputer weiter, der dann die Arm- und Beinaktoren auslöst. Das zweite Kontrollsysteem speichert von der ersten Nutzung an die Fortbewegungsmuster des Trägers und sorgt so dafür, dass die Bewegungen von Träger und Exoskelett immer synchron sind und mit der Zeit flüssiger werden. Dies ist besonders bei medizinischen Anwendungen von Vorteil, da die Exoskelette so auch für Personen mit Rückenmarksverletzungen nutzbar sind und individuelle Fortbewegungscharakteristika berücksichtigt werden können.

Für die amerikanischen Streitkräfte wurde von der Firma Raytheon das Exoskelett **XOS-2** entwickelt. Es trägt sein Gewicht von ca. 25 kg selbstständig und kann darüber hinaus knapp über 90 kg zusätzliches Gewicht auf dem Rahmen tragen. Die Steuerung erfolgt über spezielle Kraft- und Drucksensoren am Körper und unter den Füßen. Diese leiten die Daten an den Kontrollcomputer weiter, der die Steuerung der künstlichen Extremitäten übernimmt.

Bleex (Berkeley Lower Extremity Exoskeleton; University of California) und **HULC** (Human Universal Load Carrier; Firma Lockheed Martin), zwei ebenfalls in den USA entwickelte Exoskelettmodelle zur Unterstützung der Beine, bestehen lediglich aus zwei künstlichen Beinen, die an der Hüfte mit einem rucksackartigen Rahmen verbunden sind. Sie wurden hauptsächlich als Tragehilfen entwickelt, wobei sich die jeweiligen Tragfähigkeiten auf 45 kg bzw. 91 kg belaufen. Die Steuerung des Bleex erfolgt ohne Sensoren direkt durch den Steuerungscomputer, der die benötigten Bewegungen aufgrund von Messungen am Exoskelett abschätzt.

Andere bereits entwickelte Exoskelette arbeiten mit Hilfe von Bewegungssensoren und Bewegungserfassung (motion capture). Der Einsatz einer EEG-Kappe (Elektroenzephalografie) zur Steuerung eines Exoskeletts für Gehbehinderte wurde ebenfalls erfolgreich getestet.

Für alle bekannten Systeme ist die **Energieversorgung** ein kritischer Punkt, da Gewicht und Größe der Energiequellen einen entscheidenden Einfluss haben. Die bisher genutzten

Batterien, Aktoren usw. sind zumeist schwer, unhandlich und/oder zu schnell erschöpft. Der japanische Anzug HAL wird mit Hilfe einer leichten Batterie betrieben, die ebenso wie der kleine Steuercomputer am Gürtel des Trägers befestigt ist. Für die Energieversorgung des XOS-2 sorgt ein spezieller Verbrennungsmotor, der eine Vielzahl an Kraftstoffen nutzen und damit, ebenso wie das entsprechende Aggregat des Bleex, die Hydraulik und den Steuerungscomputer versorgen kann. Der Akku von HULC erlaubt Wanderungen bis zu 20 km Reichweite, wobei eine Erweiterung auf eine Laufzeit von bis zu 72 Stunden möglich ist. Zudem kann das Exoskelett auch energiesparend ohne Stromquelle betrieben werden und dient dann nur als Stütze für zusätzliche Lasten.

Die oben beschriebenen Modelle arbeiten ausschließlich mit **hydraulischen Systemen**. Die Hydraulikventile wurden dabei in den letzten Jahren soweit optimiert, dass sie extrem zuverlässig, klein und effizient sind und sich unter den hohen Drücken nicht verformen. Grundsätzlich kommen auch **pneumatische Muskeln** in Frage, die dem biologischen Muskel nachempfunden sind und aus einem sog. Kontraktionsschlauch mit entsprechenden Anbindungsstücken bestehen. Auf Grundlage dieser Technologie wurde ein 8 kg schweres Teil-Exoskelett für den Schulter-Arm-Bereich entwickelt, der Fabrikarbeiter beim Tragen schwerer Lasten unterstützen soll.

Die vorgestellten Anzüge könnten zukünftig auch als Rückgrat für weitere integrierte Funktionalitäten, wie ballistischen Schutz, Kühlung, Heizung oder Sensorik, genutzt werden. Das neueste HAL-Modell schützt den Träger vor radioaktiver Strahlung und wurde speziell für die Arbeiten an den verunglückten Fukushima-Reaktoren entwickelt. Im therapeutischen Bereich werden die japanischen Anzüge bereits jetzt eingesetzt und mit fortlaufender technischer Entwicklung ist mittelfristig mit einer weltweiten Vermarktung zu rechnen.

Dr. Diana Freudendahl, Mai 2013

Silent Speech Interfaces

Je nach technischer Variante könnten Silent Speech Interfaces langfristig zur Standardausrüstung im Kommunikationsbereich werden.

Silent Speech Interfaces (SSI) dienen der lautlosen Kommunikation von Mensch zu Mensch oder zu einer technischen Steuerungseinheit. Sie wurden ursprünglich im Hinblick auf sprachbehinderte Personen untersucht, können aber auch in Umgebungen mit extrem hoher Geräuschkulisse hilfreich sein oder dort, wo es besonders leise bleiben soll. Sie benötigen keinen Sichtkontakt und sind im Gegensatz zu visuellen Kommunikationsformen (Gebärdensprache, Gesten) sowohl im Dunklen als auch aus einer Deckung heraus möglich.

Einfache SSI sind bereits seit längerer Zeit verfügbar. So gehörten relativ unkomplizierte Kehlkopfmikrophone schon in den 1940er Jahren zur Ausrüstung von Piloten. Inzwischen sind sie kommerziell weit verbreitet, jedoch von mäßiger Qualität. Heute bietet die zunehmende Nutzbarmachung neuer Technologien die Chance zu wesentlichen Qualitätsverbesserungen und zu einer deutlichen Ausweitung des Anwendungsspektrums von SSI-Systemen.

SSI basieren auf der Messung verschiedener im Lautbildungsprozess entstehender Signale, beginnend in bestimmten Hirnregionen und ausgeführt im menschlichen Artikulationsapparat. So führen physiologische Vorgänge einzelner Gehirnzellen zur elektrischen Aktivität des Gehirns. Es sendet wortspezifische Signale, bevor elektrische Impulse an die Muskeln des Artikulationsapparates weitergeleitet werden. Der aktivierte Kehlkopf erzeugt Schwingungen, die sich durch den Schädelknochen ausbreiten. Der Luftstrom erzeugt Luftgeräusche und Resonanzen in Mund-, Rachen- und Nasenraum, die zu Gewebevibrationen führen. Die Lippen- und Zungenstellung variiert während des Sprechvorgangs stark und ist hochspezifisch.

Je nach technischer Variante nutzen SSI-Systeme gezielt ein oder zwei Signale aus dieser Kette. Die drei wichtigsten Signalgeber sind Kehlkopfaktivität, Gehirnaktivität und die Aktivität der den Primärschall beeinflussenden Muskeln (Gesicht, Lippen, Zunge).

Zu den SSI-Systemen, die auf **Kehlkopfaktivität** beruhen, gehören Vibrations- und elektromagnetische Sensoren sowie Gewebevibrationsmikrofone. Alle diese Systeme können jedoch aufgrund der prinzipiell benötigten Kehlkopfaktivität nicht völlig lautlos betrieben werden.

Bei SSI-Systemen mit Vibrationssensoren werden je nach Platzierung die klassischen Kehlkopfmikrofone und deren technisch ausgereifteren Weiterentwicklungen von In-ear-Mikrofonen und sog. Knochen-Mikrofonen unterschieden. Feuerwehrhelme mit integriertem Kehlkopfmikrofon und Freihand-Kommunikationseinheiten mit Knochen-Mikrofon sind bereits im Einsatz.

Kehlkopfaktivitäten lassen sich auch mittels elektromagnetischer Sensoren vermessen. Hierzu zählt z. B. das General Electromagnetic Movement System (GEMS), das auf der Nutzung miniaturisierter Radarquellen niedriger Leistung (< 1 mW) basiert. Diese SSI-Systeme wurden speziell für sehr laute Umgebungen konzipiert. Sie sind in der Lage, perfekt verständliche Sprache bei einem sehr guten Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu liefern. Damit sind sie zum Beispiel für den Einsatz in Cockpits oder Maschinenräumen prädestiniert. Das GEMS-System ist im militärischen Einsatz und wird bereits kommerziell in Form von Bluetooth-Headsets für Mobiltelefone vertrieben.

Für die Detektion von Gewebevibrationen werden sog. Non-Audible-Murmur-Mikrofone (NAM) entwickelt. Das bevorzugt in weiches Silikon eingebettete Kontaktmikrofon haftet hier schräg unter dem Ohr im Bereich des Schläfenbeins. Das benötigte NAM-Signal kann gerade noch von benachbarten Zuhörern wahrgenommen werden. Ein kommerziell verfügbares System, das auf Gewebevibrationen basiert, kann in den nächsten zwei Jahren erwartet werden.

Zu den SSI-Systemen, die auf **Gehirnaktivität** beruhen, gehören nicht-invasive elektroenzephalografisch (EEG) basierte Gehirn-Computerschnittstellen (Brain-Computer-Interfaces, BCI) sowie unterschiedliche Mikroelektroden, die als BCI in die Hirnrinde implantiert werden. BCI-basierte SSI-Systeme kommen ohne Kehlkopfaktivität aus und benötigen lediglich die

Vorstellung des Sprechens. Diese Signale der gedachten Sprache ermöglichen eine absolut geräuschofreie Übertragung von Sprache. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass ein aufwendiger Lern- und Übungsprozess erforderlich ist. Der Einsatz invasiver BCI zeichnet sich nur für sprachbehinderte Menschen ab. Dagegen werden aktuelle Forschungsergebnisse zu Schädelkappen mit EEG-Oberflächensensoren auch von der Kommunikationsindustrie als vielversprechend eingestuft. Deren Entwicklung ist bisher noch nicht so weit vorangetrieben, dass ein alltagstaugliches Design in den nächsten zehn Jahren zu erwarten wäre.

Zu den SSI-Systemen, die auf der **Aktivität der den Primärschall beeinflussenden Muskeln** (Gesicht, Lippen, Zunge) basieren, gehören insbesondere elektromyographische (EMG) Muskelaktivitätssensoren sowie bildgebenden Verfahren.

Ein Netz von elektromyographischen Oberflächensensoren kann die Aktivität der spezifisch bei der Lautbildung eingesetzten Gesichtsmuskeln erfassen. 2010 wurde ein Demonstrator vorgestellt, der die detektierten Signale zusätzlich zur Übersetzung in geeignete Fremdsprachen nutzt. Für den kommerziellen Einsatz der EMG-basierten Systeme fehlt es zum heutigen Zeitpunkt noch an Benutzerfreundlichkeit. Innerhalb der nächsten fünf bis zehn Jahre wird die Entwicklung eines alltagstauglichen Designs erwartet, das ohne auf die Haut geklebte Elektroden auskommt.

Bildgebende Verfahren können zur Auswertung der Mundaktivität genutzt werden. Der dazu erforderliche Einsatz einer handelsüblichen Videokamera in Kombination mit einem Ultraschallkopf, der unter das Kinn geschnallt wird, ist jedoch ebenfalls noch nicht alltagstauglich.

Je nach technischer Variante könnten SSI-Systeme langfristig zur Standardausrüstung im Kommunikationsbereich werden. Ein besonderer, die Entwicklung treibender Markt wird beim lautlosen mobilen Telefonieren ohne Geräuschbelästigung in der Öffentlichkeit gesehen. Auch die abhörsichere Übermittlung vertraulicher Informationen per Handy würde damit möglich.

Dr. Heike Brandt, Juni 2013

Quantenkryptografie

Aufgrund prinzipieller Gesetzmäßigkeiten können an einem quantenphysikalischen System Messungen nicht durchgeführt werden, ohne dadurch den Zustand des Systems zu beeinflussen. Dieser Umstand wird bei der Quantenkryptografie genutzt, um einen sicheren Datenaustausch zu garantieren.

Die Quantenkryptografie bietet innovative Möglichkeiten im Bereich der Verschlüsselung vertraulicher Daten. Sie zählt zu einer Reihe von neuartigen Quantentechnologien, deren Funktionsweise ganz wesentlich auf Effekten der Quantenphysik beruht und die in dieser Form auf klassische Weise nicht realisierbar sind. Quantenkryptografische Verfahren stehen heute am Anfang ihrer praktischen Einsetzbarkeit. Allerdings müssen noch viele Fragen geklärt und bestehende Einschränkungen überwunden werden.

Generell wird mit Hilfe der Kryptografie unter anderem die Vertraulichkeit von Informationen gewährleistet, indem unter Verwendung eines bestimmten Schlüssels ein lesbarer Klartext im Rahmen eines Verschlüsselungsprozesses in einen „unlesbaren“ Geheimtext umgewandelt wird. Grundsätzlich kann man bei der Kryptografie zwischen symmetrischen und asymmetrischen Verfahren unterscheiden.

Symmetrische Verfahren verwenden sowohl für die Verschlüsselung als auch für die Entschlüsselung denselben Schlüssel. Derartige Methoden besitzen den Nachteil, dass dieser geheime Schlüssel auf einem sicheren Weg zwischen den Kommunikationspartnern ausgetauscht werden muss.

Asymmetrische Verfahren nutzen hingegen unterschiedliche Schlüssel für die Ver- und Entschlüsselung. Während der so genannte öffentliche Schlüssel allgemein bekannt ist und ausschließlich der Verschlüsselung dient, ist der private Schlüssel geheim und wird zur Entschlüsselung verwendet. Da die asymmetrischen Verschlüsselungsverfahren deutlich langsamer sind als die symmetrischen Varianten, werden beide Methoden in der Praxis

typischerweise miteinander kombiniert. Das asymmetrische Verfahren wird dabei lediglich zum Austausch eines Schlüssels genutzt, der dann für die Verschlüsselung der eigentlichen Nachricht mit Hilfe eines symmetrischen Verfahrens eingesetzt wird.

Aufgrund prinzipieller Gesetzmäßigkeiten können an einem quantenphysikalischen System Messungen nicht durchgeführt werden, ohne dadurch den Zustand des Systems zu beeinflussen. Dieser Umstand wird bei der Quantenkryptografie genutzt, um einen sicheren Datenaustausch zu garantieren. In diesem Fall beruht die Sicherheit der Übertragung darauf, dass ein eventueller Abhörvorgang im Gegensatz zur klassisch gültigen Vorstellung nicht unbemerkt erfolgen kann.

Bei der Quantenkryptografie werden allerdings nicht die eigentlichen Nachrichten ausgetauscht, sondern nur ein Schlüssel. Dieser wird dann typischerweise für ein herkömmliches symmetrisches Verschlüsselungsverfahren verwendet, um die eigentlichen Nachrichten zu verschlüsseln bzw. entschlüsseln. Sollte bei dem Schlüsselaustausch ein Abhörvorgang bemerkt werden, wird der Prozess einfach wiederholt und ein neuer Schlüssel ausgetauscht.

Eine relativ einfache Möglichkeit zur Realisierung quantenkryptografischer Verfahren besteht darin, einzelne Photonen, also Lichtquanten, für die Übertragung zu nutzen. Ein Kommunikationsteilnehmer sendet dabei nacheinander unterschiedlich polarisierte Photonen an den anderen Teilnehmer, der an den empfangenen Photonen bestimmte Polarisationsmessungen durchführt. Indem sich die beiden Teilnehmer anschließend über die genaue Art der durchgeführten Messungen verständigen, können sie einen geheimen Schlüssel etablieren. Diese Verständigung kann über eine klassische Kommunikationsverbindung erfolgen, die nicht abhörsicher sein muss. Die Photonen werden typischerweise mit Hilfe einer Glasfaserverbindung übertragen. Bei einer Sichtverbindung der Kommunikationspartner kann die Übertragung auch durch den freien Raum erfolgen.

Im Gegensatz zu den derzeit häufig für einen Schlüsselaustausch verwendeten asymmetrischen Verschlüsselungsverfahren besitzt die Quantenkryptografie den Vorteil, dass ihre Sicherheit nicht lediglich auf einer (unbewiesenen) mathematischen Annahme beruht, sondern stattdessen auf physikalischen Naturgesetzen. Dies ist insbesondere für Anwendungen von Interesse, bei denen sehr sicherheitssensitive Informationen kommuniziert werden müssen, wie z. B. im Bankwesen oder im militärischen Bereich.

Darüber hinaus stellt die Ersetzung von asymmetrischen Verschlüsselungsverfahren durch die Quantenkryptografie eine Möglichkeit dar, der zukünftigen Bedrohung durch Quantencomputer zu begegnen. Quantencomputer befinden sich derzeit in einem frühen Entwicklungsstadium und sind eine weitere Form von Quantentechnologien. Es existieren einige Anwendungen, in denen Quantencomputer klassischen Computern deutlich überlegen wären. Hierzu zählen unter anderem gewisse mathematische Probleme, deren praktische Unlösbarkeit durch konventionelle Computer gerade die Grundlage für die Sicherheit der derzeit üblicherweise genutzten asymmetrischen Verschlüsselungsverfahren bildet. Diese Verfahren würden daher bei einer Verfügbarkeit von Quantencomputern unsicher werden. Symmetrische Verschlüsselungsverfahren sind prinzipiell ebenfalls durch Quantencomputer bedroht. Allerdings ließe sich deren Sicherheit durch eine Verdoppelung der genutzten Schlüssellänge auch weiterhin gewährleisten.

Erste Systeme auf der Grundlage der Quantenkryptografie werden bereits kommerziell angeboten. Aktuelle Geräte weisen allerdings unter anderem noch gewisse Einschränkungen hinsichtlich der damit überbrückbaren Entfernungen auf, die derzeit typischerweise nur bis zu ca. 100 Kilometer betragen können. Ein interessanter Forschungsansatz besteht in diesem Zusammenhang darin, Kommunikationsverbindungen mit Hilfe von Satelliten zu realisieren. Auf diese Weise könnte dann ein äußerst sicheres globales Kommunikationsnetzwerk entstehen. Andere Entwicklungen beschäftigen sich mit der Erhöhung der derzeit erzielbaren Datenrate. Außerdem erlauben aktuelle Systeme lediglich die Kommunikation zwischen zwei Teilnehmern. Daher werden augenblicklich verschiedene Ansätze untersucht, um die Quantenkryptografie auch in Netzwerken zu verwirklichen. Darüber hinaus hat sich mittlerweile gezeigt, dass die tatsächliche Sicherheit der Quantenkryptografie in der Praxis von der jeweils gewählten technischen Implementierung abhängt, da diese zu Sicherheitslücken führen kann. Dieser Aspekt ist dementsprechend ebenfalls Gegenstand aktueller Forschungsbemühungen.

Dr. Klaus Ruhlig, Juli 2013

3D-Drucker

Gemäß dem Slogan „If you can draw it, you can make it“ scheinen den Anwendungsmöglichkeiten für 3D-Drucker kaum Grenzen gesetzt.

3D-Drucker stellen durch sukzessives Verbinden geeigneter Ausgangsmaterialien dreidimensionale Werkstücke her. Druckvorlage sind dabei immer digitale Dateien. Nachdem sie zunächst vor allem zur Fertigung von Prototypen und Modellen verwendet wurden, finden 3D-Drucker heute zunehmenden Eingang in die industrielle Produktion und inzwischen sogar in den privaten Bereich. Dabei ist diese Entwicklung heute eher durch die Nachfrage getrieben als durch aktuelle technologische Durchbrüche.

Im Vergleich zu traditionellen subtraktiven Fertigungsverfahren, wie z.B. dem CNC-Fräsen, ermöglicht der **additive Produktionsprozess** von 3D-Druckern starke Ressourceneinsparungen und die Herstellung hochkomplexer Strukturen an einem Stück. Im Gegensatz zu Gussverfahren entfällt das aufwändige Herstellen von Formen und das Formenwechseln. Ein wesentlicher Vorteil ist auch die mit 3D-Druckern relativ einfach zu realisierende Möglichkeit zur verteilten Produktion direkt an dem Ort, wo die gefertigten Werkstücke gebraucht werden. So machen sich die US-Streitkräfte die neue Technologie bereits seit Mitte 2012 in Form von mobilen 3D-Druckwerkstätten zunutze, die Soldaten im Out-of-Area-Einsatz mit maßgeschneiderten Bauteilen versorgen.

Als Vorlage für 3D-Drucker dienen z.B. virtuelle Objekte aus CAD-Anwendungen (Computer Aided Design). Vor dem eigentlichen Druck wird das Modell von einer Software in einen Stapel zweidimensionaler Scheiben zerlegt. Aus diesen horizontalen Schichten baut der Drucker dann Lage um Lage das dreidimensionale Objekt auf. In Abhängigkeit vom Produktionsmaterial und dem Druckverfahren liegt die Dicke dieser Schichten – und damit die vertikale Auflösung – zwischen 0,1 und 0,01 Millimeter.

Eine der verbreitetsten Methoden ist das Drucken mit geschmolzenen Materialien, bei dem das 3D-Objekt von einer erhitzten Druckdüse Schicht um Schicht aufgebaut wird (**Fused Deposition Modeling, FDM**). Obwohl bei diesem Verfahren zumeist Kunststoffe zum Einsatz kommen, ist es prinzipiell auch auf andere zähflüssige Materialien wie Ton oder auch Schokolade übertragbar. Zudem können durch den Einsatz mehrerer Druckdüsen auch Objekte aus unterschiedlichen Materialien oder mit verschiedenen Farben realisiert werden. Die FDM-Methode stellt ein kostengünstiges und vielseitiges 3D-Druckverfahren dar. Nachteil der Methode ist, dass der Druck überstehender Bauteile temporäre Stützstrukturen notwendig macht, die dem Material während des Aushärtens Halt verleihen. Ein geringes vertikales Auflösungsvermögen führt darüber hinaus häufig zu einer relativ rauen Oberfläche des Produkts.

Beim Lasersintern (**Selective Laser Sintering, SLS**), wird ein pulvriger Feststoff schichtweise auf einem Drucktisch ausgebracht, wo er Lage um Lage von einem Hochleistungslaser verschmolzen wird. Verwandte Methoden sind das Laserschmelzen (Selective Laser Melting, SLM) und das Elektronenstrahlschmelzen (Electron Beam Melting, EBM). Mit diesen Verfahren lassen sich aus verschiedenen Kunststoffen und Metallen Werkstücke von hoher Dichte und Stabilität formen. Stützstrukturen sind hierbei nicht notwendig, allerdings weisen die fertigen Objekte auch bei diesen Druckverfahren häufig eine stufige Oberfläche auf.

Die **Stereolithographie (STL)** und die ihr verwandten Methoden basieren auf dem Prinzip der Photopolymerisation, d.h. auf der Aushärtung flüssiger Kunststoffe unter Lichteinfluss. Bei der STL entstehen die einzelnen Lagen des Objekts durch die Laserhärtung eines dünnen Flüssigkeitsfilms auf einer Plattform, die Schritt für Schritt in einem mit Epoxidharz gefüllten Becken abgesenkt wird. Die so gefertigten Objekte zeichnen sich durch glatte Oberflächen und eine hohe Detailtreue aus. Das Verfahren an sich ist vergleichsweise zeitsparend aber kostspielig.

Gemäß dem Slogan „If you can draw it, you can make it“ scheinen den Anwendungsmöglichkeiten für 3D-Drucker kaum Grenzen gesetzt. Durch dieses kreative Potential spielt die Technik vor allem in der schnellen Produktion von Musterbauteilen (Rapid Prototyping) bereits seit den 1980er Jahren eine bedeutende Rolle. Daneben entwickelt sich seit einigen Jahren zunehmend ein privater Markt. Hier nutzen Anwender die neue Technik um eigene Objektideen zu verwirklichen, wobei Designvorlagen häufig über Online-Plattformen mit der Community geteilt werden. In diesem Zusammenhang wird immer wieder auf die

Problematik der Entwicklung von Druckvorlagen für Schusswaffen hingewiesen, die zu einer unkontrollierten Verbreitung von Handfeuerwaffen in der Zivilgesellschaft führen könnte.

In Kombination mit einem 3D-Scanner, der eingesetzt wird um von einem reellen Objekt ein virtuelles Faksimile zu schaffen (Reverse Engineering), kann ein 3D-Drucker prinzipiell auch als **3D-Kopierer** genutzt werden. In diesem Kontext dürfte die größte Einschränkung in der begrenzten Auswahl der möglichen Ausgangsmaterialen zu sehen sein, da bislang vornehmlich Werkstücke aus Plastik angefertigt werden können.

Natürlich spielt der 3D-Druck auch in Wissenschaft und Forschung eine wichtige Rolle, beispielsweise in der Archäologie oder der Paläontologie. In der Medizin können bereits heute durch eine Kombination von 3D-Scanning und 3D-Printing personalisierte Prothesen und Implantate angefertigt werden. Für die Zukunft verspricht das sogenannte **Bioprinting** revolutionäres medizinisches Potential. Als Ausgangsmaterialien werden hier lebende Zellen eingesetzt (z.B. Knorpelzellen). Diese sollen langfristig mittels eines entsprechend modifizierten 3D-Druckers zu funktionsfähigen Gewebeverbänden zusammengelagert werden. Erste Schritte in diese Richtung stellen Systeme dar, mit denen sich Haut auf Brandwunden drucken lässt oder die in der Lage sind, Blutgefäße zu drucken. Bevor diese Technik jedoch im Druck ganzer Organe zum Einsatz kommen kann, wird man die Auflösung der Geräte weiter verbessern und weitere Erkenntnisse in der Erforschung notwendiger Wachstums- und Regulationsfaktoren sammeln müssen.

Demgegenüber ist die Technologie des 3D Drucks insgesamt heute bereits weit fortgeschritten. Ob sich jedoch mittelfristig wie vielfach vorhergesagt tatsächlich eine „Personalisierung der Produktion“ vollziehen wird, wird maßgeblich von der Akzeptanz und Nachfrage der Nutzer abhängen.

Dr. Carsten M. Heuer, August 2013

Alternative Antriebe See

Aus technischer Sicht scheinen bei der Energieversorgung von Schiffen alles in allem Einsparungspotenziale in der Größenordnung von 50 % durchaus realistisch.

Auch die Schifffahrt gerät zunehmend in den Fokus internationaler Regelungen zur Emissionskontrolle und insbesondere zur Bekämpfung des Klimawandels. Zusammen mit der Verteuerung fossiler Energieträger werden diese in Zukunft zu nachhaltigen Veränderungen bei der Energieversorgung und dem Antrieb von Schiffen führen.

Im Prinzip ist schon auf den ersten Blick eine ganze Reihe von Maßnahmen möglich, die auf Anhieb ihr hohes Potenzial für Emissionsminderungen einbringen könnten. Das würde z. B. gelten für die Nutzung der Kernenergie zum Antrieb über Dampfturbinen und Propeller. Dabei handelt es sich um eine etablierte Technik, die allerdings auch international wegen einiger tatsächlicher Nachteile weiterhin nur wenig genutzt werden wird. Nachhaltiger wäre der Einsatz rein elektrischer Antriebe, die aus **Batterien**, **Brennstoffzellen** und/oder direkt aus **Solarzellen** versorgt werden könnten. Hier gibt es ebenfalls inzwischen interessante Entwicklungen, die aber aus logistischen Gründen oder wegen unzureichender Energie- oder Leistungsdichten zunächst nur für Spezialanwendungen, wie z. B. die Zusatzstromversorgung, in Frage kommen.

Auf den ersten Blick scheint auch eine umfassende Renaissance der **Segelantriebe** ausgeschlossen, da diese den modernen Leistungsanforderungen ebenfalls nicht gerecht werden könnten. Allerdings gibt es in den letzten Jahren durchaus interessante Entwicklungen von Zugdrachen, die nur im Fall günstiger Winde ausgefahren werden und dann den ohnehin vorhandenen und auf die Einsatzbedingungen des Schiffes optimierten Hauptantrieb entlasten können.

Zur Beurteilung des Realisierungspotenzials im Prinzip möglicher Entwicklungen ist eine Betrachtung der spezifischen Einsatzbedingungen unabdingbar. Aus diesen ergibt sich insgesamt die Schlussfolgerung, dass es für den Hauptantrieb der wichtigsten militärischen und zivilen Schiffe absehbar **keine Alternative zur Verbrennungskraftmaschine als Primärenergieerzeuger an Bord** gibt. Auch zur Erzeugung der möglicherweise für den Vortrieb genutzten elektrischen Energie in seriellen Hybridantrieben, die z. B. für den Antrieb von Kreuzfahrtschiffen bereits Stand der Technik sind, bleiben sie konkurrenzlos.

Mögliche Alternativen haben entweder deutlich zu geringe Leistungen, oder es kann nicht ausreichend Energie für die langen Standzeiten gespeichert werden, oder es gibt im Einsatzgebiet keine Infrastruktur für die Energieversorgung. Dazu kommt, dass es in den meisten Einsatzszenarien für die Erzeugung des Vortriebs **keine brauchbare Alternative zum Propeller** gibt. Propeller wiederum brauchen Leistungen, die sich aus hohen Drehmomenten bei geringen Drehzahlen ergeben. Auch darauf muss die Antriebsanlage ausgelegt sein.

Im Prinzip in Frage kommende Verbrennungskraftmaschinen sind Dieselmotoren, Gasturbinen oder Dampfturbinen. Dampfturbinen erlauben eine Vielfalt an Brennstoffen, allerdings bei mäßigen Wirkungsgraden. Gasturbinen haben das beste Leistungsgewicht, allerdings schlechte Wirkungsgrade bei Teillast. Auch in Zukunft werden also Dieselmotoren ihre besonderen Vorteile beim Wirkungsgrad ausspielen können. Sie wurden bereits in der Vergangenheit auf einen günstigen Verbrauch hin optimiert. So werden deutliche Effizienzsteigerungen bereits durch Common-Rail-Direkteinspritzungssysteme erzielt. Trotzdem sind auch durch **Verbesserungen konventioneller Antriebe** noch zusätzliche Energieeinsparungen möglich. So sollen weitere Optimierungen von Pumpen, Hilfssystemen und automatischen Motorsteuerungen zu Verbesserungen im einstelligen Prozentbereich führen. Größere Einsparungspotenziale sind darüber hinaus durch die Energierückgewinnung aus den heißen Abgasen zu erwarten

Interessante Entwicklungen mit realistischem Verwirklichungspotenzial gibt es auch bei sog. **Intelligenten Propellern**. Zu verbessernde Variablen sind hier Größe, Anzahl, Neigung und Steigung der Flügel sowie neue Werkstoffe und Beschichtungen. Zusammen mit einer optimal aufeinander abgestimmten Form von Rumpf, Propeller und Ruderblatt könnten hier noch deutliche Einsparungspotenziale realisiert werden.

Zu entscheidenden Verringerungen des Wellenwiderstandes sollen **optimierte Rumpfformen** führen. Hier steht eine geeignete Anpassung der Grundkonstruktion eines Schiffes (z. B. Lage und Form von Maschinen- und Laderaum) an die Anforderungen eines optimierten hydrodynamischen Designs im Mittelpunkt der Überlegungen.

Intensive Bemühungen gibt es auch um die **Verringerung des Reibungswiderstandes** im Wasser. Hier denkt man an neue Beschichtungen bzw. Anstriche, aber auch an eine sog. Luftschnierung, indem durch neuartig geformte Rümpfe Luft zwischen Rumpf und Wasserumgebung gedrückt wird.

Welche (flüssigen) **Alternativbrennstoffe** in Zukunft zum Einsatz kommen, wird stark von Einflussfaktoren wie Verfügbarkeit und Akzeptanz abhängen. Interessante Kandidaten sind die bekannten Biokraftstoffe, die ein hohes Klimapotenzial haben, allerdings bei problematischer Verfügbarkeit. Mit möglichen CO₂-Reduktionen im niedrigen zweistelligen Prozentbereich verfügen auch Antriebe auf Basis von verflüssigtem Erdgas (**Liquified Natural Gas, LNG**) über ein bemerkenswertes Klimapotenzial. LNG besitzt eine hohe Verfügbarkeit und ist im Moment billiger als das konventionelle Bunkeröl. Außerdem können die hier einzusetzenden Verbrennungskraftmaschinen auch mit Diesel betrieben werden (Dual-Fuel-Konzept). Allerdings führen relativ geringe Energiedichten zu größeren nötigen Bunkervolumen. Ferner ist die Infrastruktur zur Versorgung mit LNG noch in der Entwicklung begriffen. Im Kurzstreckenbetrieb werden LNG-Schiffe bereits eingesetzt. Hier wird auch in Zukunft ihr Haupteinsatzgebiet liegen.

Insgesamt kann man sagen, dass aus technischer Sicht bei der Energieversorgung von Schiffen durch intelligente Kombination verschiedener Einzelmaßnahmen alles in allem Einsparungspotenziale in der Größenordnung von 50 % durchaus realistisch scheinen! Voraussetzung für die Realisierung dieser Potenziale wären insbesondere geänderte Finanzierungsmodelle im Schiffbau, welche die gesamten Lebenswegkosten der Schiffe wesentlich stärker berücksichtigen als bisher.

Jürgen Kohlhoff, September 2013

Physically Unclonable Functions

Physically Unclonable Functions (PUFs) sind zufällig entstandene und quasi unmöglich zu kopierende Merkmale von Bauelementen. Bereits mittelfristig ist mit der Realisierung von Anwendungen z. B. im Bereich der Erkennung von Produktfälschungen zu rechnen.

Physically Unclonable Functions (PUFs) sind Merkmale von Bauelementen, die diese oft zusätzlich zu ihren primären und für die eigentliche Nutzung relevanten Eigenschaften noch haben. Sie entstehen bei der Herstellung zufällig und sind relativ leicht zu identifizieren, aber nur schwierig vorherzusagen und quasi unmöglich zu reproduzieren bzw. zu kopieren. Die technische Nutzbarmachung von PUFs befindet sich im Wesentlichen noch im Forschungsstadium. Trotzdem ist bereits mittelfristig mit der Realisierung einer ganzen Reihe von Anwendungen zu rechnen, z. B. im Bereich der Erkennung von Produktfälschungen.

PUFs entstehen z. B. durch im **Herstellungsprozess** zufällig eingebrachte Partikel. Jede PUF reagiert auf einen bestimmten äußeren Stimulus (der so genannten Challenge C), wie z. B. der Eingabe einer Bitsequenz, mit einer für sie charakteristischen Antwort (dem so genannten Response R), die bei dieser PUF für diesen Stimulus immer gleich ausfällt, bei verschiedenen PUFs, auch desselben Fertigungsprozesses, jedoch unterschiedlich ist. Somit stellt die realisierte Funktion ein Merkmal der betreffenden PUF dar, das charakteristisch für diese PUF ist und anhand dessen sie eindeutig identifizierbar ist.

Eine der ersten experimentellen PUFs war eine **optische PUF**, bei der in eine transparente Glasplatte auf zufällige Weise Streupartikel integriert wurden. Bei Bestrahlen der Glasplatte mit einem Laser unter einem bestimmten Winkel (dies ist die Challenge) ergibt sich als Antwort ein charakteristisches Transmissionsmuster, das einzigartig ist. Der Schwerpunkt der vorgeschlagenen Varianten liegt jedoch bei den **elektronischen PUFs**, deren Funktionsweise auf den unvermeidlichen geringfügigen Toleranzen innerhalb des Fertigungsprozesses von integrierten elektronischen Schaltungen beruht. Unter diesen lassen sich wiederum Delay-

based PUFs und Memory-based PUFs unterscheiden. Während Delay-based PUFs auf geringfügig unterschiedlichen Laufzeiten eines Signals durch verschiedene elektronische Bauelemente basieren, nutzen Memory-based PUFs den Umstand aus, dass nicht belegte Speicherzellen nach dem Einschalten durch Toleranzen bei der Fertigung quasi zufällig einen der beiden möglichen Werte (0 oder 1) annehmen.

Zu den **Delay-based PUFs** zählen sog. Arbiter PUFs und Ringoszillator PUFs. Arbiter PUFs beruhen auf dem Laufzeitunterschied, der beim parallelen Durchlaufen eines Signals durch zwei prinzipiell gleich lange Wege durch eine Kaskade bestimmter elektronischer Bauelemente auftritt. Je nachdem, auf welchem Weg das Signal zuerst ankommt, wird eine Antwort von einem Bit (0 oder 1) generiert. Ringoszillator PUFs sind dagegen Schaltungen, die unter Nutzung der Laufzeit eines Signals durch eine so genannte Ringoszillator-Schaltung ein Ausgangssignal mit einer bestimmten Frequenz erzeugen. Durch einen Frequenzvergleich zweier solcher Ringoszillatoren lässt sich wiederum eine Antwort von einem Bit erzeugen. Durch geeignete sukzessive Anwendung lassen sich sowohl bei Arbiter PUFs als auch bei Ringoszillator PUFs Bitsequenzen beliebiger Länge als Antworten generieren.

Eine wichtige Klasse von elektronischen PUFs, die sich weder den Delay-based noch den Memory-based PUFs zuordnen lassen, sind die so genannten **Coating PUFs**. Darunter werden integrierte Schaltungen verstanden, die mit einer Schicht überzogen sind, in die auf zufällige Weise Partikel eingebracht sind, die bestimmte elektrische Parameter, wie z.B. die elektrische Kapazität zwischen zwei vorgesehenen Messpunkten, beeinflussen. Neben der praktischen Unmöglichkeit der Reproduktion bieten solche PUFs insbesondere den Vorteil, dass Angriffe auf der physischen Ebene, so genannte invasive Angriffe, detektiert werden können.

Ein potenzielles **Anwendungsfeld** von PUFs ist die Authentifizierung, bei der eine Person oder ein Rechner seine Berechtigung, z.B. die des Zugangs, gegenüber einer nachfragenden Instanz nachweist. Hierzu wird im Vorfeld für jede PUF eine Vielzahl von Challenge/Response-Paaren (CRP) gebildet und abgespeichert. Bei der Authentifizierung wird die PUF nun mit einer bestimmten Challenge angeregt und antwortet mit der für sie eindeutigen Antwort, wodurch sie sich identifiziert.

PUFs könnten auch der Erzeugung geheimer Schlüssel, wie sie in Verschlüsselungsverfahren zum Einsatz kommen, dienen. Während diese bisher dauerhaft gespeichert und damit poten-

ziell angreifbar waren, könnten PUF-basierte Schlüssel erst dann durch Anregung mit einer entsprechenden Challenge erzeugt werden, wenn sie im Verfahren selber benötigt werden. Während dieser Ansatz die Verwendung von PUFs in herkömmlichen Verschlüsselungsverfahren vorsieht, geht das neue Konzept der Hardware-Entangled Cryptography noch einen Schritt weiter. Hierbei ist das gesamte CRP-Verhalten der PUF vollständig in das Verschlüsselungsverfahren integriert, es ist keine Erzeugung eines Schlüssels mehr nötig.

Weitere denkbare Anwendungen von PUFs könnten die Erkennung von Produktfälschungen, das Binden von Software an eine bestimmte Hardware („Personalisieren von Software“), die sichere Übermittlung der aktuellen Softwarekonfiguration eines Rechners an einen Dritten (Remote Attestation) sowie das Erkennen so genannter invasiver Angriffe auf Hardware sein. Angesichts der zunehmenden Anzahl von invasiven Angriffen könnte diese Möglichkeit zukünftig herausragende Bedeutung erlangen.

Generell befinden sich PUFs, von ganz wenigen marktreifen Lösungen abgesehen, noch im **Forschungsstadium**. Ein Schwerpunkt der derzeitigen Anstrengungen ist die bisher nur unzureichend erfolgte systematische Untersuchung der Sicherheit von PUFs unter einer Vielzahl von neuartigen Angriffsarten. Insbesondere sollte sich das Verhalten einer PUF auch nicht in Software nachbilden lassen, da dann ein Angreifer die korrekte Antwort auf eine beliebige Challenge mittels dieser Software errechnen könnte und nicht mehr auf eine (nahezu unmöglich herzustellende) physische Kopie angewiesen wäre. In den kommenden Jahren ist mit einer Vielzahl verbesserter PUFs und neuartigen PUF-Konstruktionen zu rechnen, wobei sich deren potenzielles Anwendungsspektrum allmählich erweitern wird.

Thomas Euting, Oktober 2013

Intelligente Textilien

Im medizinischen Bereich sowie im Sport- und Sicherheitssektor ist die Etablierung Intelligenter Textilien zu erwarten, da dort der deutlich erweiterte Funktionsumfang die höheren Kosten rechtfertigt.

Intelligente Textilien unterscheiden sich von herkömmlichen durch besondere funktionelle Eigenschaften. Sie können ihre Umwelt wahrnehmen und zu einem gewissen Grad selbstständig auf Reize wie Temperaturschwankungen, Veränderungen elektrischer oder magnetischer Felder oder der Beleuchtungsbedingungen reagieren, indem sie z. B. ihre Form, Farbe, Isolierungsfähigkeit oder Elastizität ändern. „Einfachere“ Intelligente Textilien sind schon lange kommerziell erhältlich, beispielsweise zur Erzeugung feuchtigkeitsregulierender Gewebe. In den letzten Jahren wurden darüber hinaus zunehmend komplexere Systeme entwickelt, in die oftmals elektronische Komponenten integriert sind. Langfristig sollen in derartigen Intelligenten Textilien Elektronik und Textil verschmelzen, indem das Gewebe selbst die Funktion elektronischer Komponenten übernimmt.

Textilien mit integrierten elektronischen Komponenten sollen im Rahmen von Konzepten wie Pervasive oder Ubiquitous Computing eingesetzt werden. Dabei werden jederzeit und überall verfügbare Alltagsgegenstände mit Rechenkapazität und Kommunikationsfähigkeiten ausgestattet. Gleichzeitig soll die Computertechnologie selbst unsichtbar in den Hintergrund treten. Einfache Elektronische Textilien (engl. Smart Wearables bzw. Smart Wearable Systems), die mobile Kommunikations- und Unterhaltungselektronik in Kleidungsstücke integrieren, sind schon seit gut einem Jahrzehnt kommerziell erhältlich. Leuchtende Textilien werden daneben eingesetzt, um modische Akzente zu setzen oder Kleidung zu entwerfen, die sich der aktuellen Stimmung ihres Trägers anzupassen vermag. Dabei handelt es sich bisher um eigenständige mobile Elektronikgeräte, LED-Displays oder ähnliche Komponenten, die z. B. durch das Einnähen von Kabeln mit einem textilen Trägermaterial verbunden werden.

Langfristig sollen die Gewebe selbst die Funktion der elektronischen Komponenten übernehmen. Eine derartige Ausstattung mit intelligenten Funktionen ist prinzipiell für fast alle Arten von Textilien vorstellbar, von Bekleidung über Möbelbezüge und Vorhänge hin zu Zeltplanen oder technischen Textilien wie Brandschutzweweben. Solche Textilien mit einem sehr hohen Intelligenzgrad sind jedoch noch weit von der Marktreife entfernt. Insbesondere die Herstellung von Textilien, die selbst als Übertragungsmedium, Kommunikations- oder Recheneinheit dienen können, gestaltet sich bisher schwierig. Es existiert zwar eine Vielzahl an Prototypen aus unterschiedlichen Forschungsbereichen, der augenblickliche Fokus ist aber noch darauf gerichtet, einzelne Komponenten zu entwickeln und zu testen, die in späteren Phasen kombiniert werden sollen. Elektrisch leitende Fasern sind zum Teil bereits kommerziell verfügbar, beispielsweise auf Basis eingewobener Metallfäden, mit Metallen beschichteter Polymere oder intrinsisch leitfähiger Polymere. Fortschritte wurden ebenfalls bei der Verbesserung von Haltbarkeit und Praktikabilität erzielt. So konnten bereits mehrere textile elektronische Systeme demonstriert werden, die auch nach mehrfachem Waschen und unter mechanischer Belastung nicht in ihren Eigenschaften nachließen.

Im Gesundheitswesen sollen durch den Einsatz intelligenter Textilien Patienten mit chronischen Krankheiten, Risikofaktoren oder in Rehabilitation in ihrer gewohnten Umgebung permanent überwacht werden, um frühzeitig Komplikationen erkennen zu können. Das ermöglicht ein schnelles Handeln im Notfall, gleichzeitig können aber auch unnötige Krankenhausaufenthalte vermieden werden. Intelligente Textilien erfassen dazu über eine Vielzahl an Sensoren physiologische Parameter wie die Atemfrequenz und den Bewegungszustand ihres Trägers und übermitteln diese an eine zentrale Einheit. Im Sportbereich unterstützen sie z. B. eine Analyse und Verbesserung der Bewegungsmuster oder senden im Fall eines Unfalls ein Notsignal aus. Um die Erfassung wichtiger Körperfunktionen durch intelligente Textilien möglichst wenig auffällig und hinderlich zu gestalten, werden schon seit längerem textile Sensoren, Elektroden und Datenleitungen entwickelt. Erste Produkte sind bereits erhältlich, z. B. ein Säuglingsanzug, der vor plötzlichem Kindstod warnen soll.

Schutzanzüge für Rettungskräfte und Katastrophenhelfer sollen es ermöglichen, die Einsatzkräfte jederzeit aus der Ferne zu überwachen, indem Körperfunktionen, Aktivität und Aufenthaltsort der Helfer registriert und an eine zentrale Stelle übermittelt werden. Integrierte Temperatur-, Gas- und andere Umweltsensoren sollen die Rettungskräfte unterstützen. Auch im industriellen Sektor könnten solche Schutzanzüge zum Einsatz kommen. Damit verbunden ist die Entwicklung temperaturregulierender intelligenter Textilien. Ihr Ursprung

ist in Raumanzügen zu suchen, wo sie unter anderem Astronauten vor extremer Kälte schützen. Mittlerweile kommen sie aber vermehrt auch im Sicherheitsbereich, z. B. für Feuerwehrleute, sowie im Freizeitbereich zum Einsatz.

Eine weitere Sicherheitsanwendung besteht in der Verbesserung des Schlag-, Stich-, und ballistischen Schutzes von Schutzwesten, indem diese bei gleichzeitig hohem Tragekomfort in die Lage versetzt werden, ihre Schutzwirkung zum richtigen Zeitpunkt und am richtigen Ort gezielt zu entwickeln. Derartige Systeme lassen sich gleichzeitig auch auf andere Weise nutzen, beispielsweise um nach einem Knochenbruch die umgebende Kleidung zu einem stützenden Verband zu verhärten.

Trotz der Vorteile Intelligenter Textilien bleibt abzuwarten, ob sie sich allgemein gegenüber anderen Konzepten durchsetzen können. So könnte die Entwicklung neuartiger, am Körper getragener Unterhaltungselektronik – z. B. Datenbrillen – in Kleidung integrierte Displays o. ä. überflüssig werden lassen. Nur wenn die allgemeinen Kosten so weit sinken, dass sich ihre Anschaffung auch im Vergleich zu gewöhnlichen Textilien lohnt, werden solche Intelligenten Textilien eine größere Akzeptanz finden. Auch Haltbarkeit und Praktikabilität müssen sich dazu noch bedeutend verbessern. Im medizinischen Bereich sowie im Sport- und Sicherheitssektor ist ihre Etablierung dagegen zu erwarten, da dort der deutlich erweiterte Funktionsumfang die höheren Kosten rechtfertigt.

Dr. Ramona Langner, November 2013

Mikrofluidtechnologie

Analog zur früheren Entwicklung der Elektronik in Richtung Mikroelektronik findet seit einigen Jahren in der Chemie eine vergleichbare Miniaturisierung der Prozesse statt.

Analog zur früheren Entwicklung der Elektronik in Richtung Mikroelektronik findet seit einigen Jahren in der Chemie eine vergleichbare Miniaturisierung der Prozesse statt. Mit der sog. Mikrofluidtechnologie, die sich mit dem Verhalten von Flüssigkeiten und Gasen auf kleinstem Raum beschäftigt, können kleinste Reaktionsgefäße für immer komplexere Reaktionen eingesetzt werden. So wird zum einen nur die tatsächlich benötigte Menge des Endproduktes hergestellt, zum anderen wird das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen und damit die Ausbeute verbessert. Beides führt zur Schonung der Ressourcen Material, Zeit und Energie. Darüber hinaus können immer kompaktere und somit auch mobilere Geräte für die chemische Analyse realisiert werden.

In der **Synthesechemie** führt die Miniaturisierung zur Etablierung von Mikroreaktoren, also zu Reaktionsgefäßen mit langen und sehr dünnen Kanälen, in denen winzige Mengen der Reaktionspartner unter kontinuierlichem Durchfluss gemischt werden und reagieren können. Das Risiko eines Kontrollverlustes während einer Reaktion verringert sich dadurch beträchtlich. Vorteilhaft ist dies z.B. bei der Synthese gefährlicher chemischer Substanzen wie Sprengstoffen. Eine Herstellung im großtechnischen Maßstab ist durch das Parallel-schalten mehrerer Reaktoren trotzdem möglich.

Von besonderem Interesse ist der Einsatz von Mikroreaktoren auch in der Arzneimittelsynthese. So gelang hier vor kurzem eine Teilsynthese von Artemisinin, einem starken Wirkstoff gegen Malaria. Dessen Herstellung läuft über eine sehr reaktive Zwischenstufe, deren Handhabung im Mikroreaktor problemloser, sicherer und viel effektiver möglich ist als in einem großen Reaktionskolben. Mit bereits einem Reaktor können 200 g des

Mittels pro Jahr hergestellt werden, bei einer Gesamtzahl von 1500 Reaktoren ließe sich der Weltbedarf decken.

Eine andere medizinisch relevante Anwendung ist das sog. radioaktive Markieren von Radiopharmaka, die zur Diagnostik von Stoffwechselprozessen verwendet werden. Dabei ermöglichen Mikroreaktoren eine schnelle Produktion der Arzneien mit Hilfe sehr kurzer Reaktionszeiten und führen kaum zu radioaktiven Abfallprodukten. Die weitgehende Automatisierung minimiert zudem das Kontaminationsrisiko für den Synthesechemiker.

In der **analytischen Chemie** und der **Diagnostik** findet parallel zur Verkleinerung der Reaktionsgefäße eine Miniaturisierung von Messinstrumenten statt. Die Kombination dieser Trends führte zur Entwicklung von Lab-on-a-Chip-Systemen (LOC). Sie sind analog zu den Mikroreaktoren mit haarfeinen Kanälen ausgestattet, ermöglichen jedoch unterschiedlichste chemische oder physikalische Wechselwirkungen zwischen externer Probe und scheck-kartengroßem Chip. Ein LOC ist nach dem Baukastenprinzip aufgebaut und wird für jede Anwendung maßgeschneidert. Das Ergebnis kann abhängig vom Analyseverfahren entweder direkt auf dem Chip abgelesen werden oder von einem externen Analysemodul.

Interessante Einsatzmöglichkeiten für LOC sind z. B. Screening-Verfahren, bei denen eine Vielzahl an Einzelsubstanzen auf eine spezifische Eigenschaft hin überprüft wird. Hier reduziert der Umstieg von makroskopischen Experimenten auf Chips die Laborzeit aufgrund der kürzeren Reaktionszeiten und der simultanen Analyse vieler Proben von mehreren Wochen auf wenige Stunden. Außerdem wird so die Menge an benötigten Chemikalien signifikant reduziert.

Enorm zugenommen hat auch der Bedarf an Echtzeitinformationen durch komplexe chemische oder biochemische Analysen fernab einer ausgebauten Infrastruktur und etablierten, akkreditierten Laboren. So erleichtert die Entwicklung mobiler und robuster Analysemodule das Monitoring von unwegsamen und schwer zugänglichen Gebieten oder stark belebten Orten bezüglich Umweltverschmutzung oder CBRNE-Bedrohungen. Speziell das Anzeigen von unerwarteten oder unbekannten Gefahrstoffen soll von Chips mit zellbasierten Biosensoren ermöglicht werden. Sie identifizieren nicht eine Substanz oder einen Krankheitserreger direkt, sondern detektieren deren Auswirkungen auf Organismen.

Aber auch im Rahmen groß angelegter Messkampagnen, bei denen Daten von unterschiedlichsten Partnern und Messstationen verglichen werden müssen, kommen LOC zum Einsatz. So wurde z. B. für Langzeitstudien zur Quantifizierung der Säuregraddynamik in den Weltmeeren ein Mikrodurchflusssystem entwickelt, das an Bord von Schiffen automatisch hochpräzise und reproduzierbar pH-Werte bestimmt.

Insgesamt ist die Miniaturisierung chemischer Prozesse in den letzten zehn Jahren rasant fortgeschritten und wird sowohl in chemischen Laboren als auch im alltäglichen Leben in Zukunft immer präsenter werden. Insbesondere ist bereits mittelfristig mit immer effektiveren und verlässlicheren Systemen zu rechnen, die auch von Laien nutzbar sind. Dabei werden sowohl Mikroreaktoren als auch LOC bezüglich Kompaktheit, Robustheit und Präzision von den stetigen Neu- und Weiterentwicklungen in allen Technologiebereichen profitieren, aber ganz besonders durch zu erwartende Fortschritte in der Nanotechnologie. Als weiterer Entwicklungstrend ist die Automatisierung der üblicherweise aufwendigen Probenpräparation von z. B. Blut, Harn, Bodenschlämmen oder Lebensmitteln auf den Chips zu beobachten.

Die medizinische Diagnostik wird eine treibende Kraft bei der breiten Markteinführung von preiswerten LOC sein, die auf Smartphone-Zusatzkomponenten basieren. Bereits heute können Smartphones zu einfachen Mikroskopen oder Spektrometern aufgerüstet werden und so als Detektionseinheit dienen. Mikroreaktoren werden zunehmend Einzug in alle Bereiche der chemischen und pharmazeutischen Industrie halten. Aufgrund des technischen Entwicklungspotenzials wird es auch weiterhin ein Angebot an hochpreisigen maßgeschneiderten Spezialanwendungen geben. Andererseits ist der kommerzielle Vertrieb von mikrofluidischen Systemen inzwischen weit verbreitet und wird aufgrund der Konkurrenzsituation einen zusätzlichen Preisdruck im Bereich der Standardanwendungen erzeugen.

Dr. Diana Freudendahl, Dr. Heike Brandt, Dezember 2013

Beiträge aus 2014

Bioinspirierte reversible Haftsysteme	206
Kinodynamische Wegplanung	209
Big Data	212
Nanocellulose	215
Künstliche Spinnenseide	218
All-Electric-Aircraft	221
Metall-Luft-Batterien	224
Graphen	227
Deep Learning	230
Transkranielle Stimulation	233





Bioinspirierte reversible Haftsysteme

Wie in vielen Bereichen der bionischen Forschung stellt auch bei bioinspirierten reversiblen Haftsystemen die Komplexität der biologischen Vorbilder eine Herausforderung für die technische Umsetzung dar.

Im Laufe der Evolution haben Pflanzen und Tiere vielfältige hochspezifische Oberflächen entwickelt. Diese schützen die jeweiligen Organismen beispielsweise vor Verschmutzung (Lotus-Effekt) oder mechanischen Belastungen. Sie können aber auch einigen Organismen ermöglichen besonders gut an Materialien zu haften. Im Rahmen der verhältnismäßig jungen Forschungsdisziplin Bionik bietet die Analyse solcher optimierter biologischer Systeme eine Möglichkeit von der Natur zu lernen, um dadurch technische Oberflächen zu optimieren. Ein prominentes Beispiel im Bereich der bionischen Grundlagenforschung ist die Entwicklung von reversiblen Haftsystemen nach dem Vorbild der Gecko-Füße, z.B. für die Entwicklung von Laufrobotern, die an glatten Wänden empor laufen können.

Abhängig von der speziellen Funktion des Haftsystems gibt es in der Natur unterschiedliche **Haftprinzipien**, basierend z. B. auf Haken, Klemmen, Saugglocken oder biologischen Klebstoffen. Dazu kommen die trockene Adhäsion auf der Basis intermolekularer Kräfte („Van-der-Waals-Kräfte“) sowie die nasse Adhäsion, die auf sog. Kapillarkräften beruht. Langfristige Haftung (Minuten bis hin zu Tagen) wird maßgeblich mit Hilfe von mechanischem Verzahnen bzw. Verhaken, mit Saugglocken oder durch Klebstoffe erreicht. Kurzzeitige Haftung (Sekunden bis Minuten) hingegen basiert maßgeblich auf trockener Adhäsion. Diese Haftung kann teilweise zusätzlich durch nasse Adhäsion unterstützt werden.

Auch wenn das Prinzip der **trockenen Haftung** bei verschiedenen Arten zu finden ist, sind hier Geckos aufgrund ihrer herausragenden Haftstrukturen das prominenteste biologische Vorbild. So können sie senkrecht an polierten Glasscheiben hinauf laufen und dabei inner-

halb von Millisekunden zwischen starkem Anhaften und Ablösen umschalten. Ermöglicht wird ihnen dies durch eine ausgeklügelte Oberflächenstruktur an den Füßen. Jeder Fuß trägt dabei ca. 500.000 Haare, jedes davon ungefähr ein Zehntel so dick wie ein menschliches Haar. Die Enden dieser Haare weisen auf einer nächsten Hierarchieebene zusätzlich noch feinere Verzweigungen auf. Dieser Aufbau ist ausgesprochen flexibel und ermöglicht eine extrem gute Anlagerung und Haftung an einem Untergrund, und das unabhängig von dessen Mikrostruktur und chemischer Beschaffenheit. Theoretisch könnte ein Gecko, dessen Haare alle gleichzeitig in Kontakt mit einer Oberfläche stehen, bis zu 133 kg heben.

Der Mechanismus der trockenen Adhäsion ist für die Entwicklung von reversiblen Haftsystemen besonders attraktiv. Konventionell werden diese derzeit vornehmlich aus weichen, klebenden viskoelastischen Materialien hergestellt, um so den Kontakt mit einer Oberfläche bei Deformation zu verbessern. Beispiele sind Pflaster oder Haftnotizen. Dabei gibt es oftmals die Extreme, dass die Haftsysteme entweder stark und schwer zu entfernen oder sehr schwach und dementsprechend leicht zu entfernen sind. Zusätzlich verlieren sie teilweise nach häufiger, teils schon nach einmaliger Verwendung ihre Funktion. Ansprüche an zukünftige reversible Haftsysteme sind jedoch insbesondere das vielfache Anhaften und Ablösen an vielfältige Untergründe bei einer gleichzeitigen Erhöhung der Haftkraft und ihrer Zuverlässigkeit. Vorteil eines bioinspirierten Systems ist dabei, dass es auch nach häufigem Gebrauch seine Funktionalität nicht verliert (im Test bis zu 30.000 Mal), da es ausschließlich auf strukturellen und physikalischen Effekten beruht. Zusätzlich weist ein solches System selbstreinigende Eigenschaften auf und haftet nicht – wie konventionelle Systeme – an sich selbst.

Als potenzieller Markt sind vornehmlich biomedizinische **Anwendungsgebiete** wie beispielsweise im Bereich der Endoskopie und als Gewebekleber denkbar. Ebenfalls interessant scheint ein Einsatz bei der Ausrichtung und dem Transport von Wafern sowie bei **Laufrobotern**, die z. B. an Fassaden hinauf klettern sollen. Hier wurden bereits interessante Prototypen wie beispielsweise der sog. **Stickybot** vorgestellt. Dieser, mit strukturierten Polyurethan-Haftpads ausgestattete Laufroboter, ist bereits in der Lage an Glasscheiben empor zu laufen. Die Herstellung von Haftpads, die ähnlich fein strukturiert sind wie die Gecko Füße, ist jedoch bislang schwierig. So sind die eingesetzten Strukturen noch zu groß, um sich optimal an das Substrat anzulagern bzw. anzuhafsten. Dies bedeutet insbesondere Limitationen beim Robotergewicht. Zudem bedarf es weiterer Verbesserungen im Bereich der selbstreinigenden Eigenschaften.

Es gibt auch bereits **kommerzielle Ansätze**, die das Gecko-Haftprinzip technisch umsetzen. Dabei handelt es sich zumeist um mikrostrukturierte Polymere, die sich in der Größe, Form und Anordnung der Oberflächenstrukturen unterscheiden und damit versuchen die Struktur der biologischen Haare zu imitieren. Diese Ansätze kommen jedoch bei weitem noch nicht an das biologische Vorbild heran. Die Ursachen liegen in derzeit noch bestehenden Limitationen in der Fertigung der extrem feinen Verzweigungen. Während die Strukturen der Gecko-Füße aus vier Hierarchieebenen aufgebaut sind, weisen derzeitige bioinspirierte strukturierte Haftsysteme nur ein bis zwei Ebenen auf. Hier scheint die Dichte und Größe der Endstrukturen wichtig. Je größer die Endstrukturen sind, desto schwieriger ist eine enge Anlagerung der Strukturen an das Substrat und desto geringer sind die Haftkräfte. Im Prototypenstadium befinden sich darüber hinaus Systeme, die auf Kohlenstoffnanoröhren basieren. Diese sind im Prinzip in der Lage vier Mal so stark zu haften wie die Strukturen der Gecko-Füße.

Insgesamt wurden bereits sehr interessante bioinspirierte Prototypen für reversible Haftsysteme vorgestellt. Doch, wie in vielen Bereichen der bionischen Forschung, stellt auch hier die Komplexität der biologischen Systeme eine Herausforderung für die technische Umsetzung dar. Die meisten aktuellen bioinspirierten Tapes weisen noch deutlich geringere Haftkräfte auf als die traditionellen Tapes. So wird es voraussichtlich noch fünf bis zehn Jahre dauern, bis kostengünstige bioinspirierte reversible Haftsysteme in großem Maßstab hergestellt werden können.

Dr. Anna Schulte-Loosen, Januar 2014

Kinodynamische Wegplanung

Das herausragende Einsatzgebiet Kinodynamischer Wegplanung sind die zukünftigen autonomen Straßenfahrzeuge. Diese sollten sich bezüglich ihrer Trajektorie, also der gewählten Wegstrecke auf der Fahrbahn, und der Geschwindigkeit, mit der sie diese Wegstrecke entlang fahren, so verhalten, als würde ein Mensch am Steuer sitzen.

Unter Kinodynamischer Wegplanung versteht man Verfahren zur Wegplanung **autonomer unbemannter Systeme**. Gegenüber klassischen Methoden ermitteln sie nicht alleine einen kollisionsfreien Weg durch eine Umgebung mit Hindernissen (kinematische Randbedingung), sondern berücksichtigen entlang dieses Weges auch die physikalisch maximal möglichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen (dynamische Randbedingungen). Damit soll insbesondere die Aufgabe gelöst werden, für welche Kombination aus Geschwindigkeit und Bahnkurve sich die minimal mögliche Fahrtzeit ergibt, bei der das Fahrzeug gerade noch nicht unkontrolliert ausbricht.

Die Kinodynamische Wegplanung ist heute noch Gegenstand grundlagenorientierter Forschung. Langfristig soll sie dazu führen, dass autonome Systeme hinsichtlich ihrer Mobilität den von Menschen gesteuerten Fahrzeugen gleichwertig oder sogar überlegen sein können.

Allgemein ist die Wegplanung ein Bestandteil der Navigationsaufgabe jedes autonomen Fahrzeugs. Dazu gehören zunächst die Erfassung und Nutzung von Umgebungsdaten sowie die Selbstlokalisierung des Fahrzeugs in der Umgebung, die mit Hilfe der **bordeigenen Sensorik** erfolgen müssen. Anschließend folgen die eigentliche Wegplanung vom aktuellen Ort zu einem Zielpunkt mit Hilfe geeigneter **Rechenprogramme** und schließlich die Ausführung und Überwachung der Bewegung. Für einen kontinuierlichen autonomen Fahrbetrieb müssen diese Schritte in einem Echtzeitzyklus permanent durchlaufen werden. Dies setzt neben leistungsfähiger Sensorik auch eine entsprechende bordeigene Rechenkapazität voraus. Verfahren der kinodynamischen Wegplanung gehen darüber noch einmal hinaus und berücksichtigen auch dynamische Randbedingungen von Geschwindigkeit und Beschleu-

nigung. Dies erlaubt äußerst komplexe Fahr-, Lauf- oder Flugmanöver, die mit herkömmlichen Wegplanungsmethoden nicht zu erreichen sind.

Kinodynamische Wegplanung beinhaltet eine **planerische Komponente** – die vorausschauende Wegplanung („offline“) – und eine **reaktive Komponente** („online“) zur Kontrolle der Stabilität der Fahrzeugbewegung während der Ausführung. Sie stellt in Summe hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Algorithmen und Bordrechner, denn die ermittelte Route muss kollisionsfrei sein und die Trajektorie des Fahrzeugs entlang der Route muss den dynamischen Randbedingungen genügen. Außerdem soll die ermittelte Route optimal sein (z.B. kürzeste Strecke zum Ziel). Dafür müssen die Berechnungen zuverlässig und in Echtzeit erfolgen.

Kinodynamische Wegplanung ist für eine Vielzahl mobiler autonomer Systeme von Bedeutung. Für den Einsatz von kleinen unbemannten Flugsystemen bei Rettungseinsätzen oder anderen sicherheitsrelevanten Einsätzen kann sie eine Rolle spielen, wenn es darum geht, Zugang zu Räumen durch ansonsten unpassierbare Engstellen zu erhalten. Auch für allgemeine robotische Systeme mit Manipulatoren (Industrierobotik, Servicerobotik) ist sie von Bedeutung.

Das herausragende Einsatzgebiet Kinodynamischer Wegplanung sind jedoch die **zukünftigen autonomen Straßenfahrzeuge**. Hier besteht eine Kernaufgabe darin, eine konfliktfreie Fahrt im regulären Straßenverkehr so zu gewährleisten, dass autonome Fahrzeuge bezüglich ihrer Bewegungsprofile nicht mehr von bemannten Fahrzeugen zu unterscheiden sind. Das bedeutet, sie sollten sich bezüglich ihrer Trajektorie, also der gewählten Wegstrecke auf der Fahrbahn, und der Geschwindigkeit, mit der sie diese Wegstrecke entlang fahren, so verhalten, als würde ein Mensch am Steuer sitzen. Die oftmals unbewusste Entscheidung eines Menschen, in der einen oder anderen Weise auf das Fahrzeug einzuwirken, basiert auf teils sehr subtilen Informationen, die in einer komplexen Prozesskette verarbeitet werden. Unter Berücksichtigung einer Fülle von visuellen, akustischen und vestibulären Sinnesindrücken wird kontinuierlich eine für die aktuelle Situation in der Umgebung und die Absichten des Fahrers zu präferierende Verhaltensweise abgeleitet und nahezu verzugslos aktorisch umgesetzt. Diese humanen Fertigkeiten und Fähigkeiten in einem elektronischen System nachzubilden, ist die gegenwärtige ultimative Herausforderung für den Bau autonomer Fahrzeuge.

Insbesondere müssen Informationen über die Beschaffenheit der vorausliegenden Fahrbahn ermittelt werden, um etwa eine Abschätzung des Reibungskoeffizienten einer Fahrbahn vornehmen zu können. Eine Kurve ist jeweils anders zu durchfahren, wenn die Fahrbahn trocken, nass, verschneit oder gar vereist ist. Ein kleiner Streifen Laub oder etwas Split auf der Fahrbahn sind ebenso von Bedeutung. Aber auch Bodenwellen, Schlaglöcher oder ein den effektiven Kurvenradius beschränkendes Hindernis, zum Beispiel ein entgegenkommender Motorradfahrer, der sich schräg in die Kurve legt, sind Parameter, die Einfluss auf die kinodynamischen Randbedingungen nehmen. Die Klassifikation des vorausliegenden Terrains mittels Sensordaten und Algorithmen ist die zentrale Voraussetzung für die Lösung der damit zusammenhängenden Probleme.

Die in den letzten Jahren zunehmende Zahl an **Fahrerassistenzsystemen** zur vorausschauenden Gefahrenerkennung in bemannten Fahrzeugen adressiert bereits viele Teiltechnologien, die für kinodynamische Wegplanung benötigt werden. Was heutige Serienfahrzeuge nicht leisten können, ist eine Vorausplanung des Weges auf Basis bordeigener Sensordaten. Ebenfalls fehlt die Fähigkeit, Grenzsituationen, in denen das Fahrzeug den sichereren Kontakt zur Fahrbahn verlieren könnte, rechtzeitig vorauszusehen. Aufgrund der vielfältigen diesbezüglichen Bemühungen der Automobilindustrie kann hier mit der Entwicklung entsprechender Methoden und Sensortechnologien gerechnet werden.

Erste Prototypen, die Rennstrecken in den USA absolviert haben, reichen unter den hier herrschenden kontrollierten Bedingungen schon an dem Menschen vergleichbare Fahrleistungen heran. In handelsüblichen Fahrzeugen werden diese Fähigkeiten aber wohl erst ab Mitte des nächsten Jahrzehnts verfügbar werden, zunächst dann beschränkt auf gewisse Einsatzumgebungen, wie zum Beispiel Autobahnen.

Dr. Guido Huppertz, Februar 2014

Big Data

Die zur Nutzbarmachung der zunehmenden Datenberge notwendigen neuen Verfahren und Technologien firmieren unter dem Begriff Big Data. Bei allen Chancen sind damit aber auch Risiken verbunden, insbesondere im Bereich des Datenschutzes.

Das Volumen aller weltweit in einem bestimmten Zeitraum produzierten Daten verdoppelt sich heute ungefähr alle zwei Jahre. Die mit der Nutzbarmachung der entstehenden Datenberge zusammen hängenden Aspekte firmieren unter dem Begriff Big Data und sind wesentlich dadurch gekennzeichnet, dass die betreffenden Daten mit herkömmlichen Methoden nicht mehr sinnvoll verarbeitet werden können und daher neue Verfahren und Technologien zu ihrer Verarbeitung notwendig sind. Dabei ändern sich die zu betrachtenden Informationsmengen mit wachsendem technischen Fortschritt. So denkt man im Zusammenhang mit Big Data heute typischerweise an Datenmengen im Bereich von Peta- bzw. Exabyte (10^{15} bzw. 10^{18} Byte), wobei davon auszugehen ist, dass innerhalb der nächsten Jahre die Grenze zu Zettabyte (10^{21} Byte) überschritten wird.

Neben der reinen Menge (Volume) rücken neuerdings vermehrt auch die Geschwindigkeit (Velocity), die Vielfalt (Variety) und darüber hinaus auch noch die Nützlichkeit (Value), die Komplexität (Complexity) sowie die Vollständigkeit bzw. Richtigkeit (Veracity) der Daten in den Fokus der Betrachtungen. Alle diese Aspekte zusammen charakterisieren inzwischen das Feld Big Data. Im Fokus stehen dabei insbesondere unstrukturierte Daten, wie z.B. Text-, Audio- und Videodaten, die insbesondere beim Online-Handel, in sozialen Netzwerken, bei Internet-Suchmaschinen sowie beim zunehmenden Einsatz von Überwachungssensoren generiert werden.

Eine wesentliche Technologie von Big Data ist die **parallele Verarbeitung von Daten**. Seit einiger Zeit gebräuchlich ist das sog. MapReduce-Verfahren, das die Firma Google 2004 vorgestellt hat. Dabei werden die zu bearbeitenden Daten auf die einzelnen Rechner

eines sog. Computer Clusters verteilt und dort parallel verarbeitet. Eine weit verbreitete Open-Source-Implementierung von MapReduce stellt Hadoop von der Firma Yahoo dar, für das aktuell technologische Verbesserungen entwickelt werden. Eine viel diskutierte und bislang offene Fragestellung ist, welche Probleme aus dem Bereich Big Data überhaupt für MapReduce bzw. Hadoop zugänglich sind.

Bei der Erkenntnisgewinnung aus dem umfangreichen Datenmaterial wird man sich verstärkt auf geeignete Methoden der Visualisierung abstützen, die die hochentwickelten Fähigkeiten des Menschen bei der **Mustererkennung** nutzen. Der Auffindung von Mustern in großen Datenbeständen durch Anwendung bestimmter statistischer Verfahren dient weiterhin das sog. Data Mining, bei dem Verfahren der sog. Künstlichen Intelligenz zum Einsatz kommen werden. Innerhalb des Data Minings wird das Auffinden von Mustern in kontinuierlichen Datenströmen (Data Stream Mining), in Freitexten (Text Mining) und in semistrukturierten Daten (Graph Mining) immer wichtiger sein. Beim Text Mining wird die automatische Verarbeitung von in natürlicher Form vorliegender Sprache, das Natural Language Processing, eine Schlüsselstellung einnehmen.

Ein besonderes Interesse bei der Auswertung von Datenmengen besteht in der Erkennung von Mustern, die zukünftige Entwicklungen bzw. zukünftiges Verhalten, wie z. B. das Käuferverhalten, voraussagen. Diese Analysemethoden werden als **Predictive Analytics** bezeichnet und im Zusammenhang mit Big Data deutlich an Bedeutung gewinnen. Aufgrund der Vielzahl der bei Big Data vorliegenden Daten ist zu erwarten, dass die hiermit generierten Voraussagen zutreffender sein werden als bei schmaler Datenbasis. Eine interessante Technologie für Big Data stellt auch das **Complex Event Processing** (CEP) dar, bei dem aus den vorliegenden Daten einzelne Ereignisse abgeleitet werden und innerhalb dieser Ereignisse nach komplexen Zusammenhängen gesucht wird.

Von großem Interesse ist bei Big Data das umfangreiche aus sozialen Netzwerken stammende Datenmaterial. Daher wird die Bedeutung und Leistungsfähigkeit geeigneter Verfahren zur Analyse dieser Daten (**Social Network Analysis**) deutlich zunehmen.

Sowohl im **unternehmerischen als auch im öffentlichen Bereich** kann Big Data die Entscheidungsfindung unterstützen. In Unternehmen kann Big Data neue Geschäftsideen bzw. Produkte oder Vorschläge für Produktverbesserungen generieren. Ebenso können Geschäfts- und Produktionsprozesse verbessert werden. Stark profitieren dürfte vor allem

der Bereich Marketing und Vertrieb. Im öffentlichen Bereich kann die Abstützung auf große Datenmengen unter anderem bei der Städteplanung sowie einem Verkehrsmanagement, das auf aktuelle Ereignisse sofort reagiert, erfolgreich sein. Im Gesundheitswesen kann Big Data einerseits bevorstehende Pandemien zu erkennen helfen und andererseits den Übergang zu einer präventiven Medizin weisen.

Einen sehr großen Beitrag verspricht Big Data für den **wehr- und sicherheitstechnischen Bereich**. Die Auswertung großer Datenmengen, insbesondere aus sozialen Netzwerken, wird bei der Kriminalitätsbekämpfung, speziell der Terrorismusabwehr, als erfolgversprechend angesehen. Zur Erhöhung der IT-Sicherheit kann Big Data bei der Erkennung von Angriffen auf Netzwerke (Network Attack Monitoring) gewinnbringend eingesetzt werden. Auch darüber hinaus ergeben sich vielfältige wehrtechnische Anwendungsmöglichkeiten für Big Data. So kann die Aufbereitung von Daten innerhalb der Vernetzten Operationsführung (NetOpFü) deutlich verbessert werden, insbesondere im Hinblick auf die Generierung eines gemeinsamen, rollenbasierten Einsatzlagebildes (GREL). Im militärischen Sanitätswesen schließlich kann Big Data die Leistungsfähigkeit der Überwachung des Soldaten im Einsatz (War Fighter Monitoring) stark verbessern.

Bei allen Chancen sind mit Big Data aber auch Risiken verbunden, die durchaus zu reglementierenden Eingriffen und damit zu einer Verlangsamung der Entwicklungsgeschwindigkeit führen könnten. Dabei liegen die Möglichkeiten des Missbrauchs insbesondere im Bereich des Datenschutzes. Abhilfe könnten hier sog. Anonymisierungsverfahren schaffen, die persönliche Daten in eine große Menge anderer Daten integrieren, so dass die Privatsphäre des Einzelnen gewahrt bleibt. Die Entwicklung solcher Verfahren ist derzeit jedoch noch eine offene Forschungsfrage.

Thomas Euting, März 2014

Nanocellulose

Allen Formen von Nanocellulose ist gemein, dass ihre Herstellung auf biologischen Ausgangsstoffen basiert. Trotzdem weisen sie erstaunliche Eigenschaften auf, die man eher bei chemisch-synthetischen Hightech-Materialien erwarten würde.

Cellulose ist das häufigste Strukturmaterial in Pflanzen und findet sich direkt oder in Form von so genannten Cellulosederivaten auch in wichtigen Industrieprodukten wieder. Das Spektrum ihrer technischen Nutzung reicht vom Papier über Kleister bis hin zu Filtermaterialien oder Sprengstoffen. Aktuell richtet sich das Interesse auf drei neue Arten von Cellulose, die alle als Nanocellulose bezeichnet werden. Von diesen Materialien verspricht man sich besonders anspruchsvolle Anwendungsmöglichkeiten im Hochtechnologiebereich. Ihre Herstellung ist bisher allerdings erst in Pilotanlagen möglich.

Die so genannte **mikrofibrillierte Cellulose (MFC)** lässt sich durch Hochdruckhomogenisierung von Holzstoff bei hohen Temperaturen herstellen. Sie besteht aus Cellulosefasern variabler Länge (0,1 bis mehrere Mikrometer) und einem Durchmesser von 5 bis 60 Nanometern. In Wasser bilden schon geringe Konzentrationen von MFC sehr feste Gele. Aus diesen Gelen lassen sich transparente, sehr reißfeste Folien herstellen. Die wichtigste Anwendung von MFC ist jedoch als Zusatzstoff in Papier und Kunststoffen, um deren mechanische Stabilität zu verbessern. Diese Anwendung ist für Kunststoffe aus biologischen Ausgangsmaterialien (z. B. Stärkeschäume) besonders interessant, da MFC ebenfalls aus einem Naturstoff gewonnen wird und damit den „Bio-Charakter“ nicht verfälscht. Weitere Einsatzgebiete gibt es z. B. als umweltfreundliche Bohrhilfsmittel in der Erdölindustrie. Da der ursprüngliche Herstellungsprozess von mikrofibrillierter Cellulose sehr energieaufwändig ist, wird derzeit intensiv an der Kommerzialisierung von effizienteren Verfahren gearbeitet.

Nanokristalline Cellulose (NCC) wird durch partielle Hydrolyse von klassischer Cellulose hergestellt. Ihre als „Whisker“ bezeichneten Fasern haben ähnliche Abmessungen wie die

Fasern in MFC. Im Gegensatz zu MFC-Fasern bestehen sie jedoch fast ausschließlich aus kristalliner Cellulose. Im Allgemeinen wird NCC durch chemische Umsetzungen modifiziert, um Suspensionen in verschiedenen Lösungsmitteln zu ermöglichen. Stabile Suspensionen sind einerseits interessant, da sie Eigenschaften von Flüssigkristallen haben, andererseits stellen sie wichtige Zwischenprodukte bei der Verarbeitung von NCC dar. Durch ihre hohe mechanische Stabilität eignen sich die NCC-Whisker sehr gut als verstärkende Zusätze in Polymermaterialien. Typische Produkte sind hochreißfeste transparente Filme (z. B. als Grundlage für flexible Displays) und sehr leichte, aber dennoch stabile Aerogele (z. B. als Strukturelemente und zur thermischen Isolierung). Darüber hinaus ist NCC als Bestandteil von leichter Körperpanzerung und schussicherem Glas interessant. Auf dem amerikanischen Kontinent entstehen gerade die ersten Pilotanlagen für die industrielle Herstellung von NCC.

Bakterielle Nanocellulose (BNC) wird durch die biochemische Polymerisation von niedermolekularen Bausteinen (z. B. Traubenzucker) erhalten. Typische Faserdurchmesser sind hierbei 20 bis 100 Nanometer. BNC ist ein fest geknüpftes Netz aus unterschiedlich langen Fasern. Die einzelnen Fasern des Polymernetzes sind hochkristallin (80 bis 90 %) und ähnlich fest wie Stahl oder Aramidfasern (z. B. Kevlar®). Durch die Wahl der zur Herstellung eingesetzten Mikroorganismen (zumeist Essigsäurebakterien) und der verwendeten Umgebungsparameter können die Eigenschaften der Fasernetze gezielt beeinflusst werden. Auch die Form des im ersten Prozessschritt gebildeten Polymergels (in der Regel über 99 % Wassergehalt) kann durch die Art des Bioreaktors gesteuert werden. Diese primär gebildeten Polymergelkörper können direkt genutzt (z. B. als Implantate) oder getrocknet werden (z. B. für wasserbindende Wundauflagen). Häufiger werden jedoch weitere Prozessschritte angeschlossen, z. B. um das primäre Netzwerk als Matrix für den Aufbau von Verbundwerkstoffen zu nutzen.

In der Medizin wird BNC vor allem im Zusammenhang mit Implantaten und Wundauflagen diskutiert. Implantate aus BNC sind ungiftig und rufen keine Abstoßungsreaktionen hervor. Durch ihre Ähnlichkeit mit menschlichen Kollagennetzwerken verwachsen sie sehr gut mit körpereigenen Strukturen. Typischerweise werden BNC-Implantate daher als 3D-Schablonen für die Neubildung von menschlichem Gewebe verwendet (z. B. für Blutgefäße). Wundauflagen aus BNC werden vor allem für die Therapie chronischer Verletzungen und zur Abdeckung von Brandwunden entwickelt. Sie müssen aufgrund ihrer guten Verträglichkeit und hohen Wasseraufnahmefähigkeit seltener als andere Verbände gewechselt werden. Zusätzlich können keimtötende Silbernanopartikel eingelagert werden.

Auch die industrielle Synthese von BNC in Bioreaktoren ist derzeit auf dem Stand von kleinen Pilotanlagen. Eine neuere Entwicklung ist die Herstellung durch Kulturen von genetisch modifizierten Cyanobakterien („Blaulalgen“). Diese sind in der Lage, den als Ausgangsstoff benötigten Traubenzucker durch Photosynthese aus Kohlendioxid und Wasser zu erzeugen. Damit könnten sie in Zukunft die großtechnische Herstellung von BNC unter Nutzung von Sonnenlicht erlauben.

Allen drei Formen von **Nanocellulose** ist gemein, dass ihre Herstellung auf biologischen Ausgangsstoffen basiert. Trotzdem weisen sie erstaunliche Eigenschaften auf, die man eher bei chemisch-synthetischen Hightech-Materialien erwarten würde. Der biologische Ursprung und die gute Verfügbarkeit der Ausgangsmaterialien lassen vor allem bei MFC und NCC in näherer Zukunft eine Massenproduktion zu günstigen Preisen erwarten. Bei diesen beiden Formen der Nanocellulose gibt es mit der Holz- und Papierindustrie bereits eine industrielle Basis mit großer Finanzkraft und einem hohen Interesse an der Produktion hochwertigerer Celluloseprodukte. BNC ist noch weiter von großen Produktionsvolumen entfernt. Hier werden die nächsten Jahre zeigen, ob sich dieses neue Material sowohl hinsichtlich des Preises als auch in der Verwendbarkeit gegen konkurrierende Stoffe (wie z. B. Carbonfasern oder Graphen) durchsetzen kann.

Dr. Joachim Burbiel, April 2014

Künstliche Spinnenseide

Im Hinblick auf die mechanische Belastbarkeit übertrifft Spinnenseide alle derzeit bekannten synthetischen Fasern.

Spinnenseide ist ein seit Jahrtausenden vom Menschen begehrtes Material. Bereits in der Antike diente sie aufgrund ihrer entzündungshemmenden und antiallergenen Eigenschaften als Wundverband für Hautverletzungen. Zudem zeichnet sie sich durch ihre extreme mechanische Belastbarkeit aus. Darin übertrifft sie, je nach Fadenart, alle derzeit bekannten synthetischen Fasern, wie z.B. Nylon®, Kevlar® oder auch Kohlefasern. Bisher ist natürliche Spinnenseide jedoch aufwendig in der Gewinnung und daher teuer. Eine langfristig günstigere Alternative könnte die Produktion künstlicher Spinnenseide darstellen, die mit Hilfe der Erkenntnisse aus Biotechnologie und Genetik schon in prototypischen Kleinanlagen hergestellt werden konnte. Die großtechnische industrielle Produktion von Spinnenseide wird jedoch frühestens in einigen Jahren möglich sein.

Spinnenseide kann als eine Art **Kompositmaterial** bezeichnet werden, welches hauptsächlich aus Proteinen aufgebaut ist. Je nachdem von welcher Spinne sie stammt und welche Funktion sie erfüllt, variiert sie in ihrer Chemie und Struktur. So gibt es beispielsweise unterschiedliche Seiden für Kokons, Netze oder Abseilfäden. Die Struktur der Proteine ist dabei entscheidend. Seide, deren Proteine hauptsächlich faltblattartig zusammen gelagert sind, ist tendenziell sehr stabil und unflexibel. Seide hingegen, deren Proteine vornehmlich spiralförmig zusammen gelagert sind, hat einen deutlich höheren elastischen Anteil. Das Mischungsverhältnis der enthaltenen Proteine entscheidet schließlich über die makroskopischen Eigenschaften der Seide.

Eines der bekanntesten Beispiele für den Einsatz verschiedener Seiden sind die natürlichen Radnetze, die dem Beutefang der Spinnen dienen. Sie enthalten im Wesentlichen zwei

Seidenarten. Die Rahmenkonstruktion und die Speichen der Netze bestehen aus einer sehr stabilen Art, die wenig dehnbar ist. Die Fangspiralen, die zwischen der Rahmenkonstruktion aufgespannt sind, bestehen hingegen aus einer extrem dehnbaren und trotzdem reißfesten Seide.

Zur **biotechnologischen Produktion** künstlicher Spinnenseide gibt es verschiedene Ansätze. In jedem Fall werden die relevanten Seidenproteinogene der Spinnen in andere Organismen eingeführt und dort exprimiert, d. h. abgerufen. Diese sogenannten transgenen Organismen sind damit in der Lage Spinnenseidenproteine zu produzieren. Neben Bakterien und Hefen wurden dafür bereits Pflanzen-, Säuger- oder Insektenzellen genutzt bzw. angedacht.

Die Einführung von natürlichen Spinnengenen beispielsweise in Bakterien führt jedoch zu einer ineffizienten Produktion von Spinnenseidenproteinen, da manche Abschnitte auf den Spinnengenen, sogenannte Codons, nicht effizient von den Bakterien „gelesen“ werden können. Daher wurden mit Hilfe von Klontechniken künstliche Gene erzeugt, die an den jeweiligen Wirt (hier z. B. Bakterien) angepasst sind. Durch ein solches Designen von Genen kann die Ausbeute an Spinnenproteinen verbessert werden. Zudem können dadurch Proteine und somit Seiden individuell maßgeschneidert werden, um z. B. eine verbesserte Festigkeit oder Flexibilität zu erreichen. Dabei entsteht schließlich die sogenannte rekombinante Spinnenseide. Verschiedene Ansätze versuchen zudem die Eigenschaften der Spinnenseide durch Einlagerung von Metallatomen weiter zu verbessern. So erwiesen sich mit Metallen infiltrierte Seidenfäden in ersten Versuchen um den Faktor 10 belastbarer, gleichzeitig aber auch dehnbarer als die Versionen ohne metallische Einlagerungen.

Die eigentlichen Seidenfäden werden von der Spinne in ihrer Spinndrüse aus den Seidenproteinen hergestellt. Dabei wird der Proteinlösung u. a. schrittweise Wasser entzogen, sodass sich die wasserabweisenden Abschnitte der Proteine zusammenlagern. Weiterhin wird die Fadenbildung durch die Scherkräfte unterstützt, die beim „Herausziehen“ des Fadens entstehen. Entsprechend müssen auch die künstlich hergestellten Seidenproteine noch zu nutzbaren Anwendungsformen weiter verarbeitet werden. Das ist die wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung von Produkten aus künstlicher Spinnenseide. Angedacht ist die Herstellung von Seidenproteinfilmen und -kugeln, Nano- und Mikrofasern, Schäumen oder Gelen, aus denen dann nutzbare Materialien erzeugt werden können. Gerade die Herstellung von Fäden aus künstlicher Spinnenseide stellt eine besondere Herausforderung dar und wird derzeit in ersten Pilotanlagen realisiert.

Das **Anwendungspotenzial** für Materialien aus und mit Spinnenseide wird grundsätzlich als sehr hoch angesehen. Es ist zu erwarten, dass in erster Linie im Bereich der biomedizinischen Materialen Produkte erhältlich sein werden. So ist der Einsatz von Spinnenseide beispielsweise im Bereich der Wundabdeckung, als Operationsfäden, bei der Herstellung von künstlichen Knorpeln und Sehnen, medizinischen Tapes oder chirurgischen Netzen denkbar.

Weitere Anwendungsfelder sind bei der industriellen Herstellung von kommerziellen Produkten wie Textilien, Kosmetika, Taschen, Seilen oder Klebematerialien denkbar. Auch könnten Spinnenseiden prinzipiell als Oberflächenbeschichtungen eingesetzt werden, um so Automobil- und Flugzeugteile zu veredeln, Lederprodukte zu schützen oder Papier zu verstärken.

Ein äußerst interessantes Feld könnte zudem die Optimierung von ballistischer Schutzkleidung sein. Gerade hier könnten neue Konzepte, die Spinnenseide mit einbeziehen, möglicherweise leichtere und flexiblere Alternativen zu den gängigen Materialien darstellen. Hier wäre eine Kombination von Spinnenseide und Keramiken denkbar. Auch zur Herstellung von Fallschirmen könnte sich Spinnenseide eignen. Mit Hilfe von künstlicher Spinnenseide könnten diese Materialien zukünftig bezahlbar werden.

Das Marktpotenzial für künstliche Spinnenseide erscheint also sehr groß. Mit Hilfe von biotechnologischen Methoden können im Idealfall rekombinante Spinnenseiden mit angepassten und im Vergleich zu den natürlichen Varianten noch verbesserten Funktionen für die unterschiedlichsten Anwendungsfelder generiert werden. Erste Produkte sind in der Kommerzialisierungsphase und könnten daher in etwa drei bis fünf Jahren in Form von medizinischen und technischen Faserprodukten auf den Markt kommen.

Dr. Anna Schulte-Loosen, Mai 2014

All-Electric-Aircraft

Regionalflugzeuge und kleinere Transporter mit Batterieantrieb könnten bereits in etwa 25 Jahren machbar sein.

Zunehmende Umweltauflagen und steigende Kraftstoffpreise haben in der Luftfahrtindustrie zu Überlegungen geführt, die über die graduellen Fortentwicklungen der Triebwerkseffektivitäten durch thermodynamische Verbesserungen der Verbrennungskraftmaschinen und effektivere Fanantriebe hinausgehen. Hier steht zunächst die zunehmende Nutzung elektrischer Aktoren als Ersatz für bisher pneumatisch oder hydraulisch betriebene Stellantriebe an Bord von Flugzeugen im Mittelpunkt. Diese Entwicklung ist bei der Realisierung sog. More-Electric-Aircraft bereits relativ weit fortgeschritten. In All-Electric-Aircraft soll schließlich auch noch der Vortrieb auf der Nutzung elektrischer Energie basieren. Dafür gibt es verschiedene Ansätze, die bis hin zur Versorgung der Elektromotoren aus an Bord mitgeführten Batterien reichen. Derartige Konzepte sollten langfristig sogar für Passagier- und Transportmaschinen im Regionalverkehr realisierbar sein.

In More-Electric-Aircraft wird die erforderliche elektrische Energie z.B. durch vergrößerte Generatoren oder auch durch zusätzliche Brennstoffzellen-Anlagen an Bord erzeugt. Prototypisch realisiert werden konnte z.B. bereits das elektrische Bewegen eines Passagierflugzeugs am Boden (Taxiing). Dabei erhielt das Bugrad einen Elektromotor, der von einer Brennstoffzelle mit Strom versorgt wurde und so den Kraftstoffverbrauch für das Rollen am Boden deutlich senken konnte.

Der Vortrieb von All-Electric-Aircraft erfolgt durch (möglicherweise ummantelte) Propeller oder Fans, die von Elektromotoren angetrieben werden. Als Energiequellen hierfür kommen neben Vollhybridn auch Brennstoffzellen oder im Prinzip sogar Solarzellen in Frage. Von besonderem Interesse ist die Nutzung nachladbarer Batterien für die Stromversorgung.

Vollhybridantriebe für Flugzeuge werden auf Verbrennungskraftmaschinen (insb. Gasturbinen) mit nachgeschalteten Generatoren basieren. Sie verbrennen weiterhin Kohlenwasserstoffe, allerdings kann die Gasturbine dabei ständig im optimalen Betriebspunkt arbeiten und an einem beliebigen Ort im Flugzeug untergebracht werden. Leistung und Reichweite des Antriebs werden durch den Kraftstoffvorrat bestimmt, so dass auch große Maschinen für große Reiseentfernungen gebaut werden können. Mit einer Verbreitung derartiger Vollhybride in der kommerziellen Luftfahrt kann in ca. 40 Jahren gerechnet werden. Erste Prototypen sehr kleiner Maschinen konnten bereits realisiert werden.

Brennstoffzellen liefern zwar abgasfrei Strom, sind aber zu voluminös, wenn größere Leistungen abgegeben werden müssen, wie dies Passagier- und Transportmaschinen erfordern. Das optimale Brennstoffzellen-Verfahren mit gekühltem, verflüssigtem Wasserstoff erfordert obendrein eine eigene Logistik sowie gekühlte Druckbehälter an Bord. Brennstoffzellen werden also auch auf absehbare Zeit eher Energiequellen für Hilfsantriebe an Bord sein.

Möglicherweise auf der Außenhaut angebrachte **Solarzellen** werden auch in Zukunft nicht genügend Energie für den Antrieb schwerer Maschinen liefern können. Sie kommen lediglich für Ultraleichtanwendungen, wie z.B. Aufklärungs-Höhenplattformen, in Frage.

Batterien können im Prinzip ausreichende elektrische Leistungen (Energie pro Zeit) zur Verfügung stellen. Problematisch ist allerdings ihre bisher zu geringe gewichtsbezogene Energiedichte. Sollte es gelingen, diese um mehr als das Fünffache zu steigern, wären „Single Aisle“ Passagiermaschinen (mit Standardrumpf) für den Regionalverkehr (ca. 100 Passagiere und ca. 500 km Reichweite) mit Batterieantrieb möglich. Eine entsprechende Entwicklung der Batterietechnik wird für die nächsten beiden Jahrzehnte erwartet. Das Problem der zeitraubenden Aufladung der Batterien wäre durch Austausch von Batterie-einschüben und deren Aufladung am Boden lösbar.

Der Übergang zum All-Electric Aircraft hängt auch wesentlich von der Qualität der elektrischen Wandler (Generatoren und Motoren) ab. Hier sind bürstenlose und damit verschleißarme permanenterregte Motoren bzw. Generatoren die beste Lösung. Wesentlich ist auch der Einsatz von **Hochtemperatursupraleitern**, da konventionelle elektrische Leiter Gewichtsprobleme aufwerfen. Hier existieren bereits im Prinzip geeignete technische Lösungen.

Derzeit kommen auf Hochtemperatursupraleitern basierende Motoren auf den Markt. Zukünftig sollen diese sogar die massebezogene Leistung von Gasturbinen übertreffen.

Da es schwierig ist, mit rein elektrischen Propeller- oder Fanantrieben die Leistungsdichten großer konventioneller Flugtriebwerke zu erreichen, werden All-Electric-Aircraft möglicherweise anders aussehen als herkömmliche Flugzeuge. Die in diesem Zusammenhang zu ergreifenden technischen Maßnahmen wären im Prinzip bereits heute realisierbar. So wird es bei dieser neuen Art von Flugzeugen zum einen darauf ankommen, die **Auftriebsleistung der Flugzeugstruktur** insgesamt zu verbessern. Dies führt z. B. zu anderen Flügelkonfigurationen, wie Box-Wing-Flügeln (quasi eine moderne Doppeldecker-Variante), oder zu Wing-in-Body-Konfigurationen, wo durch den gleichmäßigen Übergang der Flügel in den breiten Rumpf auch der Rumpf zum Auftrieb beiträgt.

Besonders bedeutsam wird in diesem Zusammenhang der Übergang zu stärker **verteilten Antrieben** sein. Heutige Flugzeuge beschränken sich auf meist nur zwei oder vier Triebwerke. Von Elektromotoren angetriebene, ummantelte Propeller oder Fans könnten in größerer Zahl als heute über die Struktur verteilt angebracht werden. Der aerodynamische Vorteil hierbei ist, dass der von ihnen erzeugte Luftstrom nicht wesentlich schneller als die Fluggeschwindigkeit ist, insgesamt aber einen großen Massendurchsatz aufweist. Gleichzeitig wäre ein solcher Antrieb auch leiser.

Spätestens langfristig ist also mit einer Verbreitung von All-Electric-Aircraft zu rechnen. So könnten Regionalflugzeuge und kleinere Transporter (7,5 bis 10 t Zuladung) mit Batterieantrieb bereits in etwa 25 Jahren machbar sein. In ca. 40 Jahren kann mit Vollhybridantrieben auch für große Langstreckenmaschinen gerechnet werden. Wo extreme Antriebsleistungen erforderlich sind, wie bei Kampfflugzeugen, werden aber auch weiterhin Turbinentriebwerke erforderlich bleiben.

Wolfgang Nätzker, Juni 2014

Metall-Luft-Batterien

Elektrisch wieder aufladbare Metall-Luft-Batterien könnten bereits in einem bis zwei Jahrzehnten auf dem Markt zum Durchbruch kommen. Dies würde einen großen Schub für die Elektromobilität bedeuten und hätte entsprechende Auswirkungen auf den gesamten Energiemarkt.

Der zukünftige Nutzungsgrad der elektrischen Energieform insbesondere im Bereich der Mobilitätsanwendungen wird wesentlich von der Entwicklung deutlich verbesserter elektro-chemischer Energiespeicher abhängen. Besondere Fortschritte erwartet man sich hier von wieder aufladbaren Metall-Luft-Batterien. Bei diesen wird die elektrische Energie durch die chemische Reaktion von Metallen mit Sauerstoff freigesetzt. Damit nehmen sie unter den Batterien eine Sonderstellung ein, da der Reaktionspartner Sauerstoff über eine spezielle Elektrode aus der Umgebungsluft gewonnen wird und somit nicht in der Batterie vorgehalten werden muss. Daher lassen sich mit diesen Systemen prinzipiell deutlich höhere Speicherdichten realisieren als mit bisherigen Batterietypen. Derzeit befinden sich diverse Typen von Metall-Luft-Batterien in der Entwicklungsphase, die jeweils auf unterschiedlichen Metallen basieren.

Heute bereits eingesetzte Metall-Luft Batterien sind im Gegensatz z. B. zu den bekannten Lithium-Ionen-Batterien nicht wieder aufladbar. Dazu gehören die Zink-Luft-Batterien, die mit ihrer hohen Speicherdichte die ideale Stromversorgung für Hörgeräte bieten, wo sie im Permanentbetrieb nur geringe Leistungen abgeben müssen.

Eine prinzipielle Möglichkeit zur Wiederaufladung von Metall-Luft-Batterien wäre das mechanische Ersetzen des verbrauchten Metalls, derartige Systeme haben sich aber bislang nicht durchsetzen können. Dies liegt vor allem im logistischen Aufwand begründet, denn die verbrauchten Metallelektronen müssten ersetzt und das in der chemischen Entladereaktion verbrauchte Metall recycelt werden.

Aus Gründen der Praktikabilität und der Ressourcenschonung zielen weltweite Forschungsanstrengungen heute darauf ab, die chemische Reaktion in Metall-Luft-Batterien reversibel zu machen, um so zu **elektrisch wieder aufladbaren Systemen** zu kommen. Die diesbezüglichen Forschungsanstrengungen waren für viele Jahre ins Stocken geraten, da einerseits die technologischen Hürden sehr hoch waren und andererseits die aufkommenden Lithium-Ionen-Batterien bereits sehr deutliche Steigerungen bei der Speicherdichte mit sich brachten. Allerdings lassen sich mit den so erreichten Batterieleistungen die Ansprüche aus den Bereichen Elektromobilität und Strompufferung in einem Netz mit weiter zunehmendem Anteil an regenerativer Energiegewinnung nicht erfüllen. Daher wird derzeit parallel an unterschiedlichen Metall-Luft-Batterien gearbeitet, die sich hinsichtlich der Metallkomponente und damit verbunden auch bezüglich der erreichbaren Speicherdichte und des Entwicklungsrisikos unterscheiden. Die größte Herausforderung besteht dabei in der Erhöhung der derzeit noch geringen Lebensdauer dieser Batterien, bei denen die sehr komplexen chemischen Lade- und Entladungsvorgänge noch nicht ausreichend verstanden und beherrscht werden. So bedarf es z. B. generell noch wesentlich effizienterer und zuverlässigerer Sauerstoffelektroden, an denen der Luftsauerstoff sowohl reduziert als auch wieder erzeugt werden kann.

Besonders an der Realisierung von **Lithium-Luft-Batterien** wird intensiv geforscht. Da Lithium von allen Metallen das höchste elektrochemische Potential aufweist, bieten diese Batterien von allen Metall-Luft-Systemen die mit Abstand höchste Energiedichte. Im Vergleich zum heutigen Stand der Technik könnten auch in der Praxis etwa zehnfach höhere Energiedichten erreicht werden, so dass Elektroantriebe auf Basis solcher Batterien konkurrenzfähig zu heutigen Benzinmotoren wären. Die größten Herausforderungen liegen derzeit bei der Erzielung einer akzeptablen Ladezyklenzahl und der Reduzierung der Spannungsverluste beim Laden und Entladen.

Bei der eng verwandten **Natrium-Luft-Batterie** sind die Verluste im Vergleich dazu deutlich geringer. Bei dieser noch neueren Batterievariante liegt die theoretische Energiedichte zwar verglichen mit Lithium um die Hälfte niedriger, dennoch stellt sie eine interessante Alternative dar, vor allem, da der Rohstoff Natrium problemlos verfügbar ist. Somit könnten Natrium-Luft-Batterien vor allem bei stationären Großbatterien in Stromnetzen zukünftig eine Rolle spielen. Ähnlich interessante Eigenschaften hat auch die ebenfalls erst seit kürzerer Zeit in der Entwicklung befindliche **Silizium-Luft-Batterie**, für die die Rohmaterialien in besonders großer Menge vorhanden sind.

Parallel zur Lithium-Luft-Batterie wird auch schon seit längerem intensiv an der Realisierung einer wieder aufladbaren **Zink-Luft-Batterie** gearbeitet. Im Vergleich zu Batterien mit Lithium oder Natrium sind hier alle Komponenten unempfindlich gegenüber Feuchtigkeit. Damit muss die Fertigung nicht in einer Schutzatmosphäre erfolgen. Zusätzlich sind die Rohstoffkosten für das Zinkmetall und die wässrigen Elektrolyte wesentlich geringer, so dass Zink-Luft-Batterien für viele Anwendungszwecke ökonomischer sein könnten als Lithium-Luft-Batterien, allerdings bei etwa dreifach geringerer Energiedichte.

Weitere wiederaufladbare Metall-Luft-Batterien, die derzeit Gegenstand breiterer Forschungsanstrengungen sind, basieren auf **Aluminium** oder **Magnesium** als Elektrodenmaterial. Sie werden vor allem als für die Stromspeicherung in großen stationären Anlagen geeignet angesehen, da sie zwar nicht die Speicherdichte von Lithium-Luft-Batterien erreichen können, dafür aber unter Berücksichtigung der Kosten und der Umweltfreundlichkeit einen guten Kompromiss darstellen.

Elektrisch wieder aufladbare Metall-Luft-Batterien könnten bereits in einem bis zwei Jahrzehnten auf dem Markt zum Durchbruch kommen. Dies würde einen großen Schub für die Elektromobilität bedeuten und hätte entsprechende Auswirkungen auf den gesamten Energiemarkt. Bis dahin müssen jedoch noch vielfältige Herausforderungen bzgl. des Verständnisses und der Beherrschung der zugrundeliegenden chemischen Reaktionen überwunden werden. Dabei ist noch offen, welche Typen sich letztendlich durchsetzen werden. In der Zwischenzeit werden voraussichtlich andere Batterietypen, wie z.B. die Lithium-Schwefel-Batterie, für evolutionäre Fortschritte bei der Stromspeicherung sorgen.

Dr. Ulrik Neupert, Juli 2014

Graphen

Der Schritt, Graphen von einem Wundermaterial zu einem vermarktungsfähigen Produkt umzuwandeln, steht also noch bevor.

Graphen ist eine flächige Modifikation des Kohlenstoffs mit einer wabenförmigen Anordnung der Kohlenstoffatome und einer Dicke von nur einer Atomlage. Es konnte vor ca. 10 Jahren zum ersten Mal hergestellt werden und wird seitdem intensiv untersucht. Aufgrund seiner zum Teil herausragenden Eigenschaften gehört es zu den vielversprechendsten Werkstoffentwicklungen der letzten Zeit. Anwendungsmöglichkeiten werden vor allem in der Elektronik gesehen, in Kombination mit seinen guten mechanischen und photonischen Eigenschaften aber auch in den Bereichen Photonik, Sensorik, Photovoltaik oder in Energiespeichern. Die diesbezüglichen Untersuchungen haben inzwischen zu vielfältigen Fortschritten geführt. Trotzdem ist man von einer großtechnischen Anwendung weiterhin ein gutes Stück entfernt, was vor allem an der bisher noch besonders aufwändigen Herstellung liegt.

Zurzeit gibt es etwa ein Dutzend **Herstellungsmethoden**, die jeweils für Graphen in einer bestimmten Größe, Form und Qualität sowie für eine spezifische Anwendung entwickelt worden sind. Bei einer Methode werden z. B. Graphitpellets zuerst oxidiert und dann mit Ultraschall in der Lösung abgeblättert. Das abgeblätterte Graphitoxid kann anschließend auf fast jeder Oberfläche abgeschieden werden und dort, zumindest teilweise, wieder zum Graphen reduziert werden.

Großflächige polykristalline Filme können z. B. durch chemische Gasphasenabscheidung auf Kupferfolien hergestellt werden. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass man anschließend den Graphenfilm von dem Kupferträger auf ein Isolatormaterial übertragen muss. Im Moment ist dieser Herstellungsweg noch recht teuer – wenn er aber optimiert ist, könnte das durchaus eine kostengünstige Herstellungsmethode sein.

Eine weitere Methode zur Erzeugung von Graphen mit hoher Qualität verwendet Siliziumkarbid (SiC) als Ausgangsmaterial. Bei Temperaturen oberhalb von 1000 Grad Celsius brechen die Bindungen auf und das Silizium verdampft. Diese epitaktische Methode wird verwendet, um größere Scheiben herzustellen, deren Trägerstruktur vollständig von einer Graphenschicht bedeckt wird.

Gerade für **Anwendungen** des Graphens im Bereich der **Elektronik** gab es in letzter Zeit große Fortschritte. Graphen ist speziell dem Silizium in mehrfacher Hinsicht überlegen, insbesondere bei der Elektronenbeweglichkeit. Elektrische Ladungen fließen theoretisch 100-mal schneller hindurch als es bei konventionellen Halbleitern der Fall ist. Graphen hat damit ein hohes Potenzial für die Entwicklung schnellerer elektronischer Bauteile und flexibler elektronischer Geräte. Nachteilig ist dabei jedoch, dass Graphen keine sog. Bandlücke zwischen den Energiebereichen aufweist, in denen sich die Elektronen bewegen können. Deshalb lässt sich der Stromfluss in Graphentransistoren niemals vollständig abschalten. Um Graphen dennoch für digitale Schaltkreise zu verwenden, sucht man nach Wegen, um ihm eine Bandlücke aufzuzwingen. Mit Logischen Transistoren auf Graphenbasis ist jedoch erst nach 2025 zu rechnen. Im Bereich der analogen Elektronik könnten Hochfrequenzbauteile aus Graphen bereits etwas früher einsetzbar sein, z. B. in den Sende- und Empfangsteilen von Smartphones.

Auch aufgrund seiner überlegenen mechanischen Eigenschaften werden Graphen vielfältige Anwendungspotenziale zugesprochen. So ist seine spezifische Zugfestigkeit um zwei Größenordnungen höher als bei Stahl. Die ersten großtechnischen Einsätze werden hier im Bereich der **Verbundwerkstoffe** erwartet. Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind **leitfähige Druckfarben, antistatische EMI-Abschirmungen** (Elektromagnetische Interferenz) oder **Energiespeicher**, wo sie als möglicher Ersatz für die graphitbasierten Elektroden in Batterien, Kondensatoren oder Brennstoffzellen gelten. Auch zur Darstellung von dünnenschichtigen **Solarzellen** wäre das Material verwendbar. Diese wären nicht so effizient wie Solarzellen auf Silizumbasis, aber sie wären so leicht und transparent, dass man sie an den Fassaden von Gebäuden anbringen könnte. Aufgrund seiner Transparenz könnte Graphen darüber hinaus in **transparenten leitenden Beschichtungen** Verwendung zu finden. Gegenüber dem hier herkömmlich verwendeten Indiumzinnoxid hat es eine herausragende mechanische Flexibilität und chemische Stabilität, die besonders bei flexiblen elektronischen Geräten, wie aufrollbarem elektronischem Papier oder faltbaren OLEDs (organische Leuchtdioden), gefragt sind. Insgesamt rechnet man damit, dass Graphen

innerhalb der nächsten fünf Jahre in flexiblen elektronischen Geräten Anwendungen finden wird.

Zu den am meisten untersuchten photonischen Bauelementen auf Graphenbasis gehören **Fotodetektoren**. Im Gegensatz zu Halbleiter-Fotodetektoren kann das Material im Prinzip für eine große spektrale Bandbreite – von Ultraviolett bis Infrarot – verwendet werden. Die guten photonischen Eigenschaften kann man auch ausnutzen, um z. B. eine neue Generation von Nachtsichtgeräten zu entwickeln, die dann preiswerter wären und zudem größere Sehfelder abdecken könnten. Außerdem konnte gezeigt werden, dass optisch stimuliertes Graphen elektromagnetische Strahlung im Terahertz-Bereich aussendet. Das könnte bei der Entwicklung von neuen **Terahertzgeneratoren** eine Rolle spielen. Allerdings rechnet man hier nicht vor 2030 mit praktischen Anwendungen.

Wie schnell die genannten Anwendungen des Graphens auf dem Markt realisiert werden können, hängt in erster Linie davon ab, ob es gelingt, das Material mit den für den jeweiligen Einsatz spezifischen Eigenschaften im industriellen Maßstab herzustellen. Man kann daher davon ausgehen, dass diejenigen Anwendungen, die mit günstig herstellbarem Graphen von niedriger Qualität auskommen (wie z. B. gedruckte Elektronik, Elektromagnetische Abschirmungen usw.) auch die Ersten sein werden, die vermarktet werden können.

Der Schritt, Graphen von einem Wundermaterial zu einem vermarktungsfähigen Produkt umzuwandeln, steht also noch bevor. Allerdings sind sowohl die Forschung als auch die Industrie optimistisch, die Herausforderungen der Produktion in den Griff zu bekommen und bereits in den nächsten Jahren erste graphenbasierte Produkte auf den Markt zu bringen.

Dr. Sonja Grigoleit, September 2014

Deep Learning

Deep Learning zeichnet sich dadurch aus, dass der maschinelle Lernprozess hier in Form von mehreren Ebenen hierarchisch organisiert ist. Ihm wird das Potenzial zugesprochen, das Forschungsfeld der Künstlichen Intelligenz (KI) in Zukunft entscheidend voran zu bringen.

Deep Learning ist ein Ansatz im Bereich des Maschinellen Lernens. Obwohl die zugrunde liegenden Verfahren schon seit einigen Jahren erprobt werden und inzwischen bereits zu ersten kommerziellen Anwendungen geführt haben, befindet sich das Gebiet insgesamt noch am Anfang seiner Entwicklung. Dabei wird ihm das Potenzial zugesprochen, das Forschungsfeld der Künstlichen Intelligenz (KI) in Zukunft entscheidend voran zu bringen.

Das Fachgebiet des **Maschinellen Lernens** beschäftigt sich allgemein mit Verfahren, mit deren Hilfe Computer selbständig bestimmte Sachverhalte lernen können, z.B. ob auf einem Bild ein bestimmtes Gesicht abgebildet ist. Hierzu wird der Computer in einer Lernphase anhand von Beispieldaten trainiert. Das Ziel besteht darin, auf Grundlage dieser bekannten Beispieldaten zu verallgemeinern, so dass im Anschluss an die Lernphase auch bisher unbekannte Daten korrekt beurteilt werden können.

Deep Learning zeichnet sich dadurch aus, dass der **Lernprozess** hier in Form von mehreren Ebenen hierarchisch organisiert ist. Höhere Ebenen beinhalten dabei zunehmend abstraktere und komplexere Konzepte, die auf den jeweiligen Konzepten der niedrigeren Ebenen basieren. Diese zunehmend abstrakteren Konzepte sollen immer stärker die eigentliche Bedeutung der Daten widerspiegeln. Beispielweise könnte im Rahmen der Erkennung von Gesichtern der Computer in der untersten Ebene lediglich hellere und dunklere Bildpunkte unterscheiden. In der nächsten Ebene könnte dann gelernt werden, unterschiedliche Kanten zu identifizieren.

Dieser Prozess setzt sich fort, bis der Computer in der höchsten Ebene schließlich gelernt hat, welche Formen und Objekte dazu geeignet sind, ein menschliches Gesicht zu erkennen.

So könnten z. B. letztendlich in den Bildern Augen erkannt und daraus geschlossen werden, dass in einem Gesicht typischerweise zwei Augen vorhanden sind.

Gegenwärtige Deep-Learning-Verfahren beruhen typischerweise auf **Künstlichen Neuronalen Netzen** (KNN). KNN sind ein verhältnismäßig alter Ansatz für Maschinelles Lernen, der in einem gewissen Umfang durch die neurobiologische Architektur des Gehirns inspiriert wurde. Dementsprechend besteht ein KNN aus einem Netzwerk aus künstlichen Neuronen. Es ist aus einer Schicht mit Neuronen zur Eingabe von Daten in das KNN und einer Schicht mit Neuronen zur Datenausgabe aufgebaut. Dazwischen können sich mehrere sog. verdeckte Schichten mit Neuronen befinden. Jeder Verbindung zwischen den einzelnen Neuronen ist ein Parameter, ein so genanntes Gewicht, zugeordnet. Aus den in ein Neuron eingehenden Daten wird auf der Basis der entsprechenden Gewichte die Ausgabe dieses Neurons ermittelt. Während des jeweiligen Lernprozesses werden diese Gewichte hinsichtlich der Beispieldaten optimiert.

Bei KNN mit nur einer oder zwei verdeckten Schichten spricht man von einer flachen Architektur. Generell verwenden herkömmliche Ansätze im Bereich des Maschinellen Lernens typischerweise derartige flache Architekturen. Beim Deep Learning werden dagegen so genannte **tiefe Architekturen** genutzt. Dies beinhaltet insbesondere KNN mit mehreren verdeckten Schichten. Den verdeckten Schichten entsprechen dabei die verschiedenen Ebenen des Lernprozesses.

Deep Learning kann in unterschiedlichen Anwendungsgebieten eingesetzt werden. So lässt es sich z. B. im Rahmen der Spracherkennung verwenden, d.h. der automatischen Umwandlung von gesprochenen Wörtern in den entsprechenden geschriebenen Text. Ein weiteres Einsatzgebiet liegt im Bereich Computer Vision. Das Ziel besteht hier darin, die Fähigkeiten der visuellen Wahrnehmung beim Menschen durch den Computer nachzubilden, z.B. um bestimmte Objekte auf Bildern zu erkennen. Solche Fähigkeiten sind unter anderem für unbemannte Systeme von großem Interesse, da sich so deren Grad an Autonomie steigern lässt.

Eine weitere mögliche Anwendung stellt das Natural Language Processing dar, d. h. die Verarbeitung von natürlicher Sprache durch den Computer. Dies beinhaltet z.B. die automatische Übersetzung von Texten in eine andere Sprache. Ein anderes Beispiel hierfür ist die Interaktion mit Computern auf der Basis von natürlicher Sprache, indem der Computer

z.B. Anweisungen inhaltlich versteht. Deep Learning ist generell zur Erkennung von Mustern in Daten geeignet. Diese Fähigkeit kann z.B. in der Arzneimittelforschung eingesetzt werden, um dort aussichtsreiche Wirkstoffe zu identifizieren.

Deep Learning wird teilweise bereits kommerziell genutzt, wobei die erste weitverbreitete Anwendung die Spracherkennung ist. So bildet Deep Learning z.B. die Grundlage für die Spracherkennung bei verschiedenen aktuellen Smartphones. Hier konnten Deep-Learning-Ansätze unter anderem ihre Überlegenheit gegenüber herkömmlichen Methoden aus dem Bereich des Maschinellen Lernens zeigen.

Allgemein besteht eine wichtige aktuelle Herausforderung im Rahmen von Deep Learning darin, die genutzten Methoden auch noch bei wesentlich größeren Datenmengen und Architekturen einsetzen zu können. Hierfür sind insbesondere Computersysteme mit einer entsprechend hohen Rechenleistung nötig. Davon erhofft man sich in unterschiedlichen Anwendungsfeldern, z.B. im Bereich Computer Vision, eine immer stärkere Annäherung an die Fähigkeiten des Menschen.

Ein Ansatz in diesem Zusammenhang ist der Einsatz von Parallelcomputern, z.B. in Form von Computerclustern. Aktuell sehr beliebt ist hier auch die Nutzung von Grafikprozessoren mit ihrer hochgradig parallelen Hardwarearchitektur. Eine Herausforderung beim Einsatz derartiger paralleler Computerarchitekturen besteht allerdings darin, hierfür entsprechend parallelisierte Lernalgorithmen zu entwickeln.

Eine für die Zukunft vielversprechende Möglichkeit zur Realisierung der notwendigen Rechenleistungen ist maßgeschneiderte Computerhardware, die speziell an die beim Deep Learning anfallenden Berechnungen angepasst ist. Als einfache Lösung dafür bieten sich die in anderen Anwendungsbereichen bereits etablierten FPGA an (Field Programmable Gate Arrays). Dies sind Mikrochips, deren Verbindungen untereinander auch noch nach der Herstellung durch Programmierung variiert und damit für bestimmte Anwendungen optimiert werden können.

Dr. Klaus Ruhlig, Oktober 2014

Transkranielle Stimulation

Die therapeutische Wirksamkeit und insbesondere auch die leistungssteigernden Effekte transkranieller Verfahren zur nicht-invasiven Stimulation des menschlichen Gehirns sind keineswegs unumstritten.

Transkranielle Stimulationsverfahren (sinngemäß „Anregung durch den Schädel hindurch“) umfassen verschiedene nicht-invasive Untersuchungs- und Behandlungsmethoden, die darauf abzielen, die Aktivität einzelner Regionen des menschlichen Gehirns durch äußere Beeinflussung gezielt zu verändern. Gegenwärtig finden sie primär in der neurologischen Diagnostik und der neurowissenschaftlichen Forschung Anwendung. Zunehmend rücken aber auch therapeutische oder sogar leistungssteigernde Einsatzmöglichkeiten im Anwendungsfeld des sog. Human Enhancement in den Fokus des Interesses. Diese Entwicklung spiegelt sich auch in dem jüngst geprägten Begriff Elektrozeutika wider (in Analogie zu Pharmazeutika).

Obwohl beispielsweise auch Infrarotstrahlung und Ultraschall zur transkraniellen Stimulation genutzt werden können, kommen bei derzeitigen Verfahren vornehmlich elektrische und magnetische Reize zum Einsatz, welche schwache elektrische Ströme in der Großhirnrinde induzieren. In Abhängigkeit von der Richtung des Stromflusses und dem behandelten Gehirnareal kann auf diese Weise die Erregbarkeit von Nervenzellen herauf- oder herabgesetzt werden. Je nach Behandlungsschema lassen sich dabei kurz- oder längerfristige Effekte hervorrufen. Erstere treten unmittelbar während oder wenige Minuten nach der Stimulation auf, während die längerfristigen Effekte teils über Stunden nachwirken können. Mehrwöchige Behandlungen mit täglichen Anwendungen können zu dauerhaften Veränderungen im Gehirn führen.

Zur elektrischen Stimulation werden an bestimmte Stellen der Kopfhaut Elektroden angelegt – ähnlich wie bei der Aufzeichnung eines Elektroenzephalogramms (EEG).

Über diese wird Strom durch den Schädel geleitet, gewöhnlich mit einer Stärke von etwa einem, maximal zwei Milliampere. Zumeist kommt hierbei Gleichstrom zum Einsatz, aber auch Wechselstrom und Rauschstrom (random noise stimulation) können als Reize genutzt werden. Die **magnetische Stimulation** hingegen erfolgt über eine 8-förmige Magnetspule, welche tangential an den Schädel herangeführt wird. Mit ihr werden gepulste Magnetfelder von einigen Zehntelsekunden Dauer und mit Flussdichten von ein bis drei Tesla erzeugt, die im Inneren des Schädelns elektrische Felder induzieren.

Die exakten **Wirkmechanismen** der transkraniellen Stimulationsmethoden sind noch nicht umfassend verstanden. Grundlegend beruhen die physiologischen Effekte auf einer Verschiebung des sog. Schwellenpotentials der Nervenzellen in der Großhirnrinde (Cortex). Das Schwellenpotential ist eine ausschlaggebende Größe für die Erregbarkeit und Aktivität der Nervenzellen – nur wenn das Schwellenpotential überschritten wird, „feuern“ die Neuronen und Signale werden entlang der Faserbündel weitergeleitet. Beeinflussen die induzierten Stromflüsse das Schwellenpotential negativ, so vermindert sich die Erregbarkeit der Neuronen – korrekterweise müsste hier also eigentlich von einer transkraniellen Inhibition gesprochen werden.

Wird das Schwellenpotential hingegen positiv beeinflusst, so erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass die Zellen aktiviert werden können (Stimulation). Diese selektive Modulation der Erregbarkeit einzelner Hirnareale kann unterschiedliche Auswirkungen haben.

Bei Störungen des Bewegungsapparates können gezielte transkranielle Stimuli im Bereich des motorischen Cortex zu **diagnostischen Zwecken** eingesetzt werden. Auf diese Weise ausgelöste Muskelkontraktionen liefern z. B. Erkenntnisse über motorische Beeinträchtigungen infolge eines Schlaganfalls oder Multipler Sklerose.

Abgesehen von der diagnostischen Anwendung verheißt die externe Beeinflussung der neuronalen Aktivität auch umfangreiches **therapeutisches Potenzial**. So wird derzeit intensiv erforscht, inwieweit die Methoden der transkraniellen Stimulation zur Behandlung verschiedener neurologischer Erkrankungen und psychischer Störungen genutzt werden können. Mögliche und teilweise bereits erschlossene Anwendungsgebiete sind beispielsweise Migräne und chronische Schmerzen, Tinnitus, Epilepsie, Parkinson, Alzheimer, Depression, Posttraumatische Belastungsstörung und Schizophrenie.

Besonderes Interesse rufen in jüngerer Zeit mögliche **leistungssteigernde Effekte** der transkraniellen Stimulationsverfahren hervor. Zahlreiche Studien der letzten Jahre haben gezeigt, dass damit auch die kognitiven Fähigkeiten von gesunden Probanden positiv beeinflusst werden können. Das gilt vor allem für Verbesserungen der Aufmerksamkeit und Reaktionszeit sowie des Lern- und Erinnerungsvermögens. Ob sich die im Labor erzielten Erfolge jedoch auch unter weniger kontrollierten Rahmenbedingungen reproduzieren lassen – beispielsweise zur Erhöhung der Aufmerksamkeit im Einsatz – ist bislang unklar. Auch die Möglichkeit gegenseitiger Abhängigkeiten muss eingehend untersucht werden, damit die Verbesserungen einer Fähigkeit nicht zu Lasten einer anderen erkauft werden. Insofern ist zu erwarten, dass es erst in fünf bis zehn Jahren wirklich zielgerichtete Optimierungsansätze geben wird.

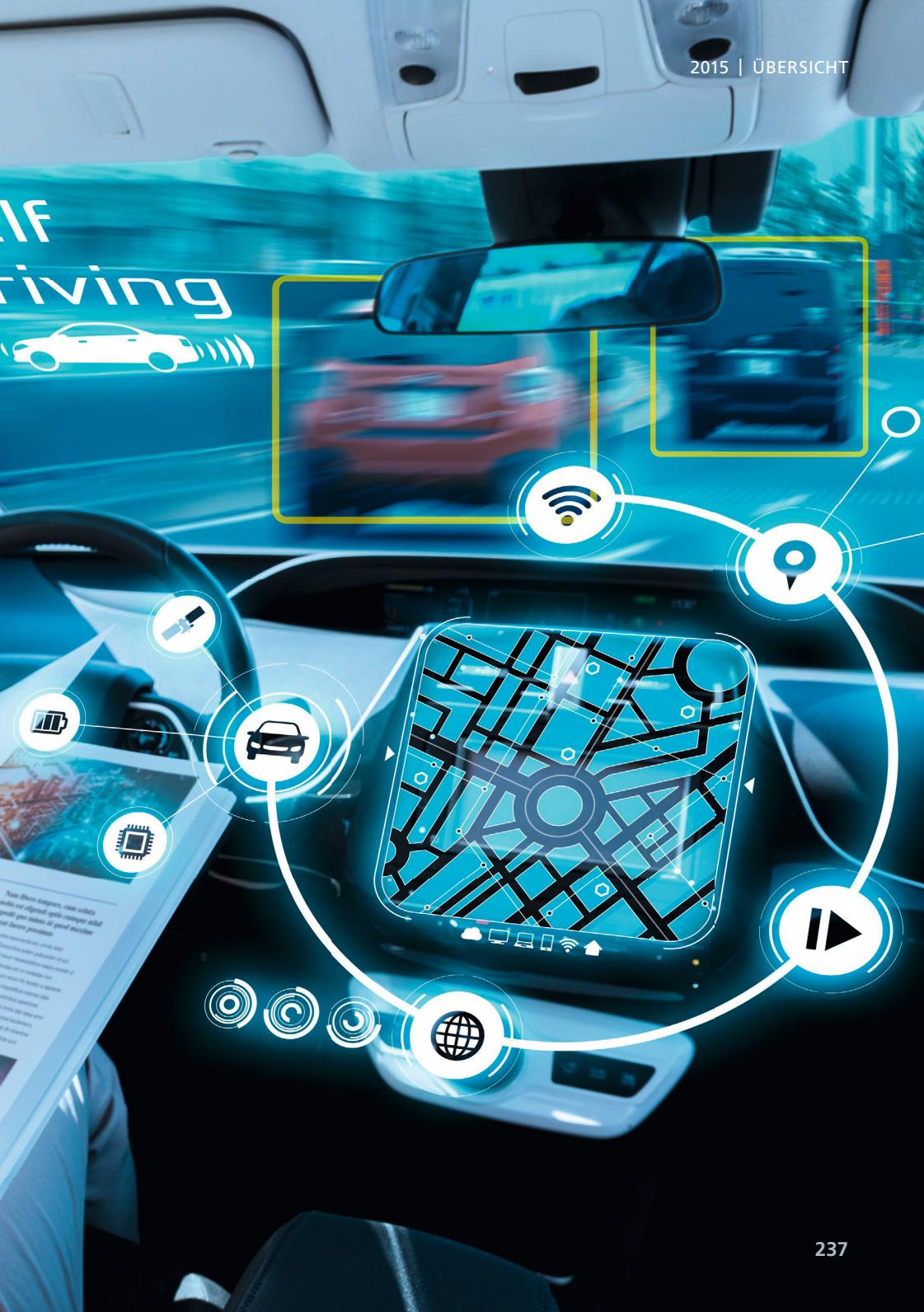
Eine wichtige **Randbedingung für die weitere Nutzbarmachung** transkranieller Stimulationsverfahren ist die Tatsache, dass diese nach bisherigen Erkenntnissen vergleichsweise nebenwirkungsarm und unbedenklich in der Anwendung sind. So erteilte die „US Food and Drug Administration“ (FDA) Ende letzten Jahres erstmalig einem magnetischen Stimulationsgerät zur Migränebehandlung die Zulassung. Auf der anderen Seite sind die therapeutische Wirksamkeit und insbesondere auch die leistungssteigernden Effekte transkranieller Stimulationsmethoden keineswegs unumstritten. Trotz einer Reihe vielversprechender Studien äußern Experten gelegentlich Zweifel an der statistischen Signifikanz der Ergebnisse und Kritik an den Untersuchungsmethoden. Daher wird es für die Zukunft entscheidend sein, die Effektivität einzelner Stimulationsverfahren unzweifelhaft nachzuweisen und die jeweiligen Behandlungsparameter genau zu definieren. Die Kombination von transkraniellen Stimulationsverfahren mit funktionellen Bildgebungsverfahren (z. B. Magnetresonanztomographie) und die computergestützte Modellierung der transkranialen Stromflüsse werden dazu wesentliche Beiträge liefern.

Dr. Carsten M. Heuer, November 2014

Beiträge aus 2015

Automatisiertes Fahren	238
Through-the-Wall Sensing	241
Perowskitsolarzellen	244
Visuelle Navigation	247
Hydrothermale Karbonisierung	250
Structural Health Monitoring	253
Formgedächtnispolymer	256
Aktive Lebensmittelverpackungen	259
Software-Defined Networking	262
Brain-Computer-Interfaces	265





Automatisiertes Fahren

Zur Realisierung der Schlüsseltechnologien des automatisierten Fahrens gibt es intensive Bemühungen sowohl von Fahrzeugherstellern als auch von Unternehmen aus dem IT-Bereich. Diese erklären sich nicht zuletzt aus der Vision vom unfallfreien Fahren.

Seitdem Ende der 1970er Jahre die ersten Großserien-PKW ein vollelektronisch gesteuertes Antiblockiersystem (ABS) und damit eine automatisierte „Stotterbremse“ erhielten, haben die sog. Fahrerassistenzsysteme einen Siegeszug im Automobilbau angetreten. Nicht zuletzt aufgrund von Fortschritten im Bereich der Sensorik sowie der Informations- und Kommunikationstechnik hat sich diese Entwicklung inzwischen so beschleunigt, dass man heute von einer immer weiter zunehmenden Automatisierung auch der eigentlichen Fahrfunktionen ausgeht, die aus technischer Sicht bereits in zehn bis zwanzig Jahren zu vollständig autonom agierenden Kraftfahrzeugen führen kann.

Allgemein unterscheidet man auf diesem Weg die vier Phasen assistiertes sowie teil-, hoch- und schließlich vollautomatisiertes bzw. autonomes Fahren. **Assistiertes Fahren** hat sich vom ABS über elektronische Systeme zum Erhalt der Fahrzeugstabilität (ESP) bereits bis hin zu weit reichenden Funktionalitäten wie dem Abstandsregeltempomat entwickelt, der das Auto selbstständig abbremsen oder beschleunigen kann. Hier ist die Grenze zum **teilautomatisierten Fahren** zum Teil bereits überschritten. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass zwar auch wesentliche Fahrfunktionen automatisch übernommen werden, der Fahrer aber immer in der Lage ist einzutreten („man in the loop“). Das ist z. B. beim heute bereits möglichen automatisierten Einparken der Fall, das jederzeit durch Brems- oder Lenkeingriffe abgebrochen werden kann.

Hochautomatisiertes Fahren sollte aus technischer Sicht nach 2020 möglich werden. Hier ist der Fahrer keine Notfallopiton mehr. Er ist im Prinzip zwar weiterhin „in the loop“, kann aber die Verantwortung zeitweise vollständig an das Fahrzeug abgeben und sich

anderweitig beschäftigen. Danach wird er wieder zur Übernahme der Fahraufgabe aufgefordert, z.B. in schwierigen Situationen. Hier liegen noch einige technische Herausforderungen. So muss das Fahrzeug erkennen können, ob der Fahrer einsatzbereit ist. Außerdem darf die für den gesamten Übergabevorgang benötigte Zeit einige wenige Sekunden nicht überschreiten. Schließlich muss das Auto reagieren können, wenn der Fahrer doch nicht eingreift.

Beim **vollautomatisierten bzw. autonomen Fahren** sind überhaupt keine Eingriffe des Menschen mehr vorgesehen. Für das Fahren mit niedrigen Geschwindigkeiten z.B. in die Garage ist eine derartige Funktionalität bereits in wenigen Jahren möglich. Mit einer durchgängigen technischen Realisierbarkeit des autonomen Fahrens rechnet man aber nicht vor 2030. Weil dann auch niemand mehr „am Steuer sitzen“ muss, könnten sich die Innenräume und Innenausstattungen derartiger Fahrzeuge wesentlich von denen heutiger PKW unterscheiden.

Trotz dieser optimistischen Einschätzungen der technischen Entwicklung sind noch bemerkenswerte Herausforderungen auf dem Weg zum autonomen Fahren zu überwinden. Eine wichtige **Schlüsseltechnologie** ist die zuverlässige und präzise **360°-Umfelderfassung**. Während Sensoren wie Ultraschall, Radar oder auch Stereokameras bereits eingesetzt werden, gibt es bei der Nutzbarmachung z.B. von Laserscannern zur Erzeugung von 3D-Bildern noch einiges zu tun. Schließlich muss die enorme zu erwartende Vielzahl der Sensordaten fusioniert, interpretiert und zu einem kompletten Umfeldmodell verarbeitet werden. Für diese Berechnungen werden neue Hard- und Softwaretechnologien entwickelt.

Grundvoraussetzung für autonomes Fahren ist auch eine hochpräzise **Positionsbestimmung** in Echtzeit. Hier kann das kommende und im Vergleich zum GPS genauere Satelliten-navigationssystem Galileo eine ebenso wichtige Rolle spielen wie die Einbeziehung von Landmarken (z.B. Spurmarkierungen) und von neuen, hochpräzisen digitalen Straßenkarten. Die Informationen z.B. über kurzfristige Baustellen könnten über Mobilfunkanbindungen erlangt werden. Eine derartige Kommunikation des Fahrzeugs sowohl mit der Verkehrsinfrastruktur als auch mit anderen Verkehrsteilnehmern z.B. via WLAN wird bei der Ermittlung eines dynamischen **elektronischen Horizonts** unverzichtbar sein. Diese weit über die Nahbereichssensorik hinausgehende Vorschau des Fahrzeugumfelds ist notwendig, damit das System eine **Fahrstrategie** entwerfen kann, z.B. um Spurwechselmanöver durchzuführen. Bei der Realisierung möglichst stetiger und fließender Fahrzeugbewegungen

könnte schließlich die sog. kinodynamische Wegplanung autonomer Fahrzeuge eine wesentliche Rolle spielen.

Zur Realisierung der Schlüsseltechnologien gibt es intensive Bemühungen sowohl von Fahrzeugherstellern als auch von Unternehmen aus dem IT-Bereich. Diese erklären sich nicht zuletzt aus der Vision vom unfallfreien Fahren. Ein zunehmend automatisierter Straßenverkehr soll zu einer Verringerung der Anzahl an Verkehrstoten führen. Die zugrunde liegenden Funktionalitäten will man schrittweise immer da nutzbar machen, wo es technisch möglich ist. So sinkt der Schwierigkeitsgrad autonomen Fahrens vom hochkomplexen Stadtverkehr hin zur eher einfachen Autobahnfahrt, wo entsprechende Technologien als erstes eingeführt werden könnten.

Aber selbst wenn alle technischen Probleme auf dem Weg zum vollautomatisierten Fahren gelöst sein sollten, werden hier wie bei kaum einer anderen Entwicklung **nichttechnische und nichtökonomische Aspekte** über die tatsächliche Einführung in den Markt entscheiden. Diese liegen vor allem im rechtlichen Bereich und bei der gesellschaftlichen Akzeptanz. Insbesondere Fragen der Produkthaftung können die Entwicklung wesentlich beeinflussen. Im Mai 2014 wurde die Wiener Konvention über den Straßenverkehr von der UNO dahin gehend überarbeitet, dass jetzt auch „Systeme zulässig sind, mit denen ein Pkw autonom fährt, wenn sie jederzeit vom Fahrer gestoppt werden können“. Aber auch damit ist man von einer Regelung des vollautomatisierten Fahrens immer noch weit entfernt. Außerdem wird man letztlich sowohl technisch als auch administrativ immer auf einen Mischverkehr aus autonomen und selbstgelenkten Fahrzeugen vorbereitet sein müssen, deren Betrieb sicher auch in Zukunft nicht verboten werden wird. Hier liegen vielleicht die größten Hindernisse für eine flächendeckende Einführung autonomer Kraftfahrzeuge.

Jürgen Kohlhoff, Januar 2015

Through-the-Wall Sensing

Technologische Grundlage von TTWS-Systemen ist die Nutzung elektromagnetischer Wellen, mit denen es möglich ist, Wände und ähnliche Hindernisse zu durchdringen. Die von den Objekten hinter der Wand reflektierten Signale erzeugen gleichsam eine Art Fingerabdruck, welchen es anschließend zu entschlüsseln gilt.

Zu wissen, wie die Situation hinter einer Wand oder einem anderen festen Hindernis aussieht, wo sich dort Menschen befinden und ob diese möglicherweise bewaffnet oder unbewaffnet sind, ist ein langgehegter Wunsch von Einsatz- und Rettungskräften. Die Forschung an solchen Through-the-Wall-Sensing-Technologien (TTWS) begann bereits Mitte der 1970er Jahre, allerdings zunächst eher schleppend. Erst die Fortschritte insbesondere auf dem Gebiet der Signalverarbeitung während des letzten Jahrzehnts haben es möglich gemacht, die Entwicklung solcher Systeme soweit voranzubringen, dass mittlerweile bereits erste Varianten auf dem Markt sind.

Technologische Grundlage jedes TTWS-System ist die Nutzung elektromagnetischer Wellen, mit denen es möglich ist, Wände und ähnliche Hindernisse zu durchdringen. In dem hinter der Wand liegenden Raum werden die ausgesandten Signale teilweise von den dort anwesenden Personen, Möbeln und anderen Objekten reflektiert und durchdringen die Wand ein weiteres Mal. Hierbei wird dem Signal gleichsam eine Art Fingerabdruck der Szene im zu beobachtenden Raum aufgeprägt, welchen es anschließend zu entschlüsseln gilt. Hierfür kommt allerdings nur ein Teil des elektromagnetischen Spektrums in Frage. Licht im sichtbaren Bereich beispielsweise ist nicht in der Lage, eine feste Wand zu durchdringen. Stattdessen greift man auf langwelligere Strahlung im Mikrowellen- und RadARBereich zurück. Die bevorzugte Signalform für TTWS-Radare ist das sog. Ultra-Breitband-Signal, welches einen sehr großen Frequenzbereich nutzt. Bei der Auswahl des Frequenzbereichs muss immer ein Kompromiss eingegangen werden. Auf der einen Seite ist man daran interessiert, Strahlung möglichst niedriger Frequenz (und damit großer Wellenlänge) zu nutzen, da diese Wände besonders gut durchdringt. Auf der anderen Seite erlaubt die

Nutzung hochfrequenter Strahlung eine bessere Genauigkeit hinsichtlich der räumlichen Auflösung der zu detektierenden Objekte. Die Verwendung elektromagnetischer Strahlung bedeutet allerdings auch, dass Wände, die aus leitfähigen Materialien bestehen (bspw. Stahlcontainer), nicht durchleuchtet werden können.

Die benutzten Radarquellen lassen sich in zwei Gruppen unterteilen. Am weitesten entwickelt und zum Teil bereits kommerziell verfügbar sind solche, die direkt an die zu durchleuchtende Wand gehalten werden. Hierbei handelt es sich meist um relativ handliche Geräte, die von ein bis zwei Personen bedient werden können. Deutlich größer sind Radarquellen für die sog. Fernerkundung ganzer Gebäude. Hierbei geht es darum, aus sicherer Entfernung von 10 Metern und mehr neben der Ortung von Personen auch einen Überblick über das Gebäude zu erhalten. Solche Geräte, die sich derzeit noch in der Entwicklung befinden, werden auf entsprechend ausgerüsteten Fahrzeugen montiert.

Bei den verwendeten Radarquellen und -antennen kann man im Prinzip auf **Einzeltechnologien** zurückgreifen, die auch in anderen Anwendungsbereichen benutzt werden. So nutzt man zur Verbesserung der Auflösung von TTWS-Systemen meist das Prinzip der sogenannten synthetischen Apertur, bei dem durch Bewegung einer einzigen relativ kleinen realen Antenne ein größeres Antennenarray simuliert wird. Die wesentliche technologische Herausforderung liegt in der Aufbereitung des stark abgeschwächten Radarsignals. Das Hauptproblem besteht darin, dass sich hier sehr viele Einzelsignale überlagern und somit das detektierte Gesamtsignal sehr unübersichtlich wird. So stammt beispielsweise das stärkste detektierte Signal von der Wand direkt vor der Radarquelle. Es liefert daher keine Informationen über die Objekte hinter dieser Wand, deren zurückreflektierte Signale deutlich schwächer sind. Während sich dieses als Flash-Effekt bekannte Phänomen noch recht gut herausrechnen lässt, sorgen Abschattungen, Reflexionen, Brechungen usw. im weiteren Verlauf der Signalausbreitung dafür, dass das empfangene Signal aus einer Vielzahl sich überlagernder Einzel- oder auch Störsignale besteht. Dieses als Clutter bezeichnete Phänomen kennt man auch von anderen Radaranwendungen, beim TTWS ist es jedoch von entscheidender Bedeutung. In den letzten Jahren wurden signifikante Fortschritte dabei erzielt, das empfangene Signal zu analysieren und so aufzubereiten, dass ein geübter Anwender Rückschlüsse auf die Situation im zu beobachtenden Raum ziehen kann. Im Mittelpunkt des Interesses stehen hierbei ausgefeilte mathematische Verfahren wie beispielsweise das sogenannte Compressed Sensing. Dieses Verfahren soll es ermöglichen, aus relativ wenig detektierten Informationen trotzdem ein komplettes Bild zu rekonstruieren.

Trotz dieser Fortschritte muss ein Benutzer, der die von einem TTWS-System erzeugten „Bilder“ interpretieren soll, noch sehr viel Erfahrung darin besitzen, um beispielsweise Personen von Möbeln zu unterscheiden. Zur Zeit ist es auch extrem schwierig beispielsweise Waffen zu erkennen, auch wenn dies prinzipiell möglich wäre.

Das wesentliche **Einsatzszenario** für diese Art von Technologie ist, Personen innerhalb geschlossener Räume zu orten, zu verfolgen und zu entscheiden, ob sie Waffen tragen oder nicht. Für die Verfolgung sind Systeme notwendig, die in Echtzeit arbeiten und gleichsam einen Radarfilm erzeugen. Auch dies ist nach derzeitigem Stand prinzipiell möglich, steckt aber entwicklungstechnisch noch in den Kinderschuhen. Eine solche Technologie wäre vor allem für polizeiliche Einsatzkräfte oder Spezialkommandos von Interesse. Prinzipiell ist es auch möglich, mittels solcher Systeme die Atembewegung oder sogar den Herzschlag eines Menschen zu detektieren. Daher kämen sie auch für den Einsatz von Rettungskräften bei der Suche nach Verschütteten in Frage.

Künftig wird es bei der Weiterentwicklung von TTWS-Systemen vor allem darum gehen, die erzeugten Bilder einfacher interpretierbar zu machen. Ferner wird diskutiert, die allgegenwärtige Strahlung von Mobilfunknetzen und WLAN-Routern nutzbar zu machen. Zumindest im letzteren Fall ist es bereits gelungen, die prinzipielle Machbarkeit solcher Ansätze zu demonstrieren.

Dr. Marcus John, März 2015

Perowskitsolarzellen

Trotz der vielversprechenden Entwicklungen wird das weitere Potenzial der Perowskitsolarzellen sehr unterschiedlich bewertet.

Der Anteil der Photovoltaik an der gesamten deutschen Stromerzeugung liegt zurzeit bei durchschnittlich rund fünf Prozent, in sonnenreichen Spitzenzeiten auch bereits deutlich höher. Es wird erwartet, dass er sich bis zum Jahr 2030 auf bis zu 20 Prozent erhöhen könnte. Grundvoraussetzung dafür ist aber die Entwicklung immer effizienterer Solarzellen, die sich zudem kostengünstig und umweltfreundlich fertigen lassen sollen. Besondere Hoffnungen in diesem Zusammenhang setzt man heute auf sog. Perowskitsolarzellen, die erst seit einigen Jahren erforscht werden und daher bis jetzt noch keine Marktreife erlangt haben.

Am weitesten verbreitet sind zurzeit **auf Siliziumwafern basierende Solarzellen**, die unter idealen Bedingungen einen Wirkungsgrad von bis zu 25 Prozent aufweisen können. Neben dieser relativ hohen Effizienz zeichnen sie sich durch eine große Langzeitstabilität aus. Allerdings ist ihre Herstellung teuer und energieaufwändig. Aus diesem Grund werden verschiedene Alternativen entwickelt. Diese haben aber wieder andere Nachteile. So basieren die teilweise ebenfalls bereits kommerziellen **Dünnschichtsolarzellen** zumeist auf seltenen oder giftigen Metallen. Die sog. **Farbstoffsolarzellen** wiederum weisen noch einen relativ geringen Wirkungsgrad und eine geringe Langzeitstabilität auf.

Perowskitsolarzellen werden erst seit 2009 erforscht, wobei sie zu Anfang nur Wirkungsgrade von rund drei Prozent und eine sehr geringe Stabilität aufwiesen. In den letzten Jahren kam es jedoch zu einer Reihe entscheidender Durchbrüche, die es ermöglichen, den Wirkungsgrad dieser Zellen im Labor auf fast 20 Prozent zu erhöhen und auch ihre Stabilität beträchtlich zu steigern. Quasi über Nacht wurden Perowskite so zu einem enorm

vielversprechenden Werkstoff für die Photovoltaik. Ihr Aufbau leitet sich von den Farbstoffsolarzellen ab, bei denen – im Gegensatz zu Siliziumwafer- und Dünnschichtsolarzellen – die drei Grundschritte der Stromerzeugung aus Sonnenlicht getrennt in unterschiedlichen Materialien ablaufen. Dabei nimmt der sog. Absorber die Strahlung des Sonnenlichts auf, wobei positive („Löcher“) und negative Ladungsträger (Elektronen) erzeugt werden. Zwei weitere Schichten – der sogenannte Lochleiter und der Elektronenleiter – nehmen dann getrennt die entstandenen Ladungsträger auf und leiten sie an zwei Elektroden weiter, so dass zwischen diesen Strom fließen kann.

Im Fall der Perowskitsolarzellen ist das **Absorbermaterial** ein sog. Perowskit. Diese Werkstoffklasse umfasst eine große Gruppe von Materialien sehr variabler Zusammensetzung, aber mit einer stets sehr ähnlichen Kristallstruktur. Für Perowskitsolarzellen kommen Salze von Jod, Chlor und Brom mit kleinen organischen Molekülen sowie Blei-Ionen zum Einsatz. Solche Verbindungen sind in der Lage, den gesamten Bereich des sichtbaren Lichts sowie den Bereich des nahen Infrarots zur Stromerzeugung zu nutzen.

Hauptsächlich verwendet man Methylammonium-Blei-Jodid, aber auch weitere ähnliche Verbindungen werden für den Einsatz in Solarzellen erforscht. Daneben gibt es eine große Vielzahl weiterer Verbindungen, die in der Perowskitstruktur kristallisieren und die bereits in anderen Anwendungen technische Bedeutung erlangt haben. Beispiele dafür sind Werkstoffe für Kondensatoren, elektrooptische Schalter und Datenspeicher sowie Hochtemperatursupraleiter.

Ein großer Vorteil der Perowskitsolarzellen liegt darin, dass sie aus kostengünstigen Materialien bestehen und mit einfachen **Herstellungsverfahren** zu fertigen sind. So lassen sich die Perowskite bei geringen Temperaturen – je nach Material geringer als der Siedepunkt von Wasser – einfach auf ein geeignetes Substrat aufsprühen oder -drucken. Auch eine Herstellung unter Vakuumbedingungen – wie im Fall der Dünnschichtsolarzellen – ist nicht notwendig.

Daneben gab es in letzter Zeit Forschungen am Aufbau der Solarzellen, die den Wirkungsgrad weiter erhöhten. Sie führten zum Teil auch dazu, dass sich der Aufbau der Perowskitsolarzellen von den Farbstoffsolarzellen weg in Richtung der herkömmlichen Dünnschichtsolarzellen entwickelte. Wie sich herausstellte, können sich die Ladungsträger auch in den Perowskiten selbst sehr schnell bewegen, sodass auf den Lochleiter, den Elektronenleiter oder sogar

beide verzichtet werden kann. Andere Arbeiten fokussieren unter anderem darauf, neutral gefärbte, halb durchsichtige Zellen zu erzielen. Auch flexible Solarzellen – z. B. für Zeltplanen oder Outdoorkleidung – sind möglicherweise auf Perowskitbasis realisierbar.

Perowskitsolarzellen eignen sich insbesondere auch für sogenannte **Tandem- oder Mehrfachsolarzellen**. Diese bestehen aus übereinander gestapelten Schichten verschiedener Materialien, die auf unterschiedliche Wellenlängen der einfallenden Strahlung angepasst sind. Es wird beispielsweise daran geforscht, Perowskitsolarzellen auf herkömmliche Siliziumsolarzellen aufzudrucken. Dadurch ließe sich ein größerer Teil des solaren Spektrums nutzen und der Gesamtwirkungsgrad könnte auf über 40 Prozent gesteigert werden.

Trotz der vielversprechenden Entwicklungen wird das weitere **Potenzial** der Perowskit-solarzellen sehr unterschiedlich bewertet. So sind noch einige Herausforderungen zu bewältigen, ehe die neuen Zellen kommerziell verfügbar sein könnten. Heutige Zellen sind zum einen noch sehr empfindlich gegenüber Feuchtigkeit, was ihre Langzeitstabilität negativ beeinflusst. Noch kritischer ist aber, dass sie stets geringe Mengen an giftigem Blei enthalten, so dass sichergestellt werden müsste, dass während ihrer Nutzung und Entsorgung keine schädlichen Substanzen in die Umwelt übergehen können. Zwar wird an Alternativen geforscht, diese Anstrengungen sind aber bisher noch nicht weit gediehen.

Es ist möglich, dass diese Probleme bereits in wenigen Jahren behoben werden können. In dem Fall würden Perowskitsolarzellen zu einer ernsthaften Konkurrenz auch der bereits etablierten Technologie der Siliziumsolarzellen. Diesen gegenüber sind sie wesentlich unkomplizierter in der Herstellung, und das bei ebenfalls bereits recht hohem Wirkungsgrad. Eine erste Kommerzialisierung wäre dabei vor allem als Bestandteil von Tandemsolarzellen zu erwarten.

Dr. Ramona Langner, April 2015

Visuelle Navigation

Einer der größten Vorteile der visuellen Navigation ist die Unabhängigkeit von einer speziellen externen Infrastruktur, wie beispielsweise einem Navigationssatellitensystem, wodurch sie sich in nahezu beliebigen Umgebungen einsetzen lässt.

Methoden zur visuellen Navigation beruhen auf einer computergestützten Auswertung von Kamerabildern und dienen der Bestimmung von Position, Ausrichtung oder Eigenbewegung mobiler Systeme. Sie nutzen dazu ausschließlich passive optische bildgebende Verfahren. Einer ihrer größten Vorteile ist die Unabhängigkeit von einer speziellen externen Infrastruktur, wie beispielsweise einem Navigationssatellitensystem. Dadurch lassen sie sich in nahezu beliebigen Umgebungen einsetzen. In den letzten Jahren hat der Umfang der Forschung und Entwicklung im Bereich der visuellen Navigation stark zugenommen und es konnten bereits große Fortschritte erzielt und erste kommerzielle Anwendungen realisiert werden. Trotzdem ist in vielen potenziellen Einsatzbereichen eine zuverlässige rein visuelle Navigation in Echtzeit heute noch nicht möglich.

Es gibt zwei grundsätzlich verschiedene Herangehensweisen, nach denen sich visuelle Navigationsansätze gruppieren lassen. Die kartenbasierten Ansätze der visuellen Navigation dienen vorrangig der absoluten Positionsbestimmung, also der Bestimmung der eigenen Koordinaten in Bezug auf einen Lageplan oder eine Landkarte. Diese erfolgt in der Regel in vier Schritten. Auf die Bilderfassung folgt eine Identifikation von geeigneten Landmarken in den aktuellen Bildern der Umgebung. Nach diesen Landmarken wird dann in einer Kartendatenbank gesucht. Aus der räumlichen Beziehung der in Kamerabildern und Karte übereinstimmend gefundenen Landmarken erfolgt dann die Berechnung der Position. Bei diesen Kartendaten kann es sich um Darstellungen handeln, die die Umgebung maßstabsgetreu beschreiben, wie z. B. 3D-Modelle von Innenräumen oder mit Koordinaten versehene Luftbilder. Auch möglich sind sog. topologische Karten, die die Umgebung abstrahiert darstellen und lediglich die Nachbarschaft charakteristischer Orte abbilden,

wie z. B. bei der Darstellung von Bahnliniennetzen. Neben derartigen Systemen, die bestehende Karten nutzen, gibt es auch solche, die Karten der ihnen unbekannten Umgebung erst während der Navigation erstellen, ständig erweitern und ihre Positionen innerhalb dieser Karten bestimmen. Solche Ansätze sind unter der Bezeichnung Visual SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) bekannt.

Kartenlose Ansätze der visuellen Navigation kommen gänzlich ohne eine umfassende Darstellung der Umgebung aus. Sie dienen vorrangig der sog. inkrementellen Positionsbestimmung, wobei die aktuelle Position laufend relativ zur vorausgegangenen Position ermittelt wird. Viele dieser Ansätze basieren auf dem sogenannten optischen Fluss, der die Geschwindigkeiten und Richtungen beschreibt, mit denen sich die Abbilder von Umgebungsmerkmalen von Bild zu Bild auf dem Kamerasensor bewegen. Bewegungen der Plattform erzeugen dabei Flussmuster, aus denen sich relative Veränderungen der Position und Ausrichtung eines mobilen Systems ableiten lassen. Auf optischem Fluss beruhende Verfahren sind dabei vergleichsweise wenig rechenaufwändig. Daher sind sie besonders attraktiv für die Anwendung in sehr kleinen mobilen Systemen, wie z. B. Mini-Drohnen, die nur eine leistungsbeschränkte Computerhardware und Energieversorgung mitführen können. Eine visuelle Bestimmung der zurückgelegten Strecke (visuelle Odometrie) ist auch mit Hilfe sog. Homographien möglich. Hierbei lässt sich aus den unterschiedlichen perspektivischen Verzerrungen in aufeinanderfolgenden Bildern eines Objekts auf die zurückgelegte Strecke schließen.

Anwendungsmöglichkeiten visueller Navigationsansätze im Indoor-Bereich finden sich z. B. im Zusammenhang mit Servicerobotern im Haushalt, Robotern zur Führung von Besuchern in Museen oder der Robotik in Logistik, Lagerhaltung und Produktion. Im Outdoor-Bereich kann die Navigation von Landfahrzeugen durch visuelle Ansätze unterstützt werden, von Fahrerassistenzsystemen zur Spurhaltung und Kollisionsvermeidung über die autonome Straßennavigation bis hin zur Planetenerkundung mit unbemannten Systemen. Kleine Drohnen, die häufig auch in geringem Abstand von Objekten operieren, können insbesondere von der hohen Genauigkeit visueller Ansätze bei der Positionierung profitieren, z. B. beim Einsatz von Multicoptern zur Inspektion von Hochspannungsleitungen oder zur Auslieferung bzw. Abholung von Waren. Außerdem können visuelle Navigationsverfahren die Positionsbestimmung bei Problemen mit dem GPS-Empfang oft genauer übernehmen als heute übliche Trägheitsnavigationssensoren. Dies ist insbesondere im militärischen Bereich interessant, um die Navigation von Lenkflugkörpern und Drohnen auch bei absicht-

licher Störung des GPS-Empfangs sicherzustellen. Ebenfalls möglich ist der Einsatz visueller Ansätze in unter Wasser operierenden Fahrzeugen, z. B. bei der autonomen Inspektion von Pipelines oder Kabeln. Im Bereich der Navigation von Fußgängern sind visuelle Ansätze insbesondere im Indoor-Bereich interessant, beispielsweise zur Orientierung in großen Gebäuden wie Flughäfen oder Einkaufszentren.

Je nach Anforderung werden visuelle Navigationsverfahren heute bereits eingesetzt, in der Regel in Ergänzung zu anderen Technologien. Mitentscheidend für ihre Verwendbarkeit ist jeweils, dass die Auswertung der Kamerabilder robuste und gleichzeitig effiziente Algorithmen sowie zum Teil sehr hohe Rechenleistungen erfordert. Eine komplexe Herausforderung mit einer Reihe von heute noch ungelösten Problemen stellt die Entwicklung einer visuellen Navigationslösung dar, die in Echtzeit und in möglichst allen Situationen wirklich verlässlich funktioniert. Ein generelles Problem ist z. B. die Anfälligkeit gegenüber wechselnden und schwierigen Beleuchtungsbedingungen. In den nächsten Jahren kann jedoch mit einer kontinuierlichen Verbesserung der Performance visueller Navigationsansätze gerechnet werden. Dazu wird der anhaltende Trend der Leistungs- und Effizienzsteigerung von Computerhardware beitragen. Die Weiterentwicklung der benötigten Algorithmen wird außerdem von den zu erwartenden Fortschritten im Bereich der Bildverarbeitung und Objekterkennung profitieren können.

Dr. David Offenberg, Mai 2015

Hydrothermale Karbonisierung

Unter Hydrothermaler Karbonisierung versteht man die Behandlung feuchter Biomasse mit heißem, unter hohem Druck stehendem Wasser zur Erzeugung eines kohleähnlichen Feststoffs. Für die technische Umsetzung werden verschiedene Reaktorkonzepte entwickelt und getestet.

Unter Hydrothermaler Karbonisierung versteht man die Behandlung feuchter Biomasse mit heißem, unter hohem Druck stehendem Wasser zur Erzeugung eines kohleähnlichen Feststoffs. Die Grundlagen des Verfahrens wurden bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts erforscht, eine großtechnische Nutzbarmachung rückt aber erst heute näher.

Mehr als 90 % der Produkte und Dienstleistungen, die unsere hochtechnisierte Gesellschaft täglich konsumiert, sind direkt oder indirekt von der Förderung kostengünstigen Erdöls abhängig. Dabei ist sich die Fachwelt darüber einig, dass uns das weltweite Erdölfördermaximum – der sogenannte „**Peak Oil**“ – in den nächsten Jahren bevorsteht. Der „Peak Oil“ markiert dabei nicht das Ende des Ölzeitalters, sondern viel mehr den Zeitpunkt, ab dem der Weltmarktpreis für Erdöl – abgesehen von kurzfristigen Schwankungen – aufgrund eines sich verknappenden Angebotes stetig weiter steigt. Um dieser Entwicklung vorzubeugen, haben Bundesregierung und Europäische Union in den letzten Jahren Forschungs- und Förderstrategien für die Umstellung unseres erdölbasierten Wirtschaftssystems auf eine biobasierte Wirtschaftsform – die sog. Bioökonomie – entwickelt. Zu den vielversprechendsten Verfahren zur Biomassekonversion, an denen in diesem Zusammenhang geforscht wird, gehört die hydrothermale Karbonisierung (im Englischen „Carbonization“, daher abgekürzt HTC).

Die HTC-Technologie ahmt allgemein formuliert den natürlichen, Jahrtausende andauernden Prozess der geologischen Kohleentstehung nach. Es handelt sich dabei um ein **thermo-chemisches** Verfahren, das in der Lage ist vor allem nasse Biomasse in einen homogenen, kohlenstoffhaltigen Feststoff (sog. HTC-Kohle) umzuwandeln. Dies gelingt im Zeitraum

weniger Stunden (1 – 24 h) bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen (180 – 280 °C) und nur leicht erhöhten Drücken, welche das Verdampfen des Wassers verhindern. Das flüssige Wasser dient zur homogenen Verteilung der thermischen Energie im Reaktionsraum, zur Verhinderung lokaler Überhitzungen und als Lösungs- und Reaktionsmittel für entstehende Zwischenprodukte. Um Verkokungen und Verbrennungen auszuschließen, muss die Biomasse bei der HTC während des gesamten Reaktionszeitraums vollständig mit Wasser bedeckt sein. Die genauen Reaktionspfade der dabei ablaufenden Hauptreaktionen sind aufgrund der Komplexität ihres Zusammenspiels heute immer noch Gegenstand der Forschung und bis dato lediglich für einzelne reine Stoffe wie Lignin, Cellulose und Glucose bekannt. Die Gesamtreaktion läuft unter Freisetzung von Energie (exotherm) ab und bedarf zur Auslösung lediglich der Zufuhr von Aktivierungsenergie.

Ein wesentlicher **Vorteil der HTC-Technologie** liegt in dem Umstand begründet, dass die zur HTC-Kohleerzeugung verwendete Biomasse im Vergleich zu anderen thermochemischen Biomassekonversionsverfahren nicht erst energieintensiv getrocknet werden muss. Das in der Biomasse enthaltene Wasser nimmt beim HTC-Verfahren als wichtiges Reaktionsmedium an der Umwandlung der Biomasse teil. Anschließend lässt es sich aufgrund der durch die chemischen Reaktionen angestoßenen stofflichen Veränderungen der Biomasse durch einfache mechanische Verfahren (z. B. Pressen) mit wenig Energieeinsatz von der erzeugten HTC-Kohle separieren. Aufgrund dieser Eigenschaft ist die Palette der möglichen **Einsatzstoffe** für das HTC-Verfahren sehr groß und reicht von Abfallstoffen aus der Lebensmittelindustrie über Klärschlamm bis hin zu landwirtschaftlichen Nebenprodukten. Auch die Nutzung von Energiepflanzen ist grundsätzlich denkbar, in der aktuellen Debatte um eine nachhaltige Landnutzung jedoch politisch in Europa nicht gewollt. Die erzeugte HTC-Kohle ähnelt im Hinblick auf ihre stofflichen und verbrennungstechnischen Eigenschaften Braun- oder Steinkohle, wobei sich die tatsächliche Produktqualität durch Variation der Prozessparameter (Prozesstemperatur, Verweildauer, Reaktionsdruck sowie die Beschaffenheit der Ausgangsbiomasse in puncto Wassergehalt, Partikelgröße, Ligningehalt und pH-Wert) steuern lässt.

Die Bandbreite der möglichen **Verwertungspfade für HTC-Kohle** ist groß. Neben der thermischen Nutzung als kohlendioxidneutrale Alternative für konventionelle Kohle ist v. a. die direkte stoffliche Verwertung interessant. Hier kommt z. B. die Nutzung als Bodenverbesserer, Brennstoff, Trägermedium für Katalysatoren, Ionentauscher und als Aktivkohle zur Aufreinigung von Abwasser und Abgasen in Frage. Darüber hinaus ist es

denkbar, auf der Grundlage von HTC-Kohle Industrieruß (Carbon Black) und hochwertige Elektroden herzustellen. Aufgrund der hohen Polarität des Materials ist die nachträgliche Erhöhung des Porenvolumens durch verschiedene konventionelle Methoden wie z. B. chemische Aktivierung, Nanogießen oder mit Hilfe von Geliermitteln einfach zu bewerkstelligen. Die gezielte Variation der Oberflächenbeschaffenheit von HTC-Kohle lässt sich leicht durch Manipulation der Reaktionstemperatur oder eine weiterführende Karbonisierung bewerkstelligen.

Neben der direkten stofflichen Nutzung kommen für die HTC-Kohle auch die Verwertungspfade der klassischen Kohlechemie zur Herstellung von Plattformchemikalien in Frage. Der erfolgreiche Betrieb einer Pilotanlage zur Herstellung eines hochreinen Synthesegases auf Grundlage von HTC-Kohle ist bereits gelungen. Auch der Verwertungspfad über die Herstellung von Kalziumkarbid sowie die darauf aufbauende Acetylen-Chemie bietet denkbare, vielversprechende Nutzungsmöglichkeiten.

Für die technische Umsetzung des HTC-Verfahrens werden heute bereits kommerziell verschiedene Reaktorkonzepte entwickelt und getestet. Es wird sowohl an kontinuierlich arbeitenden Röhrenreaktoren als auch an semikontinuierlich arbeitenden Prozessen gearbeitet. Wirtschaftlich und ökologisch sinnvolle Verfahrenskonzepte beinhalten dabei stets technische Lösungen zur effizienten Wärmerückgewinnung und zur adäquaten Weiterverwendung oder Aufbereitung des Prozesswassers, welches aufgrund seiner hohen Beladung mit organischem Kohlenstoff sehr gut für die Weiterverwendung in der Biogasproduktion oder als Nährlösung für die Aufzucht von Mikroalgen geeignet ist.

Kay Uwe Suwelack, Juni 2015

Structural Health Monitoring

Insgesamt ist erst mittel- bis langfristig damit zu rechnen, dass Structural-Health-Monitoring-Systeme zur Überwachung von Bauteilen während der Nutzung ihr Gesamteinsparpotenzial – z.B. über einen höheren Leichtbaugrad – voll ausschöpfen können.

Große komplexe Strukturen wie z. B. Bauwerke und Flugzeuge unterliegen andauernden Belastungen. Mit der Zeit verändern die eingesetzten Materialien daher ihre physikalischen Eigenschaften und werden geschwächt. Um das Versagen von Bauteilen zu verhindern, wird ihre Sicherheit durch routinemäßige Inspektionen in festgelegten Wartungsintervallen sichergestellt. Die hierbei genutzten Methoden der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung sind ausgereift, bis ins Detail verstanden und kostengünstig. Dennoch gibt es große Bemühungen, den aktuellen Zustand von Strukturen mit Hilfe fest installierter Sensorsysteme ständig automatisch zu diagnostizieren. Solche Structural-Health-Monitoring-Systeme (SHM) sollen je nach Komplexitätsgrad Schäden detektieren, lokalisieren und schließlich auch beurteilen. Vor allem intelligente SHM, die selbstständig Prognosen für die weiteren Nutzungsmöglichkeiten ableiten, befinden sich noch im Forschungsstadium. Ihre Nutzbarmachung wird intensiv vorangetrieben, weil man sich von ihnen weitere Fortschritte bei Wirtschaftlichkeit und Sicherheit verspricht.

Die Sensoren eines SHM werden auf die Oberfläche aufgebracht oder während der Bauteilfertigung in die Struktur integriert. Es gibt bisher nur wenige Ansätze, die Struktur selbst als Sensor zu nutzen. Das wäre z. B. durch Einbringen von Verstärkungsfasern möglich, die gleichzeitig selbst als Sensor wirken könnten. Generell kommt für die Messung physikalischer Schlüsselparameter eines Materials eine Vielzahl unterschiedlicher **Sensortechnologien** infrage. Sensoren, die z. B. auf Dehnungsmessung, Schallemission oder Faseroptik beruhen, gehören zu den passiven Systemen. Aktive Systeme hingegen, die z. B. auf Ultraschall oder Wirbelstromprüfung beruhen, senden eigenständig Signale aus und detektieren deren Wechselwirkungen mit der Struktur. Die gewonnenen Daten

werden entweder kabelgebunden oder drahtlos weitergeleitet. Beim Einsatz drahtloser Sensoren stellt die Energieversorgung über lange Zeiträume jedoch ein Problem dar.

Einfachere SHM, die in Echtzeit Informationen über die aktuelle strukturelle Integrität liefern, sind schon weit entwickelt. Über ihren Einsatz entscheiden nicht zuletzt wirtschaftliche Aspekte. Im Grundlagenstadium befinden sich dagegen intelligente Systeme, die zukünftig – in begrenztem Umfang – eigenständig Entscheidungen treffen sollen. Üblicherweise wird hier der aktuelle Zustand mit einer Referenzdatenbank abgeglichen und eventuelle Abweichungen werden entsprechenden Strukturschäden zugewiesen, wofür große Datenmengen verarbeitet werden müssen. Technologien des Maschinellen Lernens soll dazu führen, dass die Verarbeitung nicht nur schneller erfolgen kann, sondern dass zusätzlich zu bereits gelernten Signalen auch bisher unbekannte interpretiert werden können. Ein anderer Ansatz besteht darin, die gegenseitige Abhängigkeit der Daten benachbarter Sensoren auszunutzen. Um Aussagen über die noch verbleibende Lebensdauer treffen zu können, müssen in jedem Fall komplexe Prognosetools entwickelt werden.

SHM brechen mit der herkömmlichen Wartungsphilosophie, da sie beginnende Schwächen einer Struktur erkennen, lange bevor die Funktionsfähigkeit gefährdet wird. Auch Auswirkungen durch die Akkumulation mehrerer Schäden, die einzeln gesehen alle noch innerhalb der Toleranz liegen, werden durch SHM erfasst. Diese frühzeitige Warnung ermöglicht es, den rein präventiven Austausch von Teilen aufgrund von Einsatzzeit oder Laufleistung durch eine **zustandsorientierte Instandhaltung** (Maintenance on Demand) zu ersetzen. Generell gibt es dafür eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten, die eine hohe zivile Dynamik erwarten lässt. Bei statischen Strukturen wie Bauwerken (z. B. Brücken, Hochhäuser) und Industrieanlagen (z. B. Pipelines, Raffinerien, Windkraftanlagen) sind die zu überprüfenden Bauteile oft schlecht zugänglich oder unterliegen unwirtlichen Umgebungsbedingungen. SHM können hier die Betriebslebensdauer von Bauteilen verlängern und so die hohen Kosten für die Instandhaltung minimieren. Teurer Stillstand kann aufgrund verlängerter Wartungsintervalle und der Planbarkeit von Reparaturen reduziert werden. Die Überwachung von mobilen Systemen (z. B. Kfz, Flugzeuge) bietet darüber hinaus noch weiteres Einsparpotenzial, da bei neuen Konstruktionen die Sicherheitsmargen verringert werden könnten und somit ein höherer Leichtbaugrad zu realisieren wäre, ohne die Zuverlässigkeit der Systeme zu verringern. Dadurch eröffnet sich grundsätzlich die Möglichkeit, den Energieverbrauch der Systeme zu senken und den Nutzen neuer Werkstoffe oder Designs schneller ausschöpfen zu können.

Besondere Vorteile können SHM im Hinblick auf die spezifischen Einsatzbedingungen militärischer Systeme bringen, die im Unterschied zu zivilen auch mit schlecht vorhersagbaren Belastungsspitzen fertig werden müssen. Mit SHM könnte sowohl eine Nutzungsdauer über das theoretische Ende hinaus als auch eine unvorhergesehen starke Nutzung ohne Sicherheitseinbußen realisiert werden. Weiterhin könnten SHM neben einer effizienteren Logistik auch die kurzfristige Einsatzplanung unterstützen, indem plötzlich auftretende Schäden während eines Konflikts – z.B. durch Beschuss – detektiert und Entscheidungen darüber getroffen werden, ob ein System trotzdem zumindest eingeschränkt zur Verfügung steht.

Trotz des großen Potenzials bremsen unabhängig von den Entwicklungsaufwendungen hohe Installationskosten die breite Markteinführung von SHM. Dazu kommen **nichttechnische und nichtökonomische Aspekte**. Diese liegen vor allem im rechtlichen Bereich und bei der gesellschaftlichen Akzeptanz, denn die mit ihrer Einführung verbundene Abkehr von etablierten Wartungsphilosophien kann durchaus zu Verunsicherungen (z.B. der Kunden von Fluggesellschaften) führen. Auf jeden Fall ergibt sich hier ein erheblicher neuer Regulierungsbedarf. So ist insgesamt erst mittel- bis langfristig damit zu rechnen, dass SHM ihr Gesamteinsparpotenzial – z.B. über einen höheren Leichtbaugrad – voll ausschöpfen können und die erforderlichen rechtlichen Rahmenbedingungen für ihre Nutzung geschaffen worden sind.

Dr. Heike Brandt, Dr. Ramona Langner, Juli 2015

Formgedächtnispolymer

Formgedächtnispolymer sollte die schon seit längerem erforschten und heute auch bereits weiter verbreiteten metallischen Formgedächtnislegierungen zunehmend ergänzen und in Teilbereichen auch ersetzen.

Formgedächtnispolymer (FGP) gehören zu der vielfältigen Gruppe der sog. Intelligenten Materialien und weisen ähnlich wie die metallischen Formgedächtnislegierungen (FGL) einen Formgedächtniseffekt (FGE) auf. Dieser befähigt sie in ihrer einfachsten Ausführung, nach einer starken Formveränderung in einen zuvor festgelegten Zustand zurückzukehren. Als Reiz für diese Rückstellung können beispielsweise Änderungen der Temperatur, der Lichtverhältnisse oder des Magnetfeldes genutzt werden. Die wissenschaftliche Forschung auf dem Gebiet der FGP hat in den letzten 10 Jahren stark zugenommen. Es wird damit gerechnet, dass sie ihr Einsatzspektrum in Zukunft weiter ausdehnen werden. Insbesondere sollten sie die schon seit längerem erforschten und heute auch bereits weiter verbreiteten FGL zunehmend ergänzen und in Teilbereichen auch ersetzen.

Der FGE ist u. a. abhängig von dem molekularen Aufbau der Polymere und der daraus entstehenden inneren Struktur. Das durch Variation dieser Parameter erreichbare Spektrum ihrer potenziellen Eigenschaften und damit Anwendungsgebiete ist groß. Dabei reicht ihr Entwicklungsstand aktuell vom Grundlagen- bzw. Forschungsstadium über prototypische Anwendungen bis hin zu Massenmarktpunkten. FGP sind bereits vielfach in **Alltagsanwendungen** vertreten. Dazu gehören Ummantelungen von Elektrokabeln, Wärmeschrumpffolien für Verpackungen, Matratzen oder Schuhsohlen. Auch als Dichtungsstoffe in Dehnfugen an Brücken und Betondecken finden sie Verwendung. Zu Beginn der Forschung war das Interesse an diesen intelligenten Werkstoffen vor allem im Automobilbereich sehr groß. In den letzten Jahren haben FGP jedoch auch Einsatzgebiete in komplexeren Anwendungsbereichen wie der sog. Selbstheilenden Materialien oder der Medizin gefunden. Hier sind z. B. sich selbst zusammenziehendes Nahtmaterial, intra-

venöse Kanülen oder Kunststoffverbände und -schienen zur Ruhigstellung von Knochenbrüchen seit längerem bekannt.

Das zunehmende Interesse an der Nutzbarkeit in High-Tech-Anwendungen ist auch darin begründet, dass mittlerweile die Herstellung von FGP gelungen ist, die abhängig vom Reiz mehrere Zwischenformen annehmen können oder einen Formänderungseffekt aufweisen. Bei Letzterem wird durch einen Reiz eine Formveränderung ausgelöst, die dadurch wieder rückgängig gemacht und gesteuert werden kann, dass der Reiz entfernt, umgekehrt oder verändert wird. Ein solches Verhalten ist besonders in der **Robotik und Mikrosystemtechnik** für die Herstellung künstlicher Muskeln von Interesse, die zyklische Belastungen aufweisen. FGP könnten aber auch für kleine, sich selbst faltende Roboter genutzt werden, die z.B. zunächst flach sind und sich auf ein Aktivierungssignal hin (z.B. eine Temperaturerhöhung) selbständig in die entsprechende Form falten.

Ein potenziell großes Einsatzspektrum besteht in der **Medizin** bzw. **Medizintechnik**. FGP eignen sich besonders gut zur Anpassung an organische Konturen wie Haut, Gewebe oder Organe. Daher wird u.a. die Idee verfolgt, sog. organische Dünnschichttransistoren (OTFT), die zur Stimulation und Überwachung des Nervensystems sowie zur Kartierung der Herz-Elektrophysiologie eingesetzt werden, auf FGP-Materialien aufzubringen. Durch das enge Anliegen des Materials an den Organen erhöht sich die Genauigkeit der ausgelesenen Daten. Zudem wird an Gefäßstützen und Wirkstofftransportsystemen aus FGP geforscht. Die Polymere haben eine höhere Flexibilität als entsprechende FGL und würden es ermöglichen, Medikamente punkt- und zeitgenau im Körper freizusetzen. Eine besondere Herausforderung bei medizinischen Anwendungen liegt jedoch in der Sterilisierung der Geräte, da bei Polymeren besonders darauf geachtet werden muss, dass die programmierten Eigenschaften während dieses Prozesses erhalten bleiben.

Ein weiteres großes Anwendungsgebiet von FGP können **Membran- und Oberflächen-Technologien** sein. Zukünftig ist z.B. die Modifikation verschiedenster Oberflächen oder Membranen mit Hilfe von FGP denkbar. Teilweise umgesetzt ist dies bereits im Bereich atmungsaktiver Textilmembranen. Möglich sind jedoch auch Filtermembranen, die zur Trennung von Flüssigkeits- oder Gasgemischen eingesetzt werden können. Dabei würde die Membran selbständig auf einen Wechsel des Mediums reagieren und das Filterverhalten ändern oder einen Alarm auslösen. Im Bereich optischer Oberflächen können FGP z.B. für die Herstellung nichtreflektiver Beschichtungen eingesetzt werden, was für Solarzellen

oder Displays von großem Vorteil wäre. Verwendungen von FGP an Oberflächen schließen aber auch Prototypen und marktreife Systeme für den Produkt- und Markenschutz mit ein. Dabei werden Hologramme, Bar- oder QR-Codes erst nach dem Erwärmen auf eine bestimmte Temperatur sicht- oder lesbar.

In der **Luft- und Raumfahrt** ist der Einsatz von FGP in Scharnieren für sich entfaltende Strukturen wie Antennen, Solarzellen oder Sonnensegel von Interesse. Zudem könnten sie einen Beitrag zu verformbaren Flugzeugflügeln oder zur Trimmung von Helikopterrotorblättern leisten. Weitere potenzielle Einsatzgebiete umfassen hier z. B. licht- und / oder temperaturabhängige Sensor-Aktor-Systeme, mit Licht schaltbare Mikroventile sowie reversible Haftsysteme, z. B. für die Füße von Kletterrobotern.

Bei aller Vielfalt potenzieller zukünftiger Anwendungen werden sich FGP möglicherweise nicht in allen Bereichen durchsetzen, da es viele und dabei zum Teil sehr leistungsfähige **konkurrierende Technologien** gibt. Um z. B. bereits eingesetzte FGL zu verdrängen, müssen sie diesen in den geforderten Eigenschaften zumindest ebenbürtig sein. Das wird insbesondere dann schwierig, wenn eine gewisse mit der Formänderung verbundene zu übertragende Kraft verlangt wird. Zudem gibt es gerade im Bereich Robotik und Mikrosystemtechnik viele Systemlösungen ohne FGE, die FGP je nach Anwendung derzeit noch überlegen sind (z. B. elektroaktive Polymere). Damit sich die Technologie solche komplexeren Anwendungsbereiche trotzdem erschließen kann, gibt es derzeit Entwicklungsbemühungen zur Verbesserung der Eigenschaften von FGP. Dabei konzentriert man sich insbesondere auf die Langzeitstabilität, die Zuverlässigkeit und die Schaltzeiten.

Dr. Diana Freudendahl, August 2015

Aktive Lebensmittelverpackungen

Auch wenn die Anwendungsoptionen aktiv auf die Lebensmittel einwirkender Verpackungen vielfältig sind, stehen der breiten Umsetzung dieser Technologie durchaus noch einige Hürden im Wege.

Konventionelle Lebensmittelverpackungen dienen in erster Linie dazu, ihren Inhalt vor schädlichen Umwelteinflüssen zu schützen und dessen Qualität zu erhalten. Sie verhalten sich im Idealfall neutral und dürfen keine oder zumindest nur so geringe Mengen an Fremdstoffen abgeben, dass diese die Gesundheit des Verbrauchers nicht gefährden.

Inzwischen führen jedoch ökonomische Überlegungen und neue Anforderungen an Eigenschaften und Haltbarkeit der Lebensmittel zu verstärkten Bemühungen, sog. Aktive Verpackungen einzusetzen. Diese wirken aktiv auf die verpackten Lebensmittel ein, z. B. indem sie ihnen oder ihrer Umgebung gezielt Stoffe zuführen oder entziehen. Trotz vielfältiger prinzipieller Möglichkeiten zu ihrer Realisierung und bereits erfolgter Anwendungen befinden sich aktive Lebensmittelverpackungen insgesamt noch am Anfang ihrer Entwicklung. Insbesondere ist eine EU-weite Gesetzgebung für Grenzwerte, die die Nutzung aktiver Verpackungen aus übergeordneter Sicht regelt, noch im Aufbau.

Bei Aktiven Verpackungen sind verschiedene Wirkprinzipien möglich, die auch in Kombination miteinander genutzt werden können. Die aktive Komponente wird entweder in Form eines Inlets oder Sachets der fertigen Verpackung beigelegt oder direkt in das Verpackungsmaterial eingearbeitet. Dies kann sowohl eine Polymermatrix sein als auch ein zellulosebasiertes Behältnis.

Auch Nanoverbundwerkstoffe kommen beispielsweise aufgrund ihrer im Vergleich zu herkömmlichen Materialien verbesserten Barriereeigenschaften oder ihrer antimikrobiellen Wirkung als aktive Komponenten in Frage.

Das Spektrum der damit realisierbaren aktiven Verpackungsfunktionen ist vielfältig. Es reicht vom Lichtschutz über die Sauerstoff- oder Ethylen-Absorption und die Feuchtigkeitsregulierung bis hin zu antimikrobiellen Oberflächen.

Ein Lichtschutz ist z. B. notwendig, um lichtinduzierte Oxidation zu verhindern, die für Vitaminverlust, Ausbleichen und Aromaveränderungen verantwortlich ist. Realisierbar ist er u.a. durch das Einbringen von UV-Filtern, Farbpigmenten oder Farbstoffen, die im Bereich des sichtbaren Lichts filtern.

Sauerstoff ist für das Wachstum aerober Mikroorganismen verantwortlich, was zu Schimmel oder der Bildung von Toxinen führen kann. Zu den drei wichtigsten Arten von Sauerstoffabsorbern gehören polymerbasierte Funktionsschichten, die z. B. durch Bestrahlung mit UV-Licht oder über Wärme aktiviert werden. Sie finden bereits in PET-Flaschen Anwendung. Eisenbasierte Sauerstoffabsorber dagegen werden von der Feuchtigkeit aus dem Lebensmittel aktiviert und hauptsächlich als Inlets oder Sachets beigefügt. Sauerstoff verbrauchende, enzymatische Reaktionen kommen ebenfalls als aktive Komponenten in Frage. Auch die Kombination von Sauerstoff-Absorbern mit Schutzgasatmosphären oder Vakuum ist eine Option.

Ethylenabsorber, die sowohl in Folienverpackungen als auch in Wellpappen eingebracht werden können, sind vor allem für die Lagerung und den Transport von Obst und Gemüse von Interesse. Durch einen Entzug des während der natürlichen Reifung gebildeten und zur weiteren Reifung notwendigen Ethylens kann der Reifungsprozess z. B. von Bananen gestoppt werden. Geeignete Stoffe sind Kaliumpermanganat oder Aktivkohle.

Auch eine Feuchtigkeitsregulierung während der Lagerung trägt sowohl bei Obst und Gemüse als auch bei Fleischwaren zur Verbesserung der Haltbarkeit und zum Erhalt von Geschmack bei. Ein mögliches Konzept ist hier die Dispersion von Speisesalz oder Kaliumchlorid in einer Kunststoff-Matrix. Diese wird derart in eine Mehrschicht-Folie integriert, dass Poren entstehen, in deren Zentren die reversibel mit Wasser regierenden Salzpartikel liegen.

Einen antimikrobiellen Effekt haben Verpackungen, die aktiv Kohlendioxid freisetzen. Das gelingt z. B., wenn austretender Fleischsaft unter Bildung von Kohlendioxid mit Zitronensäure und Natron reagiert, welche sich in einem beigefügten Pad befinden. Eine weitere

interessante Entwicklung zum Schutz vor mikrobiellem Verderb stellt der Einsatz von mikrobiziden Oberflächen dar, die in direktem Kontakt mit dem betreffenden Lebensmittel stehen. Abgesehen von silberbasierten antimikrobiellen Materialien, die in Japan und den USA breiten Einsatz finden, konnten sich jedoch bislang keine weiteren Varianten kommerziell behaupten. Weitere potenzielle Kandidaten sind hier z.B. bestimmte Enzyme, aber auch Meerrettich- oder Rosmarin-Extrakte sowie Chitosan aus Pilzen oder Krustentieren. Da die natürlichen Wirkstoffe in der Regel jedoch sehr geschmacks- bzw. geruchsintensiv sind, ist deren Einsatz nur beschränkt möglich. Prinzipiell kommen auch Antibiotika bzw. Antimykotica als aktive Komponenten in Frage, aber aufgrund von möglichen Resistenzbildungen bei Mikroorganismen ist ihr Einsatz eher fraglich. Vielversprechender erscheinen da die Konservierungsstoffe Sorbin- oder Benzoesäure. Sie besitzen kaum Eigengeschmack und lassen sich gut verarbeiten.

Aktive Verpackungslösungen beschränken sich aber nicht nur auf den Transport und die Lagerung, sondern finden zunehmend auch für Mikrowellengerichte Anwendung. Hier können sie das elektromagnetische Feld modifizieren oder unter dessen Einwirkung selbst Hitze erzeugen, damit die Mahlzeit die optimale Bräunung erhält bzw. fest und knusprig bleibt.

Auch wenn die Anwendungsoptionen aktiver Verpackungen vielfältig sind, stehen durchaus noch einige Hürden der breiten Umsetzung dieser Technologie im Wege. So sind die Herstellungsprozesse aktiver Verpackungen zwar mit denen der passiven Varianten vergleichbar, es bleibt aber zu berücksichtigen, dass viele aktive Komponenten reaktiv sind und korrosiv wirken können. Im Extremfall ist mit einer deutlichen Reduzierung der Standzeiten von Werkzeugen zu rechnen. Ebenso muss mit einer erhöhten Ausschussrate bei den hergestellten Verpackungsmaterialien gerechnet werden. Auch in diesem Bereich ist demnach noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu leisten.

Dr. Claudia Notthoff, September 2015

Software-Defined Networking

Von dem neuen Architekturansatz des Software-Defined Networking verspricht man sich eine erhebliche Vereinfachung des Managements von Computernetzwerken.

Computernetzwerke bilden eine wichtige technologische Grundlage für viele bedeutende Anwendungen sowohl im Unternehmensumfeld als auch im privaten Bereich. Eine erhebliche Vereinfachung des Managements solcher Netzwerke verspricht man sich von einem neuen Ansatz für deren Architektur, dem sog. Software-Defined Networking (SDN). SDN wird von einigen Unternehmen bereits genutzt, steht aber insgesamt noch am Anfang seiner Entwicklung.

Die Weiterleitung von Daten in Computernetzwerken erfolgt über sog. **Router bzw. Switches**. Bei herkömmlichen Netzwerken weisen diese Geräte gleichzeitig Funktionalitäten auf zwei unterschiedlichen Ebenen auf. Erstens wird auf der Control Plane ermittelt, wie das Routing von Datenpaketen geschieht, d. h. auf welchem Weg ein Datenpaket im Netzwerk von seinem Ausgangspunkt zu seinem Ziel gelangt. Zweitens werden auf der Data Plane die Datenpakete nach den Vorgaben der Control Plane weitergeleitet. Dabei entscheidet jeder Router unabhängig von den anderen, zu welchem Router er ein Datenpaket als Nächstes weiterleitet. Dafür verfügt jeder Router über ein gewisses Maß an eigener Intelligenz. Beim SDN dagegen enthalten die Switches, die hier die Datenpakete weiterleiten, keine solche Intelligenz. Hier wird die Control Plane von der Data Plane entkoppelt und in einer externen Komponente, dem **SDN-Controller**, zusammengefasst. Die Intelligenz des Netzwerks ist dann im Wesentlichen in diesem SDN-Controller enthalten, der außerdem über eine globale Sicht auf das Netzwerk verfügt.

Im Vergleich zu herkömmlichen Netzwerken bietet SDN eine Reihe von **Vorteilen**. So ermöglicht es eine Programmierbarkeit des Netzwerks mit Hilfe von standardisierten

Programmierschnittstellen. Daher kann ein SDN-basiertes Netzwerk durch entsprechende Programmierung weiterentwickelt werden, ohne die dem Netzwerk zugrundeliegende Hardware verändern zu müssen. Außerdem kann SDN das Netzwerk-Management erheblich vereinfachen, da z.B. für die Umsetzung von Richtlinien im Netzwerk nicht mehr jedes Netzwerkgerät einzeln auf der Grundlage von herstellerspezifischen Befehlen konfiguriert werden muss. Ein weiterer Vorteil von SDN ist der mögliche Einsatz von marktüblicher Standard-Computerhardware, wodurch es leichter ist, von allgemeinen Leistungssteigerungen in der Informationstechnologie zu profitieren. Außerdem können SDN-Switches in Abhängigkeit von ihrer Programmierung nicht nur als Router bzw. Switch eingesetzt werden, sondern auch als ein anderes Netzwerkgerät. Hierzu zählen z.B. Firewalls, mit deren Hilfe der Datenverkehr in einem Netzwerk kontrolliert werden kann und unerlaubte Aktivitäten unterbunden werden können.

SDN lässt sich in einer Vielzahl von **Anwendungen** nutzen. Ein mögliches Anwendungsbereich sind z.B. Unternehmensnetzwerke. Hier kann SDN u.a. dabei helfen, den Datenverkehr im Netzwerk zu überwachen oder die Leistungsfähigkeit des Netzwerks zu optimieren (Traffic Engineering), z. B. hinsichtlich einer gleichmäßigen Verteilung der anfallenden Arbeitslast auf mehrere Netzwerkverbindungen (Load Balancing). Ein weiteres Einsatzgebiet von SDN sind Rechenzentren, z. B. im Bereich der Netzwerkvirtualisierung. Eine Netzwerkvirtualisierung ist eine Abstraktion des Netzwerks in Form von virtuellen Netzwerkkomponenten, die von der physikalischen Netzwerkinfrastruktur entkoppelt sind. So können z.B. mehrere virtuelle Netzwerke auf einem einzigen physikalischen Netzwerk basieren. Auf diese Weise lassen sich beispielsweise Netzwerkressourcen besser auf verschiedene Nutzer aufteilen.

SDN kann außerdem eingesetzt werden, um die Netzwerksicherheit zu verbessern, z. B. durch die bereits erwähnte Möglichkeit, jeden Switch auch als Firewall nutzen zu können. Darüber hinaus erlaubt es SDN, in einfacher Weise Informationen über den Datenverkehr zu sammeln. Diese Informationen lassen sich z. B. einsetzen, um Angriffe zu erkennen, die das Ziel haben, ein Computersystem durch eine Flut von Netzwerkanfragen zu überlasten (Denial-of-Service-Angriffe). Im Bereich der Funknetze, wie z.B. Mobilfunknetze oder WLANs (Wireless Local Area Networks), könnte SDN z. B. einen einfacheren Ansatz darstellen, um es Nutzern zu ermöglichen, sich nahtlos zwischen verschiedenen Funknetzinfrastrukturen zu bewegen, die durch unterschiedliche Anbieter betrieben werden.

SDN wird teilweise bereits in Unternehmen eingesetzt, z. B. im Bereich des Traffic Engineering. Erste **kommerzielle Produkte** sind ebenfalls bereits verfügbar. So bieten viele Hersteller von Switches z. B. Produkte mit einer SDN-Unterstützung an. Darüber hinaus ist in Gestalt der Programmierschnittstelle OpenFlow mittlerweile ein erster Standard für die Kommunikation zwischen SDN-Controller und -Switches etabliert. Dennoch existieren noch einige **technische Herausforderungen** hinsichtlich SDN. Eine große Herausforderung besteht z. B. in der Skalierbarkeit dieses Ansatzes, d. h. inwieweit und in welcher Form er in der Lage ist, bei einer Vergrößerung des Netzwerks, z. B. einer Erhöhung der Anzahl der Switches, die zusätzliche Arbeitslast zu bewältigen. Aufgrund der Zentralisierung der Control-Plane-Funktionalität im SDN-Controller stellt dieser nämlich einen potenziellen Flaschenhals dar. Ein möglicher Ansatz, um die Skalierbarkeit zu verbessern, ist die Erhöhung der Leistungsfähigkeit des SDN-Controllers, z. B. indem dieser physikalisch auf mehrere Systeme verteilt wird, was eine Parallelverarbeitung erlaubt.

Generell stellt SDN einen **vielversprechenden neuen Ansatz** für die Architektur von Netzwerken dar. Prinzipiell ist es zwar möglich, die beschriebenen Anwendungen von SDN auch auf der Basis herkömmlicher Netzwerktechnologien zu realisieren. Jedoch wäre dies mit einem deutlich höheren Aufwand verbunden, da sich z. B. herkömmliche Switches nicht einfach durch herstellerfremde Programme steuern lassen. Es ist daher davon auszugehen, dass SDN in Zukunft zunehmend Verbreitung finden wird. SDN kann dabei eine Schlüsseltechnologie für die Weiterentwicklung von Netzwerken sein, da sich auf dieser Basis neue Technologieansätze im Netzwerkbereich einfacher verwirklichen lassen.

Dr. Klaus Ruhlig, Oktober 2015

Brain-Computer-Interfaces

Bidirektionale Brain-Computer-Interfaces, die sowohl Informationen auslesen als auch Signale ins Gehirn einspeisen können, könnten in ferner Zukunft eine maschinenvermittelte Hirn-zu-Hirn-Kommunikation ermöglichen.

Brain-Computer-Interfaces (BCI, Synonym: Brain-Machine-Interfaces) ermöglichen eine direkte Informationsübertragung zwischen einem organischen Gehirn und einem technischen Schaltkreis. Durch das Auslesen von Gedanken bzw. mentalen Befehlen können sie als neurotechnologische Eingabesysteme eine sprach- und bewegungsunabhängige Maschinensteuerung vermitteln. Weil sie völlig ohne Betätigung irgendeines Muskels auskommen, eröffnen BCI grundsätzlich revolutionäre Bedienmöglichkeiten. Ihre Umsetzung wird jedoch durch beträchtliche technologische Herausforderungen erschwert, was den hohen Entwicklungsaufwand in diesem Bereich erklärt.

An erster Stelle werden körperlich behinderte Menschen von der Realisierung von BCI profitieren. Hier gibt es bereits prototypische Systeme, die etwa die Steuerung eines Cursors, die Bedienung eines virtuellen Buchstabierprogramms oder die Kontrolle von robotischen bzw. prosthetischen Effektoren erlauben. Parallel dazu rücken in den letzten Jahren zunehmend auch nicht-medizinische Einsatzmöglichkeiten für gesunde Nutzer in den Fokus des Interesses, z.B. die Lenkung von Fahrzeugen oder Robotern, die Überwachung von Bewusstseins- und Gefühlszuständen oder die Interaktion mit virtuellen Umgebungen (insbesondere im Bereich Gaming).

Die Kopplung von Gehirn und Computer beruht grundsätzlich immer auf der Erfassung und Verarbeitung von spezifischen physiologischen Signalen, beispielsweise elektrischen Potentialschwankungen oder Fluktuationen im Sauerstoffgehalt des Blutes, die Aufschluss über die neuronale Aktivität geben. Die räumliche und zeitliche Dynamik dieser Signale kann über nicht-invasive Ableitverfahren wie die Elektroenzephalographie (EEG) oder die

funktionelle Nahinfrarotspektroskopie (fNIRS) gemessen werden. Die erfassten Aktivitätsmuster werden vom BCI fortlaufend mit vorgegebenen oder erlernten Referenzmustern verglichen. Auf diese Weise identifiziert das System charakteristische neuronale Signaturen und Motive, die als Kontrollssignale dienen. Durch die Identifikation und Klassifikation der Kontrollssignale entschlüsselt das BCI die Intentionen des Nutzers und generiert daraufhin entsprechende maschinelle Steuerbefehle.

Rehabilitationsmedizinische Anwendungen stehen auch weiterhin im Vordergrund der BCI-Forschung. Insbesondere in den Bereichen der Signalerfassung und -verarbeitung wurden hier in den letzten Jahren gute Fortschritte erzielt – beispielsweise durch die Entwicklung von einfacheren und zuverlässigeren Messsensoren sowie präziseren und schnelleren Klassifikationsalgorithmen. Dennoch befinden sich medizinische BCI gerade erst an der Schwelle zur Marktreife; sie sind noch immer störanfällig, umständlich in der Nutzung und bislang nur wenigen Patienten zugänglich. Umgekehrt vermarkten diverse Hersteller bereits heute vergleichsweise einfache, nicht-medizinische BCI in den Bereichen Entertainment, Fitness und Wellness. So sollen BCI-Headsets beispielsweise als Biofeedback-Systeme die bewusste Beeinflussung der eigenen Gemütslage ermöglichen und so helfen, Stress abzubauen oder die Konzentrationsfähigkeit zu erhöhen. Hier geht es also noch nicht um die Steuerung eines maschinellen Systems.

Generell erweist sich die niedrige Informationsübertragungsrate zwischen Gehirn und Computer als wesentliches Hindernis bei allen gegenwärtigen BCI. Zudem werden die mentalen Kommandos von den Systemen bisweilen nicht verstanden oder falsch interpretiert. Zwar kann diese Fehlerrate reduziert werden, wenn es dem Nutzer gelingt, besonders klare Befehle zu senden, dies erfordert jedoch intensives Training und ein hohes Maß an Konzentration. Eine weitere Hürde stellt schließlich der Schritt aus der kontrollierten Laborumgebung hinein in die alltägliche Anwendung dar. Ein hohes Hintergrundrauschen aufgrund elektromagnetischer Fremdsignale (z. B. Netzbrummen) und die Ablenkung des Nutzers durch eine Vielzahl unterschiedlicher Sinnesreize sind nur zwei Aspekte, welche die Funktion der Systeme dabei negativ beeinflussen.

Im Vergleich zu herkömmlichen Bedien- und Steuerinstrumenten (z. B. Maus, Tastatur oder Lenkrad) bieten heutige BCI gesunden Nutzern deshalb noch keine Vorteile. Im Regelfall wird die Leistungsfähigkeit von Personen, die prinzipiell nicht auf ein BCI angewiesen sind, hier sogar entscheidend eingeschränkt. Allerdings eröffnen sich möglicherweise bereits

heute interessante Einsatzbereiche im sogenannten Mental State Monitoring. Im Projekt „Sixth Sense“ des Autobauers Jaguar Land Rover stellt eine derartige Überwachung des mentalen Zustands beispielsweise eine zentrale Forschungslinie dar. Hier geht es darum, Stressbelastungen oder Konzentrationsschwächen frühzeitig zu erkennen, um Unfällen gezielt entgegenwirken zu können. Auch artverwandte militärische Anwendungen von Helm-integrierten BCI wurden bereits im Rahmen akademischer Studien erforscht.

Noch ist die Vision einer schnellen, intuitiven und präzisen Gedankenkontrolle von Computern und Maschinen Zukunftsmusik, der bedeutende technologische Herausforderungen entgegenstehen. Angesichts der aktuellen Fördermaßnahmen für neurowissenschaftliche Grundlagenforschung in Europa (Human Brain Project) und den USA (BRAIN Initiative) ist allerdings auch im Bereich der BCI-Technologien in den nächsten Jahren mit signifikanten Fortschritten zu rechnen. Ein besseres Verständnis darüber, wie neuronale Signale erfasst, interpretiert und sogar beeinflusst werden können, könnte langfristig den Weg für disruptive Entwicklungen ebnen. Bidirektionale BCI-Systeme, die sowohl Informationen auslesen als auch Signale ins Gehirn einspeisen können, könnten in ferner Zukunft eine maschinen-vermittelte Hirn-zu-Hirn-Kommunikation ermöglichen und einen Grad organisch-technischer Interaktion erschließen, der die Grenzen zwischen Mensch und Maschine verschwimmen lässt. Ob es allerdings so weit kommt, wird letztlich nicht nur vom technologischen Fortschritt abhängen, sondern auch davon, wie weit BCI gesellschaftliche Akzeptanz gewinnen können.

Dr. Carsten M. Heuer, Dezember 2015

Beiträge aus 2016

Digitale holografische 3D-Displays	270
Smart Home.....	273
Personal Air Vehicles	276
Industrie 4.0.....	279
Post-Quantum-Kryptografie.....	282
Biokunststoffe.....	285
Roboter-Schwärme	288
Triboelektrische Nanogeneratoren	291
Computerbasiertes Hochdurchsatz-Screening von Werkstoffen	294
Carbon Capture and Usage	297



Digitale holografische 3D-Displays

Mit der Realisierung praktikabler digitaler holografischer 3D-Displays, die bewegte holografische Bilder in brauchbarer Größe und Auflösung, mit realistischer Farbwiedergabe, hohem Kontrast und großem Betrachtungswinkel darstellen könnten, ist in den nächsten zehn Jahren nicht zu rechnen.

Bei den bekannten und inzwischen auch technisch genutzten Hologrammen handelt es sich im Prinzip wie bei der klassischen Fotografie um fest stehende Aufnahmen, die hier jedoch bei geeigneter Beleuchtung dreidimensionale Abbilder der aufgenommenen Gegenstände wiedergeben. Daneben werden heute monitorartige Displays erforscht, bei denen computergesteuert und nahezu in Echtzeit auch wechselnde dreidimensionale Bilder erzeugt werden können. Solche digitalen holografischen 3D-Displays basieren ebenfalls auf dem physikalischen Prinzip der Beugung von Lichtwellen. Dabei lenken ihre Pixel die einfallenden Lichtwellen einer Beleuchtung so ab, als wenn sie direkt von den dargestellten Objekten reflektiert worden wären.

Allgemein lassen sich Hologramme technisch auf verschiedene Arten umsetzen. Bei der klassischen analogen Holografie sind Hologramme mikroskopische Muster in speziellen Filmen, die darin durch Belichtung mit Laserstrahlung erzeugt wurden. Entsprechende Muster lassen sich auch in Folien prägen, wie man sie von Sicherheitsmerkmalen z. B. auf Geldscheinen oder Ausweisen kennt. Bei digitalen holografischen 3D-Displays werden Systeme eingesetzt, mit denen sich computergesteuert beliebige Hologramme erzeugen lassen, um wechselnde holografische Bilder oder auch Videos darzustellen. Die zur Beugung der Lichtwellen benötigten Muster werden dabei üblicherweise mit Hilfe geeigneter Pixel umgesetzt, die beispielsweise veränderbare Lichtdurchlässigkeiten, Reflektivitäten oder Brechungsindizes besitzen.

Solche auch Holo-Displays genannten Systeme zeigen für jede mögliche Betrachtungsrichtung die entsprechende Perspektive. Demzufolge wird zur räumlichen Wahrnehmung auch kein optisches Hilfsmittel, wie z.B. eine 3D-Brille, benötigt, weil die beiden Augen des Betrachters automatisch zwei verschiedene Perspektiven geboten bekommen. Der Betrachter kann seine Augen außerdem auf beliebige Punkte des holografischen Bildes ausrichten und scharfstellen. Dies ist z.B. bei den heute zunehmend Verbreitung findenden stereoskopischen 3D-Displays nicht möglich, weil dort die Schärfeebelebene auf dem Display liegt, obwohl Objekte auch davor oder dahinter dargestellt werden. Die aus diesem Konflikt bei vielen Nutzern resultierenden Beschwerden oder Ermüdungserscheinungen würden folglich bei holografischen Displays nicht eintreten.

Die meisten Ansätze für Holo-Displays beruhen auf sogenannten Spatial Light Modulators (SLM). Dabei handelt es sich in der Regel um Chips mit rasterförmig angeordneten, elektronisch ansteuerbaren Pixeln. Am häufigsten werden sogenannte Flüssigkristall-SLM verwendet, die ursprünglich als die bildgebenden Elemente in Videoprojektoren entwickelt wurden. Zur Wiedergabe von mehrfarbigen holografischen Bildern gibt es im Wesentlichen zwei Ansätze. Lässt der verwendete SLM eine ausreichend hohe Bildwiederholfrequenz zu, dann können Hologramme für die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau nacheinander auf demselben SLM dargestellt und jeweils mit einer entsprechenden Lichtquelle beleuchtet werden. Der Betrachter nimmt das holografische Bild dann mehrfarbig wahr. Im zweiten Ansatz werden für jede Grundfarbe separate SLM verwendet. Das von den drei SLM gebeugte Licht wird dann mit Hilfe optischer Komponenten räumlich zu einem mehrfarbigen Bild überlagert.

Im Gegensatz zur analogen Holografie müssen bei Holo-Displays basierend auf SLM die holografischen Bilder mit ausreichend hoher Bildwiederholfrequenz immer wieder neu erzeugt werden, um für den Betrachter permanent sichtbar zu bleiben. Einen anderen Ansatz stellen Holo-Displays basierend auf sogenannten photorefraktiven Polymeren dar, die die benötigten Muster längere Zeit speichern können, sich aber löschen und neu beschreiben lassen. Die Muster werden mit Laserlicht Punkt für Punkt in die Polymerschicht geschrieben und bleiben bis zu mehreren Stunden mit Laser- oder LED-Licht auslesbar. Eine Farbwiedergabe ist möglich, indem für jede der drei Grundfarben unter verschiedenen Winkeln ein entsprechendes Hologramm erzeugt wird. Bei ausreichend geringer Schreibdauer wären durch eine schnelle Abfolge von Schreiben, Wiedergabe und Löschen prinzipiell auch mit photorefraktiven Polymeren Holo-Displays zur Darstellung bewegter holografischer Bilder denkbar.

Es gibt heute noch keine praktikablen digitalen holografischen 3D-Displays, die bewegte holografische Bilder in brauchbarer Größe und Auflösung, mit realistischer Farbwiedergabe, hohem Kontrast und großem Betrachtungswinkel darstellen könnten. Die wesentlichsten Herausforderungen bei der Entwicklung sind auf die Größe und die Anzahl der Pixel zurückzuführen. So gilt z.B. der Zusammenhang, dass der mögliche Betrachtungswinkel eines Holo-Displays umso größer ist, je kleiner dessen Pixel sind. Heute typisch sind SLM mit Pixelgrößen von etwa 8 µm, womit ein Holo-Display nur aus einem schmalen Bereich von etwa vier Grad betrachtet werden kann. Brauchbar wären beispielsweise 60 Grad – dafür bräuchte man aber Pixel, die mehr als 10 Mal kleiner wären als heute kommerziell verfügbar. Die größere Herausforderung ist jedoch die Pixelanzahl. Denn es gilt, dass ein holografisches Bild maximal so groß ist wie das Hologramm selbst. Wenn man also Bilder mit brauchbarer Größe erzeugen möchte, z.B. so groß wie ein Computerbildschirm, und dies mit einem brauchbaren Betrachtungswinkel, wozu man sehr kleine Pixel benötigt, dann benötigt man für ein solches Holo-Display über 100 Milliarden Pixel. Heute typisch und erhältlich sind aber nur SLM mit ein paar Millionen Pixeln. Diese Hürde ist technisch nicht ohne Weiteres zu bewältigen. Ein zusätzliches Problem wäre der hohe Rechenaufwand, den man dann betreiben müsste, um die Inhalte für so viele Pixel zu liefern bzw. solche Datenmengen zu übertragen und zu speichern. Langfristig betrachtet werden diese Probleme irgendwann technisch lösbar sein. In den nächsten zehn Jahren ist nach Einschätzung vieler Fachleute aber nicht mit brauchbaren Holo-Displays zu rechnen.

Dr. David Offenberg, Januar 2016

Smart Home

Auch im Bereich des häuslichen Wohnens ist ein zunehmender Trend zur Automatisierung von Funktionalitäten und zur internen und externen Vernetzung festzustellen. Wie weit sich die diesbezüglichen Technologien tatsächlich durchsetzen, wird wesentlich davon abhängen, als wie groß die damit verbundenen Risiken empfunden werden.

In ähnlicher Weise wie im Automobilbau ist auch im Bereich des häuslichen Wohnens ein zunehmender Trend zur Automatisierung von Funktionalitäten und zur internen und externen Vernetzung festzustellen. Entsprechende Bemühungen gibt es aus wissenschaftlicher Sicht bereits seit fast 30 Jahren. Diese werden inzwischen unter dem Begriff Smart Home subsummiert, und immer mehr diesbezügliche Technologien werden praktisch einsetzbar. Von einer durchgängigen Implementierbarkeit von allen oder auch nur vielen der damit verbundenen Möglichkeiten und von einer vollständigen Interoperabilität und Vernetzung aller möglichen Einzellösungen ist man aber noch weit entfernt.

Technologien im Bereich Smart Home adressieren die zunehmenden Herausforderungen, die unsere alternde Gesellschaft vor dem Hintergrund der Notwendigkeit nachhaltiger und sparsamer Energieversorgung an das Wohnen stellt. Dazu kommen neue Anforderungen an Komfort und Wohlbefinden sowie das Bedürfnis, aus dem beruflichen Umfeld bekannte Funktionalitäten auch zuhause nutzbar zu machen und verschiedene Lebensbereiche zu vernetzen. Die dazu notwendigen technologischen Entwicklungen basieren insbesondere auf dem exponentiellen Anstieg der Mikroprozessor-Leistungen und der damit verbundenen zunehmenden Verbreitung von computergestützter Elektronik im Alltagsleben (Ubiquitous Computing). Dazu kommen die Nutzbarmachung intelligenter miniaturisierter Sensoren und die rasante Entwicklung im Bereich der drahtlosen oder auch der (vor allem für Neubauten interessanten) leitungsgebundenen Kommunikation. Auf dieser Basis existiert bereits heute eine Reihe von Einzellösungen, z.B. zur Meldung von Bewegungen oder zur Fernsteuerung der Beleuchtung.

Allgemein bestehen Smart-Home-Systeme zunächst aus (auch als Aktuatoren bezeichneten) Endgeräten. Hier ist z. B. an Lichtschalter, Fernseher, Waschmaschinen oder vieles andere mehr zu denken. Dazu kommen Sensoren, die z. B. die Raumtemperatur oder die Helligkeit messen oder feststellen, ob Fenster bzw. Türen geschlossen sind. Erforderlich sind außerdem Eingabegeräte, mit denen die gewünschten Funktionalitäten programmiert werden können. Hier ist an spezielle Touchscreens genauso zu denken wie an Tablet-PCs oder Smartphones. Die Überlegungen zum Smart Home stellen nun vor allem die Möglichkeiten zur **Integration und Vernetzung** der technischen Einzellösungen in den Vordergrund („Home Area Network“). Im Idealfall sollen dann also alle beteiligten Geräte in einer intelligenten Steuerung miteinander verbunden sein. Zentrale Basisseinheit dafür ist ein sog. Gateway, das quasi als Kommunikationszentrale fungiert und über das die Einzelgeräte angesprochen werden können. Allerdings fehlt es hier heute noch an gemeinsamen Standards für eine systemübergreifende Interoperabilität. Das gilt für universelle und mit allen angeschlossenen Geräten kompatible Gateways genauso wie für die sog. Middleware, also die Software-Ebene zwischen Betriebssystem des Gateways und den Einzelanwendungen.

Die mit Smart-Home-Systemen insgesamt möglichen Fortschritte im Bereich des Wohnens liegen insbesondere in den Bereichen Unterhaltung und Komfort, Energieversorgung, Sicherheit sowie Gesundheitsfürsorge. Im Bereich **Unterhaltung** ist in Zukunft mit einer deutlichen Erweiterung der Multimedia-Ausstattung zu rechnen. Getrieben wird diese Entwicklung insbesondere durch das weitere Zusammenwachsen von Fernsehen, Radio bzw. Audio und Computer/Internet. Der Steigerung des **Komforts** dient die zunehmende Automatisierung von Funktionalitäten. Das Spektrum der Möglichkeiten reicht hier vom lange bekannten Thermostatventil oder der Steckdose mit Zeitschaltuhr über das ferngesteuerte Garagentor bis hin zur sensorgesteuerten Beleuchtung oder Heizung immer dort, wo sich ein Mensch befindet bzw. der Bedarf besteht. Außerdem werden immer mehr Funktionalitäten über das Internet z. B. mit dem Smartphone von beliebigen Orten aus gesteuert oder überwacht werden können. Auch der Kühlschrank, der als Bestandteil des sog. Internets der Dinge selbständig knapp werdende Lebensmittel bestellt, wird in diesem Zusammenhang diskutiert.

Verfahren zur sensorgesteuerten Automatisierung bilden auch eine wesentliche Grundlage für mit Smart-Home-Technologien erreichbare Einsparpotenziale bei der **Energieversorgung**. Hier ist z. B. an Fenster-Kontakte zu denken, die beim Öffnen automatisch die

Heizung abschalten. Die Nutzung von aus Hotels bekannten Keycards anstelle von konventionellen Türschlüsseln könnte automatisch zur Abschaltung aller nicht benötigten elektrischen Geräte genutzt werden, wenn man die Wohnung verlässt. Ein wichtiger Beitrag wird hier auch von intelligenten Zählern für Strom oder z.B. Gas erwartet (sog. Smart Meter), die bereits marktfähig sind und über ein individuelles Energiemonitoring zu entsprechenden Verhaltensänderungen der Bewohner beitragen können.

Wesentliche Fortschritte sollen die mit dem Konzept des Smart Home verbundenen Entwicklungen auch für die Sicherheit der Bewohner bringen. Hier sind alle möglichen Verfahren zur Überwachung angesprochen, verbunden möglicherweise mit geeigneter Zugangskontrolle mittels intelligenter Methoden wie Gesichtserkennung oder automatisierter Verhaltenskontrolle. Aber auch z. B. beim Brandschutz sind damit Fortschritte möglich, bis hin zur automatischen Einleitung geeigneter Löschmaßnahmen oder dem selbständigen Rufen der Feuerwehr. Gerade vor dem Hintergrund unserer alternden Gesellschaft können die Konzepte des Smart Home außerdem einen wichtigen Beitrag zur **Gesundheitsfürsorge** leisten. Hier wird insbesondere an die sensorgesteuerte Überwachung von Vitalparametern und deren automatisierte Meldung an geeignete Institutionen gedacht.

Wie weit sich die mit dem Begriff Smart Home verbundenen Technologien im häuslichen Wohnen tatsächlich durchsetzen werden, wird wesentlich davon abhängen, als wie groß die damit verbundenen Risiken empfunden werden. Wie bei allen (v. a. drahtlos) vernetzten Systemen spielt hier die **Datensicherheit** eine herausragende Rolle. Insbesondere muss so gut wie sicher ausgeschlossen werden, dass von außen Manipulationen vorgenommen werden können und z. B. Diebe die installierte Technik nutzen können, um die Anwesenheit der Bewohner aufzuklären.

Jürgen Kohlhoff, Februar 2016

Personal Air Vehicles

Individualverkehr in der Luft könnte nach der Vorstellung einiger Forschungseinrichtungen in Zukunft eines der sichersten Verkehrskonzepte werden.

Der Begriff Personal Air Vehicle (PAV) beschreibt eine neue Generation von kleinen Flugzeugen, die eine dezentralisierte und an den individuellen Bedarf angepasste Form der Luftfahrt verspricht. PAVs könnten nach der Vorstellung einiger Forschungseinrichtungen in Zukunft eines der sichersten Verkehrsmittel werden. Dafür sollen Systeme zur automatisierten Fluglageregelung und Kollisionsvermeidung genauso sorgen wie die Einbindung in ein automatisiertes Verkehrsmanagement, das unabhängig von der radargestützten Luftraumüberwachung für den herkömmlichen Luftverkehr ist. Ob und wie weit sich PAVs in unserem Alltagsleben tatsächlich verbreiten werden, ist allerdings umstritten.

Ziel der Entwicklungsbemühungen ist insbesondere die Realisierung hybrider Land-Luft-Fahrzeuge. Solche auch als fliegende Autos (oder Flugautos) bezeichneten PAVs sollen von Führerscheinbesitzern ohne zusätzlichen Pilotenschein bedient werden können und in der Lage sein, zwei bis sechs Personen von Haustür zu Haustür zu transportieren. Bei Reichweiten von etwa 1300 km könnten typische Reisegeschwindigkeiten bei 240 – 320 km/h liegen.

Viele Vorteile der Flugautos liegen auf der Hand – auf der einen Seite können Flüsse, Berge, Staus und Unfälle auf dem Boden einfach überflogen werden und auf der anderen Seite wären sie in der Lage bei schlechtem Flugwetter oder Flugverbot auf der Straße weiter zu fahren. Diese Fähigkeiten machen sie für **Anwendungen** wie Rettungseinsätze interessant. Auch im militärischen Bereich gibt es bereits konkrete Entwicklungsbemühungen. Das gilt ebenso für den privaten Autoflugverkehr, mit dem sich mittlerweile einige Unternehmen und Start-Ups beschäftigen. Vereinzelte Bemühungen um die Realisierung von Flugautos

gibt es bereits seit fast 80 Jahren. Aber erst die jüngsten Kleinserienplanungen für die unmittelbare Zukunft sind tatsächlich soweit ausgereift, dass sie den Namen Flugauto auch verdienen. Insgesamt sind dem Fraunhofer INT weltweit zurzeit 17 diesbezügliche **Entwicklungsprojekte** bekannt, wobei sowohl Starrflügler mit einklappbaren Flügeln als auch hubschrauberartige Konzepte verfolgt werden.

So hat das slowakische Unternehmen AeroMobil in 2014 den Prototypen AeroMobil 3.0 vorgestellt. Mit zusammengeklappten Flügeln fährt das AeroMobil laut Hersteller bis zu 160 km/h auf der Straße, soll mit seiner Länge von sechs Metern auf einen Standard-Parkplatz passen und normales Benzin tanken können. Seit Oktober 2014 ist das AeroMobil in der Flugerprobungsphase. In den Vereinigten Staaten nimmt das erst 2006 gegründete Unternehmen Terrafugia bereits Reservierungen für einen Flugautotyp entgegen. Der „Transition“ darf mit der in den USA gültigen LSA-Fluglizenz (Light Sport Aircraft) auf einem der 5000 öffentlichen Flughäfen in den USA gestartet und gelandet werden und entspricht mit elektrisch angeklappten Flügeln den US-Sicherheitsnormen für Kraftfahrzeuge, so dass er auch auf Straßen und Autobahnen fahren darf.

Auch deutsche Firmen beschäftigen sich mit der Entwicklung von PAVs. So hat die Firma Carplane Anfang 2015 einen Prototyp mit patentiertem Flügel-Schwenkmechanismus vorgestellt, der das Vehikel vom Flug- in den Fahrmodus verwandelt. Carplane plant sein PAV als VLA (Very Light Aircraft) zertifizieren zu lassen. Außerdem wirbt die Firma damit, dass es weltweit das erste herkömmlich zugelassene Flugzeug sein wird, das die strenge Abgasnorm für den Straßengebrauch erfüllt.

Das kürzlich beendete EU-Projekt „myCopter“ hat es sich zum Ziel gesetzt, auch die breite Öffentlichkeit in die Lage zu versetzen Flugautos zu bedienen. Dafür musste die Steuerung für die Piloten effizienter und intuitiver gestaltet werden. Zu den Highlights des Projektes zählt daher die im DLR entwickelte Lenkradsteuerung für das senkrecht startende PAV, mit der sich das Flugauto nahezu wie ein heutiger PKW steuern lässt. Weitere technische Schwerpunkte des Projektes waren z.B. Kollisionsvermeidung, Schwarmflug sowie automatische Landeplatzerkennung. Auch soziotechnologische Aspekte, welchen Einfluss die Einführung von Flugautos auf die Gesellschaft haben könnten, wurden untersucht. Auch die NASA arbeitet an PAV-Projekten und setzt dabei auf verteilte elektrische Antriebssysteme, von denen man sich eine höhere Effizienz und Sicherheit und auch Vorteile in den Bereichen Kosten, Lärmverringerung und Umweltschutz erhofft.

Trotz der vielen Fortschritte und sichtbaren Erfolge in Form von Demonstratoren und Prototypen besteht jedoch im Bereich der PAVs noch ein großer **Forschungsbedarf**, bis diese tatsächlich massentauglich sind. Allgemein bietet das Thema Energieeffizienz bei größtmöglicher Reichweite noch viel Platz für neue Ideen (z.B. im Bereich Leichtbau oder bei elektrischen, hybriden oder Solar-Antrieben). Auch wird man die Technologien für senkrecht startende und landende Fluggeräte weiter entwickeln müssen. In diesem Zusammenhang wird auch das Problem der Lärmbelästigung nicht einfach zu lösen sein. Weitere offene Fragen betreffen die Sicherheit. Hier ist z.B. an Anti-Kollisionssysteme, Vogel- und Insektenschutzkonstruktionen sowie Fallschirme oder Airbags für den Bodenaufprall zu denken. Dazu kommen intuitive Bediensysteme und eine weitgehende Automatisierung.

Aber auch nichttechnische Aspekte stehen einer baldigen verbreiteten Einführung von PAVs entgegen. So müssen zunächst Regelungen getroffen werden, entlang welcher Bahnen und nach welchen Verkehrsregeln die PAVs fliegen dürfen und wie sich Kollisionen vermeiden lassen. Allgemein wäre der Luftraum unterhalb von 500 Metern für die fliegenden Autos denkbar, der nicht der Luftverkehrskontrolle unterliegt. So beschäftigen sich Entwicklungsprogramme in den USA und Europa bereits mit den Voraussetzungen für „Flug-Autobahnen“. Nicht zuletzt ist auch der Preis von bisher ca. 200 000 bis 300 000 Euro ein bedeutendes Hindernis. Der Erfolg der PAVs wird also maßgeblich auch davon abhängen, ob es gelingt die Produktions- und Materialkosten so zu senken, dass die fliegenden Autos für die breite Bevölkerung erschwinglich werden. Weitere zu überwindende Hindernisse liegen vor allem im rechtlichen Bereich und bei der allgemeinen gesellschaftlichen Akzeptanz.

Dr. Sonja Grigoleit, April 2016

Industrie 4.0

Mit einer durchgängigen Umstrukturierung der Industrie in Richtung Industrie 4.0, wie sie von der Bundesregierung visioniert wurde, ist allenfalls langfristig zu rechnen.

Unter dem in Deutschland geprägten Begriff Industrie 4.0 (I4.0) versteht man jenen Teil des für die Zukunft erwarteten „Internet of Everything“, der sich im Kern mit einer durchgängigen Datenvernetzung von Produktion/Fertigung und Logistik befasst und langfristig zu einer Informatisierung der gesamten Wertschöpfungskette führen soll. Zentrale Leitgedanken hierbei sind z. B., dass der Kunde künftig in Echtzeit Einfluss auf die Gestaltung seines Produktes nehmen können soll, dass die Produktion von Gütern dezentral bzw. lokal beim Kunden stattfindet, dass die Logistik optimal verzahnt sein wird und dass der gesamte Lebensweg des Produktes von den Ausgangswerkstoffen bis hin zur Wiederverwertung bzw. Deponierung verfolgt und dokumentiert werden kann. Charakteristisch für I4.0 wird die Abkehr von der Massenproduktion weniger Standardgüter zugunsten der Einzelstück- oder Kleinserienproduktion exakt nach Kundenwunsch sein.

Grundideen und Vorläuferkonzepte zu I4.0 gibt es bereits seit den frühen 1980er Jahren, z. B. unter der Bezeichnung „Computer Integrated Manufacturing“, später dann „Intelligente Fabrik“, „Intelligente Produktion“ oder „Intelligente Lieferketten“. Dazu soll jetzt die verbreitete Anwendung von Internettechnologien zur Kommunikation zwischen Menschen, Maschinen und Produkten kommen. Als wichtigste technologische Treiber werden die Umstellung des Internetprotokolls von Version 4 auf 6 mit ca. $340 \cdot 10^{36}$ (statt zuvor ca. $4 \cdot 10^9$) möglichen Einzeladressen für vernetzte Objekte sowie die Fortschritte in der mobilen Kommunikation und beim sog. 3D-Druck gesehen.

Die technologische Basis der I4.0 ist das Internet der Dinge, über das informationstechnisch zunehmend alle Objekte untereinander sowie mit den Menschen verbunden

werden. Auf diese Weise wird eine virtuelle Parallelwelt erschaffen, in der Kommunikation und Datenaustausch keinen Zeitverlust mehr bedingt, mögliche Optionen und Alternativen in kürzester Zeit simuliert und bewertet und somit alle fertigungsrelevanten Prozesse in der realen Welt kontinuierlich angepasst und permanent optimiert werden können.

Eine Teilmenge des Internets der Dinge sind so genannte Cyber-Physische Systeme (CPS). Diese stellen jeweils einen Verbund aus informatischen Komponenten mit mechanischen und elektronischen Systemen dar, die miteinander kommunizieren. Dabei kontrolliert und steuert die informative Komponente einerseits die physischen Teile des Systems, andererseits steht sie mit der informatischen Überstruktur des Produktionsprozesses, z. B. dem Produktplanungs- und Produktsteuerungssystem, im permanenten Abgleich. Die hierfür benötigte Automatisierungstechnik wird durch die Einführung von Methoden wie Selbstoptimierung, Selbstkonfiguration, Selbstdiagnose und die maschinenseitige intelligente Unterstützung der Werker in ihrer immer komplexer werdenden Arbeitswelt zunehmend verbessert.

Zur Erleichterung der Umsetzung der I4.0 wurden sechs Design-Prinzipien definiert: Interoperabilität, Virtualisierung, Dezentralisation, Echtzeitfähigkeit, Serviceorientierung, und Modularität. Interoperabilität beschreibt die benötigte Fähigkeit von Menschen, CPS und intelligenter Fabrik, sich untereinander zu verbinden und über das Internet (der Dinge) miteinander zu kommunizieren. Unter Virtualisierung wird der Prozess verstanden, die intelligente Fabrik und alle ihre Prozesse in virtuellen Fabrik- und Simulationsmodellen abzubilden, um dort die Prozesse anhand von Sensordaten aus der realen Welt permanent zu optimieren. Kern des Prinzips Dezentralisation ist es im ersten Schritt, den CPS innerhalb einer intelligenten Fabrik in Bezug auf Logistik und Produktion größtmögliche Autonomie zu gewähren, um der massenweisen Fertigung von Einzelstücken („kundenindividuelle Massenproduktion“) besser gerecht werden zu können. Im zweiten Schritt sollen CPS auch geographisch weit verteilt an unterschiedlichen Standorten möglichst unabhängig voneinander produzieren können, dabei jedoch über das Internet zu einer virtuellen intelligenten Fabrik zusammengefasst sein.

Ähnliches gilt für die Echtzeitfähigkeit: Im ersten Schritt soll dadurch die Möglichkeit gegeben werden, alle relevanten Daten der Produktions- und Logistikprozesse in der intelligenten Fabrik verzögerungsfrei zu sammeln, zu analysieren und zu bewerten. Im zweiten Schritt soll hierbei später der Kunde eingebunden werden, der dann seine Wünsche zu seinem

Produkt „online“ in den Produktionsprozess einbringen kann. Die Serviceorientierung bezieht sich einerseits auf den klassischen Begriff „Kundenorientierung“, wobei hier als Kunde sowohl ein CPS, ein Werker in einer intelligenten Fabrik oder auch diese selbst gemeint sein kann. Andererseits bezieht sie sich auf die Nutzung des „Internet of Services“, welches unterschiedlichste Dienstleistungen einschließlich Informationsbeschaffung und -aufbereitung bietet. Die Modularität soll gewährleisten, dass sich die intelligente Fabrik jederzeit und kurzfristig durch Hinzufügen oder Wegnahme einzelner Module oder ganzer CPS an sich ändernde Anforderungen anpassen kann.

Damit sich das letztlich politisch getriebene Konzept I4.0 weiterentwickeln kann und umsetzen lässt, muss noch eine Reihe von Herausforderungen überwunden werden. Zu den wichtigsten zählen IT-Sicherheit, Schutz geistigen Eigentums sowie Zuverlässigkeit und Stabilität der vielen benötigten Kommunikationswege. Auch die Unversehrtheit und Vollständigkeit des Produktionsprozesses sind in einem von Echtzeit geprägten Produktionskontext allein aus logistischen Gründen bislang kaum zu garantieren. Bei allen Fortschritten in der Kommunikationstechnik müssen physische Objekte wie Halbzeuge oder Vorprodukte immer noch transportiert werden. Darüber hinaus fordert eine konsequente Umsetzung des I4.0-Paradigmas speziell qualifizierte Mitarbeiter in allen unternehmerischen Bereichen. So ist insgesamt mit einer durchgängigen Umstrukturierung der Industrie in Richtung I4.0, wie sie von der Bundesregierung visioniert wurde, allenfalls langfristig zu rechnen. Allerdings formen einzelne Aspekte wie immer stärkere Vernetzung, CPS oder das 3D-Drucken bereits heute viele Industriezweige nachhaltig um.

Stefan Reschke, Mai 2016

Post-Quantum-Kryptografie

Im Rahmen der Post-Quantum-Kryptografie (PQK) beschäftigt man sich mit kryptografischen Methoden, deren Sicherheit gegenüber Angriffen durch sowohl klassische Computer als auch Quantencomputer gewährleistet wäre.

Für die Zukunft zu erwartende Quantencomputer werden in Teilbereichen wesentlich leistungsfähiger sein als heutige Rechner und damit eine Bedrohung für einige wichtige, derzeit genutzte Verschlüsselungsverfahren darstellen. Das betrifft auch bereits heute zu verschlüsselnde Informationen, wenn diese langfristig vertraulich bleiben und daher geschützt werden müssen. Im Rahmen der Post-Quantum-Kryptografie (PQK) beschäftigt man sich daher mit kryptografischen Methoden, deren Sicherheit gegenüber Angriffen durch sowohl klassische Computer als auch Quantencomputer gewährleistet wäre und die damit auch weiterhin z.B. einen sicheren Informationsaustausch im Internet gewährleisten würden. Dabei handelt es sich um Methoden, die auf klassischer Computertechnologie zum Einsatz gelangen können. Die PQK stellt dementsprechend selbst keine Quantentechnologie dar.

Generell lässt sich mit Hilfe von kryptografischen Verfahren u.a. die Vertraulichkeit von Informationen sicherstellen, indem unter Verwendung eines bestimmten Schlüssels ein lesbarer Klartext durch ein geeignetes Verschlüsselungsverfahren in einen unlesbaren Geheimtext umgewandelt wird. Hierbei kann grundsätzlich zwischen symmetrischen und asymmetrischen Verfahren unterschieden werden. Symmetrische Verschlüsselungsverfahren verwenden sowohl für die Verschlüsselung als auch für die Entschlüsselung denselben Schlüssel. Solche Methoden besitzen den Nachteil, dass dieser Schlüssel entsprechend geheim gehalten und daher auf einem sicheren Weg zwischen den Kommunikationspartnern ausgetauscht werden muss. Ein wichtiges Beispiel für ein herkömmliches symmetrisches Verschlüsselungsverfahren ist AES (Advanced Encryption Standard).

Asymmetrische Verschlüsselungsverfahren nutzen hingegen unterschiedliche Schlüssel für die Verschlüsselung und die Entschlüsselung. Während der sog. öffentliche Schlüssel allgemein bekannt ist und der Verschlüsselung dient, ist der sog. private Schlüssel geheim und wird zur Entschlüsselung verwendet. Wichtige herkömmliche asymmetrische Verfahren sind RSA (benannt nach den Entwicklern Rivest, Shamir, Adleman) und die Elliptische-Kurven-Kryptografie. Die Sicherheit von asymmetrischen Verschlüsselungsverfahren basiert auf mathematischen Problemstellungen, deren Lösung unter bestimmten Annahmen praktisch unmöglich ist. Hierzu zählt z.B. die Annahme, dass ein Angreifer lediglich einen klassischen Computer nutzt.

Bei Quantencomputern erfolgt im Gegensatz zu klassischen Computern die Informationsverarbeitung auf der Grundlage von quantenphysikalischen Phänomenen. Sie können daher prinzipiell deutlich leistungsfähiger sein als klassische Computer und wären dadurch in der Lage, alle zurzeit üblicherweise eingesetzten asymmetrischen kryptografischen Verfahren zu brechen. Symmetrische Verfahren wären weniger bedroht, da diese durch eine Verdoppelung der Schlüssellänge auch gegenüber Quantencomputern sicher wären (wenn der geheime Schlüssel auf einem sicheren Weg ausgetauscht wird).

Für asymmetrische kryptografische Verfahren existieren allgemein drei grundlegende Einsatzmöglichkeiten. Neben der bereits erwähnten direkten Verschlüsselung zählen hierzu noch der Schlüsselaustausch und die digitale Signatur. Während es zwar prinzipiell möglich ist, asymmetrische Verschlüsselungsverfahren zur Verschlüsselung von Nachrichten einzusetzen, ist diese Vorgehensweise jedoch deutlich rechenintensiver und damit langsamer als bei den symmetrischen Varianten. In der Praxis werden asymmetrische Verschlüsselungsverfahren daher eher für den Austausch eines geheimen Schlüssels für ein symmetrisches Verfahren genutzt. Hierbei wird zunächst nicht die eigentliche Nachricht, sondern lediglich der geheime Schlüssel zwischen den Kommunikationspartnern verschlüsselt ausgetauscht. Die Nachricht wird dann mit dem symmetrischen Verfahren und diesem geheimen Schlüssel ver- und entschlüsselt. Eine digitale Signatur dient in einer ähnlichen Weise wie eine herkömmliche Unterschrift auf Papier der Überprüfung, ob eine Nachricht tatsächlich vom korrekten Absender stammt (Authentizität) und ob an der Nachricht nachträglich Veränderungen vorgenommen wurden (Integrität).

Von großer Bedeutung für die Realisierung von Verfahren der Post-Quantum-Kryptografie ist die Einsicht, dass Quantencomputer voraussichtlich nur bei speziellen Anwendungen

schneller sind als klassische Computer. Als Grundlage für derartige PQK-Verfahren müssen dementsprechend mathematische Problemstellungen verwendet bzw. gefunden werden, die nicht nur sicher gegenüber Angriffen mit Hilfe von klassischen Computern sind, sondern für die auch Quantencomputer keinen entsprechenden Vorteil gegenüber klassischen Computern aufweisen. Dabei sind in erster Linie neue asymmetrische Verfahren von Interesse, da symmetrische Verfahren, wie oben erwähnt, nur in einem erheblich geringeren Ausmaß durch Quantencomputer bedroht sind.

Einige Vorschläge für PQK-Verfahren existieren bereits heute. Diese beinhalten allerdings noch einige Herausforderungen. Eine solche Herausforderung stellt vielfach das augenblicklich noch mangelnde Vertrauen in die Sicherheit von einigen vorgeschlagenen Methoden dar. Hier ist noch mehr Erfahrung hinsichtlich der verschiedenen Verfahren erforderlich. Eine weitere Herausforderung bei manchen PQK-Vorschlägen besteht in deren im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren geringen Effizienz, u. a. hinsichtlich der für eine ausreichende Sicherheit notwendigen Schlüssellängen. So erfordert z.B. ein PQK-Ansatz, das sog. McEliece-Verfahren, für eine ausreichende Sicherheit Schlüssellängen von einigen Millionen Bits, während beispielsweise für RSA nur einige Tausend Bits notwendig sind.

Augenblicklich ist noch nicht absehbar, welche Ansätze sich im Rahmen der PQK letztendlich durchsetzen werden. Generell kann es dabei zehn Jahre oder länger dauern, bis ein neues kryptografisches Verfahren ausreichend auf seine Sicherheit überprüft wurde und weit verbreitet ist. In einem ähnlichen Zeitrahmen sind auch frühestens Quantencomputer zu erwarten, die in der Lage wären, herkömmliche Verschlüsselungsverfahren wie RSA zu brechen.

Dr. Klaus Ruhlig, Juni 2016

Biokunststoffe

Werkstoffe aus Polymeren natürlichen Ursprungs sind für den Verbraucher kaum oder gar nicht von entsprechenden erdölbasierten Materialien zu unterscheiden.

Erste Werkstoffe aus Polymeren natürlichen Ursprungs wie Celluloid oder Casein wurden bereits vor ca. 150 Jahren als Ersatz für kostbare natürliche Materialien wie beispielsweise Elfenbein, Perlmutt oder Horn hergestellt. Doch erst durch das Aufkommen der erdölbasierten Kunststoffe ab dem Ende des 19. Jhd. wurde die Unterscheidung zwischen künstlichen Polymeren und Biopolymeren als Werkstoffe relevant. Erdölbasierte Kunststoffe schufen durch ihre hervorragende Formbarkeit in allen Lebensbereichen neue Gestaltungsmöglichkeiten und traten so einen ungebrochenen Siegeszug an, der die traditionellen Biowerkstoffe überflügelte und teilweise ersetzte. Im Zuge der Abfall- und Energiediskussionen seit der zweiten Hälfte des 20. Jhd. treten inzwischen jedoch wieder vermehrt biobasierte Polymere in den Vordergrund. Sie sollen möglichst bioabbaubar oder sogar kompostierbar sein und die Umwelt möglichst nicht belasten.

Biokunststoffe, auch Biopolymere genannt, bilden jedoch keine einheitliche Produktklasse. Primär werden sie zumeist in **biobasierte** (Rohstoffquelle), **bioabbaubare/kompostierbare** (Funktionalität) und biokompatible (Verträglichkeit) Werkstoffe eingeteilt. Bioabbaubare Kunststoffe erlauben eine kurzfristige (1 – 10 Jahre), aber zum Teil auch längerfristige Zersetzung, abhängig von Biokunststoff und Umgebung. Dabei können auch besondere Organismen und künstliche Umweltfaktoren, die in speziellen Anlagen geschaffen werden können, nötig sein. Daher ist die Bioabbaubarkeit eines Kunststoffs nicht gleichzusetzen mit einer Kompostierbarkeit, bei der das Material unter Einfluss von Luftsauerstoff mit Hilfe von Bakterien und Pilzen abgebaut wird. Oft ist jedoch eine etwas **breitere Definition von Biokunststoffen** sinnvoll, die eine Kombination der ersten beiden Aspekte erlaubt, so dass Biokunststoffe in drei Arten unterteilt werden können: 1) biobasiert und bioabbaubar

(z. B. Polyhydroxyalkanoate (PHA), Polymilchsäure (PLA)); 2) Erdöl-basiert und bioabbaubar (z. B. Polycaprolacton) und 3) biobasiert aber nicht bioabbaubar (z. B.: Bio-Polyethylene).

Die „neuen“ Polymere sind für den Verbraucher kaum oder gar nicht von ähnlichen erdöl-basierten Materialien zu unterscheiden. Die **Anwendungsbereiche** von Biokunststoffen reichen von Catering-Produkten (z. B.: Besteck, Trinkbecher) über die Medizin (z. B.: Kapseln, Nahtmaterial) bis hin zu Agrarwirtschaft und Gartenbau (z. B.: Mulchfolien, Anzuchttöpfen). In den Bereich der Automobilindustrie haben die Biopolymere ebenfalls bereits Einzug gehalten und werden dort vermehrt in der Innenausstattung, aber auch zur Verkleidung genutzt.

Die erfolgreichsten Vertreter der Biokunststoffe sind **Stärkeblends** und **Stärkederivate**, deren Produkte den größten Absatzmarkt bilden. Sie zeichnen sich durch relativ geringe Kosten und eine zum Teil sehr gute biologische Abbaubarkeit aus. Typischerweise werden sie neben den genannten Bereichen auch in der Textilindustrie eingesetzt. Bei den Stärke-blends handelt es sich um eine Mischung aus Stärke-Kunststoff und anderen Kunststoffen, die die Festigkeit regulieren und Kosten reduzieren können. Die Verarbeitung solcher Rohstoffgemische kann teilweise auch analog zu Mineralöl-basierten Kunststoffen geschehen.

Biopolyester wie PLA, PHA und Celluloseester sind sowohl biobasierte als auch zumeist bioabbaubare Werkstoffe. **PLA**, gewonnen aus Maisstärke oder Molke, wird derzeit insbesondere für Kunststoffverpackungen, wie beispielsweise Joghurtbecher, verwendet. Die Einsetzbarkeit von reinem PLA ist aufgrund des niedrigen Erweichungspunkts (60°C) eingeschränkt, kann jedoch ebenfalls durch Blends verbessert werden. Der bekannteste Vertreter der Polymerfamilie der PHA ist Polyhydroxybutyrat (PHB), welches ähnliche Eigenschaften wie Polypropylen (PP) aufweist. Diese Kunststoffe werden unter anderem als Fasern, Klebstoffe und in der Medizin verwendet. Derzeit wird PHB hauptsächlich mikrobiell hergestellt, eine Produktion aus transgenen Pflanzen oder Algen ist allerdings auch denkbar. Weithin bekannt sind zudem **Celluloseester**, die als Celluloid und Cellophan seit Jahrzehnten im Handel erhältlich sind. Aufgrund ihrer antistatischen Eigenschaften eignen sie sich insbesondere auch für kleinere Elektronikanwendungen.

Neben den genannten Biokunststoffen gehört aber auch **Bio-Polyethylen** (bio-PE), das über mehrere chemische Reaktionen aus Bio-Ethanol hergestellt werden kann, zu den biobasierten Werkstoffen. Der erhaltene Kunststoff weist keinen Unterschied zu Erdöl-

basiertem PE auf und ist auch nicht bioabbaubar. Umgekehrt ist aus fossilen Quellen erzeugtes **Polycaprolacton** ein biologisch abbaubarer Kunststoff, der vor allem im medizinischen Bereich als Klebstoff, für Medikamentenkapseln und orthopädische Abdrücke verwendet wird.

Obwohl gerade auch der **Umweltschutz** immer wieder als Argument für die Nutzung von Biokunststoffen angeführt wird, ist die Diskussion in dieser Hinsicht differenzierter zu betrachten. Für die Herstellung fast aller biobasierten Kunststoffe ist der Einsatz von Pflanzen nötig, entweder als direkter Rohstofflieferant oder als „Futterpflanze“ für biotechnologisch optimierte Mikroorganismen. Die sich hieraus ergebende Flächenkonkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion kann jedoch durch eine vernünftige Anbaupolitik vermieden werden, indem beispielsweise wie in Brasilien Zuckerrohr als Nähr- und/oder als Industriepflanze genutzt werden kann, oder lediglich Pflanzenabfallstoffe genutzt werden. Des Weiteren sind die Möglichkeiten für das Recycling von bio-abbaubaren Biokunststoffen noch unzureichend und viele dieser Kunststoffe müssen, wenn sie nicht kompostierbar sind, getrennt gesammelt und recycelt werden.

Eine wichtige Schlüsseltechnologie für die weitere Entwicklung der Biowerkstoffe stellt die **Biotechnologie** dar, die sowohl in der Industrie als auch in der Abfallwirtschaft und Landwirtschaft entscheidende Beiträge liefern können wird. Für die weltweite Biokunststoffindustrie wird weiteres Wachstum erwartet, insbesondere aufgrund steigender Nachfrage in den Schwellenländern. Limitiert wird die Zunahme der Nutzung von Biowerkstoffen vor allem durch die jeweils aktuellen Produktionskapazitäten.

Dr. Diana Freudendahl, Juli 2016

Roboter-Schwärme

In Roboter-Schwärmen soll die Gesamtsystemleistung erst durch das Zusammenwirken mehrerer oder vieler, hierarchisch gleichrangiger Einzelroboter entstehen

Ein wesentliches Ziel der Roboter-Entwicklung ist die Erhöhung der Anpassungsfähigkeit an unerwartete oder sich ändernde Umgebungsbedingungen. Die Erhöhung der Intelligenz und Flexibilität einzelner Systeme ist dabei immer wieder an Grenzen gestoßen. Ein übergreifender Trend in der Robotik-Forschung ist daher die Nutzbarmachung von Roboter-Schwärmen, bei denen nach dem Vorbild natürlicher Schwärme eine Gesamtsystemleistung erst durch das Zusammenwirken mehrerer oder vieler Einzelroboter entsteht. Im Gegensatz zu anderen Formen von Multi-Roboter-Systemen gibt es in einem Schwarm dabei keine Hierarchie, also kein zentrales System, welches für die anderen Roboter die Planung von Aufgaben und Wegen übernimmt und Anweisungen erteilt. Auch wenn aufgrund der technischen Komplexität die Realisierung von Roboter-Schwärmen noch Zeit benötigt, ist das Interesse daran groß und es gibt zahlreiche Initiativen in Forschungseinrichtungen und kommerziellen Unternehmen.

In der Robotik spricht man von einem Schwarm, wenn unter mehreren Robotern oder unbemannten mobilen Plattformen eine bestimmte Form der Kooperation herrscht. Zum einen muss eine funktionale Abhängigkeit bezüglich der Planung und Ausführung einer Aufgabe bestehen. Das bedeutet, dass bei der Aufteilung der Gesamtaufgabe in verschiedene Teilaufgaben die Anzahl und Leistungsfähigkeit der Roboter bestimmt, wer welche Teilaufgabe erfüllt. Beispielsweise werden beim Transport von Gütern Roboter mit hoher Reichweite andere Aufgaben übernehmen als solche kurzer Reichweite, aber vielleicht höherer Nutzlast. Vor allem betrifft dies aber die Art, wie die Roboter sich untereinander abstimmen, also die Koordination oder Entscheidungsfindung in der Gruppe. Diese findet dezentral statt, indem jede der beteiligten Plattformen anhand von implementierten Regeln

(computerbasierten Algorithmen) individuell entscheidet, welche Aktivität sie als nächstes ausführt. Dabei kann sie mit ihrer Gruppe Informationen aktiv austauschen, also explizit kommunizieren, oder aber durch Interpretation des Umgebungszustands Rückschlüsse anstellen (was man als implizite Kommunikation oder Stigmergie bezeichnet). Bei der Aufteilung von Teilaufgaben unter den Plattformen kommen beispielsweise vielfach auktionsähnliche Verfahren zum Einsatz, bei denen die Plattformen explizit miteinander kommunizieren müssen.

Auch bei der Ausführung der geplanten Aufgaben werden meist aktiv Informationen ausgetauscht, entweder unmittelbar von Roboter zu Roboter oder mittelbar, etwa in Form ketten- oder netzähnlicher Kommunikationswege. Demgegenüber bedeutet implizite Kommunikation, dass beispielsweise ein Lade-Roboter beginnen könnte Güter aufzuladen, sobald er bemerkt, dass ein Transporter vorfährt.

Vorrangig ist in jedem Fall, dass die gewählte Strategie zur dezentralen Koordination und Kommunikation innerhalb der Gruppe einen stabilen und zielgerichteten Betrieb des Gesamtsystems gewährleistet. Darüber hinausgehend wird an Methoden geforscht, die den Einsatz von Schwärmen zusätzlich möglichst effizient gestalten, also die zur Verfügung stehende Ressource (die Plattformen) auf möglichst optimale Weise so einsetzen, dass eine Zielgröße optimiert wird. Dies kann z. B. die Zeit bis zur Erledigung der Gesamtaufgabe oder die zurückgelegte Gesamtstrecke aller beteiligten Systeme betreffen. Letztlich besteht das Ziel der Forschung an Schwärmen darin, eine menschlichen Teams nachempfundene Kooperationsfähigkeit zwischen unbemannten Plattformen zu erreichen, um eine Gesamtaufgabe schneller oder effizienter zu lösen.

Beide Aspekte (also sowohl der stabile als auch der effiziente Betrieb eines Schwarmes) setzen voraus, dass die Schnittstelle zwischen dem Schwarm und einem menschlichen Systembediener (Human Robot Interface HRI) zukünftig so ausgestaltet ist, dass der Mensch sich auf die Führung des Gesamtsystem konzentrieren kann, ohne sich noch um die konkrete Steuerung einzelner Systeme im Schwarm kümmern zu müssen. Das wiederum setzt voraus, dass die eingesetzten Plattformen über einen relativ hohen Grad an Autonomie verfügen. Die Entscheidung über das konkrete Verhalten der Plattformen im Einsatz wird daher bei Roboter-Schwärmen deutlich stärker bei den computerbasierten Systemen liegen als heutzutage. Das impliziert rechtliche und ethische Fragestellungen, wie sie sich ähnlich auch für autonome Fahrzeuge stellen.

Im Einzelnen sind für Roboter-Schwärme viele Anwendungen denkbar. So möchte man eine sog. Punkt-zu-Punkt-Logistik verwirklichen, also die direkte Warenlieferung vom Händler zum Kunden, und damit z. B. wichtige Medikamente in kürzester Zeit Zustellen. Bei Katastrophenfällen könnten Schwärme von unbemannten Flugsystemen in kürzester Zeit eine provisorische Kommunikationsinfrastruktur aufbauen oder zahllose Überwassersysteme Öllachen auf See einzämmen. Aber auch in weiträumigen Einsätzen wie der Überwachung der Qualität von offenen Gewässern oder der frühzeitigen Detektion von Brandherden bei Hitzeperioden in Waldgebieten wären sie von Nutzen.

Der substantielle Vorteil von Schwärmen ist dann, dass sie skalierbar sind, also über die Zahl der eingesetzten Systeme an die Größe einer Aufgabe angepasst werden können. Gleichzeitig ist eine hohe Redundanz gegeben, denn der Ausfall einzelner Systeme wiegt in einem Schwarm weniger schwer, wodurch die Stabilität des Gesamtsystems wiederum sehr hoch ist. Je nach Art der Aufgabe kann die Zusammensetzung eines Schwarms aus vielen gleichen oder einer Mischung aus verschiedenen Systemen bestehen, wodurch Schwärme flexibel einsetzbar sein sollen. Da die einzelnen Plattformen eines Schwarms vergleichsweise einfach aufgebaut sein können, sind sie im Vergleich zu heutigen komplexen Plattformen einfacher herzustellen, zu geringeren Kosten und mit kürzeren Produktionszeiten. Für hochrisikoreiche Einsätze können diese Kostenvorteile den Gebrauch von Schwarm-Plattformen als Verlustsysteme interessant machen. Neben zahlreichen zivilen Akteuren forscht daher auch das Militär an Roboter-Schwärmen und in wenigen Jahren könnten erste zivile wie militärische Anwendungen Realität werden.

Dr. Guido Huppertz, August 2016

Triboelektrische Nanogeneratoren

Triboelektrische Nanogeneratoren wandeln Bewegungen wie Vibrationen oder Rotationen in elektrische Energie um. Es ist davon auszugehen, dass sie zukünftig eine große Rolle in der Energieversorgung der stetig steigenden Zahl an elektronischen Geräten spielen werden.

In den letzten Jahren hat sich die Zahl kleiner elektronischer Geräte enorm erhöht. Die hier zunehmend benötigten Energiespeicher würde man gerne ersetzen, vor allem wo deren Einsatz unpraktisch, unwirtschaftlich oder gar völlig ausgeschlossen ist. Hier gibt es also einen Bedarf an neuen Energiequellen, die zuverlässig und uneingeschränkt Energie zur Verfügung stellen, möglichst keine Wartung benötigen und zudem möglichst leicht und flexibel sind. Ein großes Potenzial verspricht man sich dabei vom sog. Energy-Harvesting, also der Nutzbarmachung von in der Umgebung ohnehin vorhandener Energie. Hier gibt es bereits eine Reihe mehr oder weniger weit fortgeschrittener Lösungsansätze. Eine besondere Rolle könnten in Zukunft Triboelektrische Nanogeneratoren (TENGs) spielen, die mechanische Energie – also Bewegungen wie Vibrationen oder Rotationen – in elektrische Energie umwandeln.

TENGs wurden erstmals im Jahr 2012 beschrieben, seitdem gab es aber bereits enorme Entwicklungsfortschritte. So wurden schon Systeme mit einem Wirkungsgrad von bis zu 85 % vorgestellt. Zudem sind TENGs kostengünstig und lassen sich durch ihren einfachen Aufbau in eine Vielzahl von Systemen integrieren. Darüber hinaus ist es möglich, TENGs eine hohe mechanische Flexibilität zu verleihen, sodass sie als Energiequelle für flexible Elektronik dienen können. Von dieser erhofft man sich alltagstauglichere, robustere und leichtere elektronische Geräte, die sich biegen, einrollen oder falten lassen, und die beispielsweise bei einem Sturz nicht brechen. Beispiele für weitere mögliche Anwendungen von TENGs sind autonome Sensornetzwerke, die sich selbstständig über einen längeren

Zeitraum mit Energie versorgen, oder Touchscreens, die durch die Berührungen des Nutzers zumindest einen Teil ihres Energieverbrauchs decken können.

Der typische Aufbau eines TENG besteht aus dünnen Schichten zweier verschiedener Materialien mit möglichst geringer elektrischer Leitfähigkeit. Werden diese Schichten in Kontakt gebracht, tauschen sie Elektronen aus und laden sich dadurch gegensätzlich auf (sog. triboelektrischer Effekt). Werden die Schichten anschließend wieder voneinander getrennt, baut sich durch elektrostatische Induktion eine Spannung auf, und mittels an den Schichten angebrachter Elektroden lässt sich ein Strom abgreifen. Danach werden die Schichten erneut in Kontakt gebracht, wodurch sich die Elektronen wieder in die andere Richtung bewegen. So werden periodisch entgegengesetzt gerichtete Strompulse ausgelöst, indem die beiden Schichten immer wieder aufeinander zu und voneinander weg bewegt werden.

Aufbauend auf diesem simplen Design wurden in den letzten Jahren hauptsächlich drei weitere experimentelle Umsetzungen von TENGs entwickelt. Der erste Ansatz besteht darin, die beiden Schichten permanent in Kontakt zu lassen und sie anstelle der Auf-und-Ab-Bewegung horizontal gegeneinander zu verschieben. Durch die entstehende Reibung wird eine größere Ladungstrennung und damit eine höhere Effizienz bei der Energieumwandlung erzielt, und durch den leicht anderen Aufbau lässt sich eine größere Zahl unterschiedlicher Umgebungsenergiequellen nutzen. Eine weitere Neuentwicklung sind TENGs aus nur einer festen triboelektrischen Schicht. Die zweite Schicht kann eine beliebige andere Oberfläche in der Umgebung sein, mit der die erste Schicht periodisch in Kontakt kommt. Ein Beispiel dafür wäre ein in einen Schuh integrierter TENG, bei dem die Schuhsohle die feste Schicht bildet, die immer wieder mit dem Boden – der zweiten Schicht – in Kontakt gebracht wird und so mit jedem Schritt elektrischen Strom generiert. Dieser Aufbau bietet eine noch größere Freiheit bezüglich der Integration der TENGs in Alltagsgegenstände, und gleichzeitig sind solche Nanogeneratoren auch sehr robust. Allerdings ist die Effizienz solcher TENGs auch geringer im Vergleich zum ursprünglichen Aufbau. Eine Weiterentwicklung dieses Prinzips stellt der dritte Ansatz dar, bei dem ebenfalls nur noch eine triboelektrische Schicht vorhanden ist. Hier ist diese allerdings nicht fest verankert, sondern wird frei zwischen zwei Elektroden hin und her bewegt. Prinzipiell lässt sich durch diesen Aufbau vermutlich eine höhere Effizienz erzielen als beim zweiten Ansatz, die Forschung dazu befindet sich allerdings noch im Anfangsstadium.

Neben der Weiterentwicklung und Optimierung dieser vier Typen von TENGs sind auch noch einige generelle Herausforderungen zu bewältigen, ehe diese Generatoren verbreitet eingesetzt werden können. Eine wichtige Forschungsrichtung besteht derzeit darin, die Ladungsübertragung und damit auch die Effizienz und Stromdichte der Nanogeneratoren durch eine gezielte Optimierung der Oberflächen weiter zu verbessern. Daneben wird auch intensiv daran gearbeitet, das Einsatzspektrum der Generatoren noch weiter zu vergrößern, unter anderem durch eine Integration in textile Gewebe. Dadurch könnte es beispielsweise möglich werden, beim Betreten Strom erzeugende Teppichböden zu entwickeln oder die Bewegung von am Körper getragenen Kleidungsstücken zur Energieerzeugung zu nutzen. Für Anwendungen wie z. B. Touchscreens ist es zudem notwendig, hochtransparente TENGs zu entwickeln. Schließlich lassen sich TENGs auch mit anderen Nanogeneratoren kombinieren, z.B. mit den bereits seit längerem erforschten piezoelektrischen Nanogeneratoren, um deren Vorteile zu kombinieren.

Da es sich bei TENGs derzeit noch um ein junges Forschungsfeld handelt, ist ein praktischer Einsatz dieser Generatoren noch nicht abzusehen. Aufgrund der genannten Vorteile wie Robustheit und mechanische Flexibilität weisen sie jedoch ein großes Potenzial für eine Vielzahl an Anwendungen auf. Daher ist davon auszugehen, dass sie zukünftig eine große Rolle in der Energieversorgung der stetig steigenden Zahl an elektronischen Geräten spielen werden. Hier könnten sie zunächst die weiter vorhandenen Energiespeicher unterstützen und den Einsatz von Batterien mit geringerer Kapazität ermöglichen. Mittel- bis langfristig ist aber auch ihr Einsatz als alleinige Energiequelle in Klein- und Kleinstverbrauchern zu erwarten, wodurch sie diesen eine größere Autonomie verleihen würden.

Dr. Ramona Langner, September 2016

Computerbasiertes Hochdurchsatz-Screening von Werkstoffen

Für die Zukunft verspricht das Computerbasierte Hochdurchsatz-Screening eine signifikante Beschleunigung des Innovationsprozesses im Bereich der Werkstoffentwicklung.

Für die Lösung vieler Zukunftsaufgaben und die Entwicklung neuer Produkte und Technologien ist es enorm wichtig, neue Werkstoffe zu entwickeln oder bereits bekannte kontinuierlich weiter zu verbessern. Obwohl der Mensch sich letztlich schon seit Jahrtausenden damit befasst, Werkstoffe wie Stein, Bronze oder Eisen nach seinen Vorstellungen zu modifizieren, benötigt man auch heutzutage noch zwischen 15 und 20 Jahren Entwicklungszeit, bis ein neuer Werkstoff am Markt erfolgreich ist. Ein neuer Ansatz könnte diesen Prozess erheblich beschleunigen. Das sogenannte computerbasierte Hochdurchsatz-Screening verknüpft effiziente quantenmechanische Simulationsverfahren mit Methoden des Data Mining und sollte es in den nächsten Jahren erlauben, neue Werkstoffe am Computer zu entwerfen. Der Prozess der Werkstoffentwicklung wird damit schneller und preisgünstiger werden.

Bislang baut dieser nämlich sehr stark auf Versuch und Irrtum auf: Bereits bekannte Verbindungen, welche eine gewünschte Materialeigenschaft aufweisen, werden geringfügig verändert und anschließend aufwändig im Labor charakterisiert. Stellt sich dabei heraus, dass einer dieser neuen Werkstoffe bessere Eigenschaften besitzt, so dient dieser als Ausgangspunkt für die weitere Suche. Dieses Vorgehen ist recht umständlich, weil es sehr zeitaufwändig sein kann, neue Werkstoffe zu synthetisieren und anschließend deren Eigenschaften zu bestimmen. Dies schränkt die Suche meist auf einen relativ eng begrenzten Bereich aller möglichen Verbindungen ein. In Folge dessen können vielversprechende Kandidaten übersehen werden.

Die Grundidee des computerbasierten Hochdurchsatz-Screenings besteht darin, die beiden besonders aufwändigen Prozessschritte – die Synthese und die Charakterisierung eines Werkstoffs – in den Computer zu verlagern, sie sozusagen *in-silico* durchzuführen.

Ausgangspunkt hierfür bilden Datenbanken, welche die Kristallstrukturen von einigen 10 000 Festkörpern enthalten. Im ersten Schritt wird aus diesen ein Satz an Strukturen erzeugt, die im weiteren Verlauf der Untersuchung behandelt werden sollen. Diese Auswahl an Startstrukturen kann sich beispielsweise auf Legierungen eines bestimmten Typs beschränken. Oder sie entstehen, indem spezifische Elemente in bestimmten Verbindungen systematisch durch andere ersetzt werden. Der so erzeugte Satz an Startstrukturen enthält üblicherweise immer noch einige tausend Verbindungen.

Im nächsten Schritt müssen die physikalischen Eigenschaften der ausgewählten Werkstoffe bestimmt werden. Hierfür greift man auf die sogenannte Dichte-Funktional-Theorie (DFT) zurück. Dies ist ein Simulationsverfahren, welches es erlaubt die physikalischen und chemischen Eigenschaften beispielsweise eines Festkörpers zu berechnen. Dabei berücksichtigt man einzige und allein die atomistische Struktur der Materie und die Wechselwirkung der Atome untereinander, ohne auf experimentell bestimmte Parameter zurückzugreifen. DFT-Verfahren sind die derzeit wichtigsten Methoden im Bereich der computerbasierten Werkstoffentwicklung, da sie zwei wichtige Aspekte vereinen. Zum einen erlauben sie es, die diversen Eigenschaften eines Werkstoffs mit hinreichender Exaktheit zu berechnen. Zum anderen ist die benötigte Rechenleistung relativ gering, so dass es möglich ist, eine große Anzahl von Rechnungen in akzeptabler Zeit durchzuführen. Bei deren Durchführung existieren heute noch zwei technische Herausforderungen. Zum einen können die Genauigkeit und die Geschwindigkeit von DFT-Rechnungen nach wie vor weiter verbessert werden. Zum anderen geht es darum, diesen Prozess soweit zu automatisieren, dass notwendige Eingriffe durch den Nutzer auf ein Minimum beschränkt werden.

Die im vorhergehenden Schritt erzeugten Daten müssen nun für die weitere Verarbeitung gespeichert und aufbereitet werden. In dieser Phase geht es vor allem darum, aus den gewonnenen großen Datenmengen neues Wissen über die untersuchten Werkstoffe zu generieren. Dieser Schritt hängt sehr stark von den konkreten Fragestellungen ab und ist zentraler Gegenstand der Forschung auf dem Gebiet des Hochdurchsatz-Screenings. Hier kommen Methoden aus dem Bereich des Data Mining und des Maschinellen Lernens zum Einsatz. Im Kern geht es darum, die makroskopischen Eigenschaften eines Werkstoffs

mit dessen atomarer und elektronischer Struktur zu verknüpfen, die mittels DFT-Methoden berechnet werden kann. Man spricht daher von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen, die mittels statistischer Verfahren bestimmt werden.

Am Ende dieses Prozesses steht eine Liste mit etwa einer Handvoll interessanter Werkstoffe, die dann mittels experimenteller Methoden weiter untersucht werden, um sie schließlich für konkrete Anwendungen einsetzen zu können. Weil neue Werkstoffe von zentraler Bedeutung für eine Vielzahl industrieller Anwendungen sind, konzentriert sich die Nutzung dieses Verfahrens vor allem auf Materialeigenschaften, die von technologischer Relevanz sind, oft im Rahmen einer Kooperation zwischen universitären Forschungseinrichtungen und industriellen Auftraggebern. Einen Schwerpunkt bildet hierbei bislang die Entwicklung neuer Werkstoffe für die Energieerzeugung und Energiespeicherung.

Eine der ersten bereits erfolgreichen Anwendungen des computerbasierten Hochdurchsatz-Screenings von Werkstoffen betraf die Entwicklung neuer Materialien für Lithium-Ionen-Akkus oder spezieller Metalloxide für sogenannte photoelektrochemische Zellen. In diesem Fall wurden insgesamt 5400 verschiedene Perowskit-Kristallstrukturen mittels des Hochdurchsatz-Screenings untersucht. Dabei konnten 15 verschiedene Verbindungen identifiziert werden, die sich besonders für die Herstellung von Wasserstoff mittels dieser Zellen eignen.

Auch wenn die Entwicklung des computerbasierten Hochdurchsatz-Screenings derzeit noch am Anfang steht, so kann heute schon eine ganze Reihe von Werkstoffen untersucht werden, die von großer technologischer Relevanz sind. Für die Zukunft verspricht die Methode eine signifikante Beschleunigung des Innovationsprozesses im Bereich der Werkstoffentwicklung.

Dr. Marcus John, Oktober 2016

Carbon Capture and Usage

Die Idee einer rein solargetriebenen Tankstelle, die den Kraftstoff für das Auto aus Licht, Wasser und dem CO₂ aus der Atmosphäre herstellt, bleibt noch lange Zeit ein Traum.

Kohlenstoffdioxid bzw. CO₂ wird im Rahmen der Diskussionen zur Klimaerwärmung vor allem als Treibhausgas wahrgenommen. Strategien zur Verringerung des CO₂-Ausstoßes liegen insbesondere beim Einsatz von Technologien mit höheren Energieeffizienzen und bei der Nutzbarmachung regenerativ erzeugter Energie, aber auch Möglichkeiten zur Abscheidung und anschließenden Speicherung von CO₂ werden untersucht (Carbon Capture and Storage, CCS). Eine dazu alternative technologische Route zur aktiven Verringerung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre stellt die CO₂-Abscheidung und Verwendung dar (Carbon Capture and Usage, CCU). Hierbei wird CO₂ nicht nur als Treibhausgas gesehen, sondern zusätzlich auch als Rohstoff. Die in diesem Zusammenhang in Frage kommenden Technologien stehen insgesamt noch am Anfang ihrer Entwicklung, könnten langfristig aber durchaus eine Rolle im Stoffkreislauf des CO₂ spielen.

Kohlenstoffdioxid als solches wird bereits jetzt in verschiedenen Anwendungsbereichen genutzt, z. B. in Lebensmitteln (Mineralwasser) oder in Feuerlöschern, aber auch in industriellen Prozesstechnologien in Form von überkritischem CO₂ als Extraktionsmittel (z. B. bei der Entkoffeinierung von Kaffee). Unter entsprechenden Bedingungen und mit den richtigen Reaktionspartnern kann CO₂ (grundsätzlich ein stabiles und reaktionsträges Molekül) auch chemisch umgesetzt werden. Dies wird z. B. bei der Photosynthese von Pflanzen und Algen eindrucksvoll unter Beweis gestellt. Im Jahr 1868 gelang es bereits, im Labor aus CO₂ und Ammoniak Harnstoff herzustellen. Diese Reaktion wird auch heute noch industriell genutzt, da Harnstoff ein Bestandteil von Düng- und Futtermitteln ist und als Rohstoff in der chemischen und pharmazeutischen Industrie eingesetzt wird. Dabei ist das CO₂ chemisch so gebunden, dass es während der Materiallebenszeit nicht wieder in die Atmosphäre frei-

gesetzt wird. Nach diesem Vorbild wird seit einiger Zeit auch vermehrt an weiteren Möglichkeiten für CCU geforscht, wobei verschiedene Möglichkeiten in Betracht kommen.

Zum einen ist die direkte Nutzung des Gases als Nährstoffquelle für spezielle Mikroalgen und andere Mikroorganismen von Interesse. Die damit erzeugbare Produktpalette reicht von Biokraftstoffen über Basischemikalien (z. B. Ameisensäure) bis hin zu Kunststoffen (z. B. Polyhydroxyalkanoate). Im Allgemeinen müssen die Organismen dabei mit reinem CO₂ versorgt werden. Seltener können Industrieabgase so wie sie sind genutzt werden, da sich gasförmige Begleitstoffe wie Schwefeldioxid auf den pH-Wert des Nährmediums oder den Stoffwechsel der Organismen schädlich auswirken können. Eine weitere technische Möglichkeit zur direkten Nutzung stellt die Elektrolyse des CO₂ in einer Karbonat-Schmelze dar, wie kürzlich im Labormaßstab gezeigt werden konnte. Dabei bilden sich an einer Stahl-elektrode Carbonfasern, die vielfältige Einsatzmöglichkeiten aufweisen.

Zum anderen kommt die indirekte Nutzung von CO₂ mit Hilfe verschiedener Technologien in Frage. Dabei können Kraftstoffe wie Diesel, aber auch Basischemikalien wie Methan oder Methanol sowie Kunststoffe (z. B. Polycarbonate, Polyurethane) hergestellt werden. Reaktionen mit CO₂ können einerseits mittels hoher Temperaturen und unter Druck durchgeführt werden, wie z. B. bei der bereits lange etablierten Herstellung von Salizylsäure für Aspirin. In den letzten Jahren wurden jedoch auch immer bessere Prozesse entwickelt, die neben hohen Temperaturen auch Katalysatoren einsetzen und die Reaktionen von CO₂ beschleunigen. So werden zur Fixierung von CO₂ auch photokatalytische Prozesse analog zur pflanzlichen Photosynthese erforscht.

Für die überwiegende Zahl der Reaktionen von CO₂ werden zusätzliche und teilweise vor-gelagerte Technologien benötigt. Da CO₂ im Prinzip lediglich eine Quelle für Kohlenstoff darstellt, wird immer auch eine saubere, nachhaltige und günstige Quelle für Wasserstoff benötigt. Konventionelle Technologien zur Herstellung von Wasserstoff produzieren zumeist auch Kohlenmonoxid (CO) als Nebenprodukt. Neuere Methoden, wie die Spaltung von Wasser durch Elektrolyse, stellen dabei eine wichtige Ergänzung dar. Beispielsweise wurde kürzlich das sogenannte Bionic Leaf 2.0 vorgestellt, ein künstliches System, das dazu in der Lage ist Wassermoleküle in Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten. Bakterien können den entstehenden Wasserstoff nutzen und daraus zusammen mit CO₂ aus der Atmosphäre Alkohole herstellen.

Da es für viele Prozesse noch immer sehr wichtig ist reines CO₂ als Rohstoffquelle zu nutzen, sind auch Reinigungs- und Gasspeichertechnologien für Kohlendioxid von großer Bedeutung. Hierbei kann teilweise auf Erkenntnisse aus der CCS-Forschung zurückgegriffen werden. Der wohl entscheidendste Faktor, insbesondere für die erfolgreiche Kommerzialisierung der Technologie, ist die Nutzung günstiger Energiequellen für die mit sehr hohen Temperaturen ablaufenden Verfahren. Aktuelle Bemühungen stützen sich daher zum einen auf die Nutzung von Abwärme aus energieintensiven Betrieben, wie dies z.B. in der Stahlindustrie der Fall ist, zum anderen auf die Stromerzeugung insbesondere aus Solarenergie.

Einer breiteren Verwendung von CCU-Technologien stehen aktuell noch einige Hürden im Weg, z.B. die hohen Kosten für die Abscheidung und Reinigung des Gases oder auch der eingeschränkte Markt. Großer Handlungsbedarf besteht vor allem im Hinblick auf den Gesamtenergieverbrauch der Prozesse. Um (auch im Vergleich zu CCS) umfassend ökologisch betrachten sowie Vor- und Nachteile gut einschätzen zu können, werden zukünftig auch aussagekräftige Life-Cycle Assessments (LCA) benötigt. Trotzdem sind bereits heute zunehmende Forschungsförderungen undaktivitäten, insbesondere vor dem Hintergrund des Klimawandels, als starke treibende Kräfte anzusehen und eine solargestützte Umsetzung von CO₂ in Chemikalien, Werk- und Brennstoffe scheint langfristig möglich. Die Idee einer solargetriebenen Tankstelle, die den Kraftstoff für das Auto aus Licht, Wasser und Luft herstellt, bleibt jedoch noch lange Zeit ein Traum.

Dr. Diana Freudendahl, Dezember 2016

Beiträge aus 2017

Biomimetische Körperschutzwerkstoffe	302
Smart Machines	305
Transient Materialien	308
Atominterferometrische Trägheitssensoren	311
Memristoren	314
3D-Druck in der regenerativen Medizin	317
Kohlenstoffbasierte Nanokomposite für Strukturanwendungen	320
Hyperschall-Antriebe	323
Electronic Skin	326
Cognitive Computing	329
Metall-organische Gerüstverbindungen	332
Active Debris Removal	335

Biomimetische Körperschutzwerkstoffe

Grundlegend neue bioinspirierte Konzepte für ballistische Materialien auf molekularer Ebene sind erst langfristig zu erwarten.

Zum Schutz vor ballistischen Körpern wie Projektilen oder Granatsplittern sowie Stichwaffen werden heute bereits sehr leistungsfähige Werkstoffe eingesetzt. Dennoch sind Verbesserungen speziell im Bereich des Energieabsorptionsverhaltens, der Härte, der Flexibilität sowie eine Gewichtsreduktion von großem Interesse und stellen damit die wesentlichen Anforderungen an zukünftige Materialien für den ballistischen Körperschutz. Ein vielversprechender Ansatz zur Materialoptimierung ist hier die Übertragung biologischer Konzepte auf ballistische Materialien. Natürliche Vorbilder könnten beispielsweise Spinnenseide oder die Mikroarchitektur von Fischschuppen sein. Mit der umfassenden Einsetzbarkeit grundlegend neuer biomimetischer Körperschutzwerkstoffe ist allerdings erst langfristig zu rechnen.

Bei der Entwicklung von Körperschutzmaterialien kann grundsätzlich zwischen weichballistischen und hartballistischen Materialien unterschieden werden. Zu den weichballistischen Materialien zählen aktuell insbesondere Fasern und Gewebe aus Polymeren wie Para-Aramidien (z. B. Kevlar) oder Polyethylen mit ultrahoher molarer Masse (ultra-hochmolekulares Polyethylen = UHMW-PE, z. B. Dyneema). Zu den hartballistischen Materialien, die aufgrund hoher Härte und Festigkeit auch im Bereich des Fahrzeugschutzes eingesetzt werden, zählen derzeit Metalle, Keramiken, Glaskeramiken, Gläser sowie Kunststoffe. Im Bereich des Körperschutzes werden hier maßgeblich Keramiken verwendet, die – teilweise optional – in Form von Einschüben mit weichballistischen Westen kombiniert werden.

Extrem widerstandsfähige biologische Materialien, die als Vorbilder für ballistische Schutzmaterialien herangezogen werden können, sind bei verschiedenen Organismen zu finden,

u. a. bei Fischen und Reptilien (Schuppen), Krebsen (z. B. Gliedmaßen), Muscheln (Schalen), Schnecken (Zähne) oder Spinnen (Seide). Der Ansatz bei der Analyse dieser natürlichen Vorbilder ist oftmals, ihre grundlegende Architektur zu verstehen und diese anschließend auf bekannte Materialien, wie beispielsweise Para-Aramid, UHMW-Polyethylen oder auch Glas zu übertragen. Dabei muss mindestens zwischen zwei Betrachtungsebenen unterschieden werden, dem molekularen Aufbau eines Materials (z. B. molekularer Aufbau einer Fischschuppe) und der Anordnung solcher Materialien im Verbund (z. B. Anordnung vieler Schuppen).

Insbesondere bei sehr widerstandsfähigen biologischen Materialien wie Schuppen, Knochen oder Perlmutt handelt es sich grundsätzlich um eine Kombination von harten und weichen Materialien. So gibt es Biokomposite, die aus einem organischen Proteingerüst bestehen, welches die Grundlage für eine sich darauf aufbauende mineralisierte Matrix darstellt. Sie entstehen in einem Bottom-up-Prozess, der als Biomineralisation bezeichnet wird und derzeit noch sehr schwer im Labor zu realisieren ist. Ein Beispiel hierfür sind die Keulen von Fangschreckenkrebsen, die aus Hydroxylapatit und Chitin bestehen.

Ein anderes grundlegendes Konzept ist die Schichtung vieler verschiedener, verstärkender Lagen, bei der jede Materialschicht ihre eigenen Energieabsorptions- und Deformations-eigenschaften aufweist. Ein Beispiel dafür sind Fischschuppen, die aus verschiedenen Materialien, wie z. B. Dentin oder Kollagen, bestehen. Hier liegt die härteste Schicht außen, während die Schichten nach innen weicher und elastischer werden.

Ein weiteres natürliches Vorbild ist Spinnenseide, die eine extrem hohe Zugfestigkeit bei vergleichsweise geringem Gewicht aufweisen kann. Ihre Zugfestigkeit kann in Bezug auf ihr Gewicht fünfmal höher als die von Stahl sein. Damit erscheint sie prinzipiell für eine Verwendung im Bereich ballistischer Schutzmaterialien attraktiv, auch wenn ihre Eigenschaften noch nicht an die aktueller ballistischer Polymere heranreichen. So ist natürliche Spinnenseide in der Praxis derzeit nur ungefähr halb so zugfest wie beispielsweise Dyneefasern. Zudem ist sie im Vergleich zu den aktuellen ballistischen Fasern deutlich elastischer, wodurch sie als alleiniges Material zum Auffangen von Projektilen eher ungeeignet erscheint. Um diesem Aspekt zu begegnen, gibt es Ansätze, Spinnenseide mit Metallen bzw. Kohlenstoffnanoröhren (CNT) zu verstärken. So gelang es, natürliche Spinnenseide mit CNT oder Graphen zu versetzen, indem die Spinnen selbst mit CNT oder Graphen in Kontakt gebracht wurden. Dabei konnte die Zugfestigkeit natürlicher Seiden um das Dreifache erhöht und

die Elastizität ebenfalls um das Dreifache verringert werden. Die genauen molekularen Prozesse in diesem Zusammenhang sind jedoch noch weitgehend unklar.

Dazu kommt, dass das Ernten natürlicher Spinnenseide aufwändig und daher teuer ist. Eine langfristige Alternative stellt die Produktion künstlicher Spinnenseide dar. Diese kann biotechnologisch erfolgen, indem die relevanten Gene für die Spinnenseidenproteine in andere Organismen eingeführt und dort abgerufen werden. Diese sogenannten transgenen Organismen sind damit in der Lage, Spinnenseidenproteine zu produzieren. Zwar ist die Herstellung von Seidenfasern und sogar erster Gewebe schon prototypisch in Kleinanlagen erfolgt, jedoch wird die großtechnische industrielle Produktion von Spinnenseide frühestens in einigen Jahren möglich sein. Auch sind ihre Schutzeigenschaften noch deutlich schlechter als die aktueller ballistischer Fasern. Herausforderungen bei der Herstellung besserer Seiden liegen insbesondere bei deren strukturellem Design und ihrer chemischen Zusammensetzung.

So sind grundlegend neue bioinspirierte Konzepte für ballistische Materialien auf molekularer Ebene erst langfristig zu erwarten. Materialien wie die Spinnenseide zeigen prinzipiell interessante Eigenschaften, sind jedoch von einem Einsatz als ballistisches Material weit entfernt. Kurzfristig ist eher mit pragmatischen Ansätzen zu rechnen, bei denen natürliche Biokomposite, wie z. B. Muschelschalenfragmente, direkt zugegeben werden, um weichballistische Materialien zu verstärken. Baldiger Erfolg verspricht auch die geeignete Kombination bekannter weicher und harter Materialien nach dem Vorbild natürlicher mikroskopischer Anordnungen.

Dr. Anna Schulte-Loosen, Januar 2017

Smart Machines

Was ist von Maschinen zu erwarten, die von Menschen nicht antizipierte Lösungen erarbeiten und dabei auch noch über das Internet miteinander kommunizieren?

Unter dem Sammelbegriff Smart Machines versteht man heute ganz allgemein computergestützte technische Systeme, die über eine (Selbst-)Lernfähigkeit verfügen und Arbeitsergebnisse erzeugen können, die nicht (z.B. von einem Programmierer) antizipiert bzw. vorgedacht worden sind. Nachdem bereits erste relativ einfache Varianten derartiger Technologien am Markt verfügbar sind, werden sie zukünftig zunehmend in der Lage sein „das zu tun, was sonst Menschen tun, bzw. das zu tun, wovon man nie dachte, dass Maschinen es tun können“. Schon mittelfristig werden sie enorme Auswirkungen auf unser Privat-, aber vor allem auch auf unser Berufsleben bekommen. Verantwortlich dafür sind aktuelle Fortschritte auf dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz (KI), die ihr „Tal der Enttäuschungen“ inzwischen überwunden hat.

Der Begriff Smart Machines deckt einen sehr großen Bereich zugrunde liegender **Einzel-technologien** und potenzieller Anwendungsgebiete ab. Außerdem gibt es verschiedene technologische Ausprägungen, von den Autonomen Intelligenten Agenten (selbstständig handelnde Softwareprogramme, z.B. im Börsenhandel) über die sog. Eingebetteten Intelligenten Systeme (z.B. die Apple Watch) bis hin zum ganzen Bereich der Robotik. Wesentliche zugrunde liegende Technologieentwicklungen sind verbunden mit den Stichworten Cognitive Computing, Deep Learning oder Natural Language Processing. Innovative Sprachverarbeitungssysteme werden zu einer zunehmenden Verbreitung beitragen, indem sie die ausschließliche Bedienung über natürliche Sprache ermöglichen („Voice First“). Von grundlegender Bedeutung für die Nutzbarmachung von Smart Machines in den meisten angedachten Anwendungen ist ihre Vernetzung über das „Internet der Dinge“. Mit zunehmenden zu bearbeitenden Datenmengen wird es zudem nötig sein, neue Computer-

architekturen auf der Basis z. B. von gehirnähnlichen Verarbeitungsprinzipien oder sogar Quantenphänomenen nutzbar zu machen. Auch Entwicklungen aus dem Bereich der Nanotechnologie werden hier ihre Beiträge leisten.

Einer der ersten Meilensteine auf dem Gebiet der Smart Machines war sicher die Software Siri (Speech Interpretation and Recognition Interface) der Firma Apple, die dem Smartphone die Anmutung eines **Intelligenten Persönlichen Assistenten** verliehen hat. In diesem Anwendungsbereich gibt es heute bereits eine ganze Reihe verschiedener Systeme, von Google Now über die Microsoft-Software Cortana bis hin zu Amazons Echo mit der Stimme von „Alexa“. Diese verfügen über eine intuitive Sprachsteuerung und sind zunehmend in der Lage, z. B. durch Rückfragen die Atmosphäre und die inhaltliche Tiefe einer echten Unterhaltung zu schaffen.

Intelligente Persönliche Assistenten werden bisweilen auch als „Testbed“ für zukünftig mögliche **Personal Robots** bezeichnet. Diese könnten als Weiterentwicklung der Industrieroboter und heute bereits verfügbarer Serviceroboter (z. B. zum Rasenmähen) das Ergebnis einer Entwicklung werden, wie sie in der Computertechnik bereits von Mainframe-Systemen hin zu den heute allgegenwärtigen PCs (Personal Computer) geführt hat. In der industriellen Produktionstechnik gibt es schon erste kollaborative Roboter, die in direktem Kontakt mit dem Menschen arbeiten können (z. B. der Baxter von Rethink Robotics). Im privaten Umfeld kann das zu Maschinen führen, die dem Menschen selbständig physische Tätigkeiten abnehmen, dabei mit ihm interagieren und möglicherweise auch in der Lage sind, Emotionen zu zeigen. Zusätzlich können sie alle Eigenschaften der „konventionellen“ Intelligenten Persönlichen Assistenten haben, also z. B. auf Zuruf Informationen aus dem Internet zusammenstellen. Auch hier gibt es bereits einfache Vorläufersysteme bzw. erste Produkte (z. B. die französisch/japanische Entwicklung Pepper). Eine weitere im Bereich der Robotik anzusiedelnde Variante von Smart Machines sind **autonome Kraftfahrzeuge**, deren Entwicklung weltweit intensiv vorangetrieben wird. Hier hat die stetige Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen inzwischen bereits zu sehr anspruchsvollen Teillösungen geführt.

Mit einer durchgängigen technischen Realisierbarkeit des autonomen Fahrens ist bis 2030 zu rechnen. Damit verbunden sein wird die Notwendigkeit zur Vernetzung der Fahrzeuge untereinander oder mit zentralen Informationseinheiten, damit sie voneinander lernen können (z. B. wo aktuelle Verkehrshindernisse auftreten).

Im beruflichen Umfeld hat die Einführung automatisierter Prozesse bisher üblicherweise im Bereich einfacher (oder gefährlicher) Tätigkeiten stattgefunden. Mit der Nutzung von über das Internet vernetzten intelligenten Produktionsmaschinen (Industrie 4.0) stehen wir auch hier vor einem Paradigmenwechsel. Außerdem wird zunehmend auch **Wissensarbeit** von Maschinen übernommen werden können. Eine Vorreiterrolle spielt dabei die Software Watson von IBM. Die Nutzbarmachung von Maschinen, die komplizierte Zusammenhänge herstellen und Entscheidungen treffen können, wird enorme Auswirkungen auch auf anspruchsvolle Berufsfelder haben, von der Auswertung großer Mengen von Gerichtsurteilen in der Juristerei bis hin zur medizinischen Diagnostik. Bereits heute werden jährlich milliardenfach journalistische Meldungen von Computern geschrieben. Ein zentraler Aspekt ist dabei, ob und wo Smart Machines den Menschen ersetzen oder „nur“ zu seiner Unterstützung beim Handling großer Datenmengen („Big Data“) eingesetzt werden („to make smart people smarter“). Dass insgesamt Arbeitsplätze verloren gehen werden, scheint jedoch unausweichlich.

Überhaupt wäre zum Gebiet der Smart Machines eine breitere gesellschaftliche **Ethik- und Technikfolgendiskussion** angeraten. Was ist von Maschinen zu erwarten, die von Menschen nicht antizipierte Lösungen erarbeiten und dabei auch noch über das Internet miteinander kommunizieren? Hier werden auch Fragen der Produkthaftung eine Rolle spielen. Die zu erwartende Datenflut wird darüber hinaus zu ganz neuen Problemen im Bereich des Datenschutzes führen. Derartige nichttechnische und nichtökonomische Aspekte sollten über den tatsächlichen Erfolg von Smart Machines am Markt (mit)entscheiden.

Jürgen Kohlhoff, Februar 2017

Transient Materialien

In fünf bis zehn Jahren könnten erste Produkte, die sich nach einer begrenzten Lebensdauer in kontrollierter bzw. präzise determinierter Weise rückstandsarm in ihrer Umgebung auflösen, die Marktreife erlangen.

Im englischen Sprachgebrauch werden mit dem Begriff Transient Materials funktionell vollwertige Werkstoffe und Komponenten mit konstruktiv begrenzter Lebensdauer bezeichnet. Sie können sich unter spezifischen Bedingungen in kontrollierter bzw. präzise determinierter Weise rückstandsarm in ihrer Umgebung auflösen. Im Fokus dieses noch jungen Forschungsgebiets stehen heute vorwiegend transiente elektronische Klein- und Kleinstprodukte. Aber auch darüber hinaus zeichnen sich interessante Anwendungspotenziale von ziviler wie auch militärischer Relevanz ab.

Transient Materialien bestehen in der Regel aus Verbindungen, die sich verhältnismäßig leicht durch physikalische, chemische oder biologische Einflüsse zersetzen lassen und dabei zu physiologisch bzw. ökologisch unbedenklichen Abbauprodukten zerfallen. Sie unterscheiden sich von herkömmlichen abbaubaren Materialien primär durch den Ablauf der Selbstauflösung. Charakteristisch ist hier insbesondere die kontrollierte Einleitung des dann möglicherweise sehr schnell bzw. sogar abrupt verlaufenden Zersetzungsprozesses.

Typischerweise werden hierfür spezielle Auslöser, sogenannte **Trigger**, genutzt. Einfache und direkte Trigger-Ereignisse stellen beispielsweise die Benetzung mit Wasser oder Säure oder die Erhöhung der Umgebungstemperatur dar.

Besondere Bedeutung kommt vor allem der **Zersetzung** in wässrigen Lösungen zu. In diesem Kontext werden bestimmte Polymerwerkstoffe und Naturstoffe wie Gelatine, Zellulose, Seide oder Chitin, aber auch korrosionsanfällige Metalllegierungen auf der Basis von Magnesium, Zink oder Eisen untersucht. Die Abbaurate einzelner Komponenten kann durch

gezielte Materialmodifikationen (Oberflächenbeschaffenheit, Porosität, Additive etc.) beeinflusst und gesteuert werden.

Auch für persistentere Werkstoffe, wie z.B. Silizium- oder Wolframverbindungen, lassen sich durch innovative Ansätze verhältnismäßig schnelle Zersetzerkeiten gewährleisten. So kommen im Bereich transienter Elektronik beispielsweise Silizium-Nanomembranen zum Einsatz, die bis zu 20 000-mal dünner sind als herkömmliche Silizium-Wafer – eine Dicke, bei der die Reaktionsrate mit Wasser innerhalb weniger Tage zu einer kompletten Auflösung führt. Im Bereich der transienten Elektronik werden damit unter Einsatz verschiedener Verfahren der Dünnschichttechnik elektrische Bauelemente und Leiterbahnen geformt. Auf diese Weise konnten bereits einfache auflösbare Schaltungen mit passiven und aktiven Bauelementen realisiert werden. Auch transiente integrierte Systeme (z.B. Dehnungsmesser, Temperatursensoren) oder eine wasserlösliche wiederaufladbare Batterie wurden bereits demonstriert. Eine Alternative stellt die Verwendung von speziell behandeltem (getempertem) Glas als Chipsubstrat dar. Das solchermaßen vorgespannte Glas zerfällt auf die Aktivierung eines Triggers hin explosionsartig zu feinem Glasstaub.

Der Entwicklung von transienten Materialien und Komponenten liegen unterschiedliche Interessen zugrunde. Angesichts knapper werdender Rohstoffe und globaler Umweltprobleme spielen **Aspekte der ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit** im zivilen Bereich eine wichtige Rolle. So sollen Geräte mit programmiertter Lebensdauer das gezielte Recycling wertvoller Rohstoffe erleichtern und den Eintrag von persistenten Abfällen in die Umwelt verringern. Die **Medizintechnik** stellt einen anderen wichtigen Anwendungsbereich für transiente Materialien dar. Durch die vorprogrammierte oder gezielt ausgelöste Auflösung von bioresorbierbaren Medizinprodukten – z. B. Nahtmaterial, Gefäßstützen, Sensorimplantaten oder Wirkstoffdepots – können dem Patienten die möglichen Risiken einer chirurgischen Entfernung (Explantation) erspart werden. Im Bereich der zivilen **Sicherheitstechnik** können durch die Selbstzerstörung eines Datenträgers, beispielsweise in Reaktion auf eine fehlgeschlagene Autorisierungsprüfung, sensible Daten vor unbefugtem Zugriff geschützt werden. Auch eine missbräuchliche Nutzung von Ausweisdokumenten könnte unter Umständen durch eine kontrolliert eingeleitete Zerstörung verhindert werden. **Wehrtechnische Einsatzmöglichkeiten** für transiente Materialien zeichnen sich vor allem in der Nachrichtengewinnung und Aufklärung, in der Informationssicherheit und in der Wehrmedizin ab. So könnten sich Sensoren und Sensorplattformen (UAV etc.), die sich nach einer vorgegebenen Zeit oder auf ein spezifisches Signal hin ohne rückverfolgbare

Spuren selbst zerstören, für verdeckte Operationen als wertvoll erweisen. Im Kontext einer flächendeckenden Ausbringung von Sensorknoten (in Sensornetzen) zeichnen sich außerdem ökologische und ökonomische Vorteile ab, da der kontrolliert eingeleitete Abbau transienter Systeme in der Umwelt aufwendige Bergungen überflüssig macht. Jenseits des Schutzes von digitalen Informationen könnte der Einsatz transienter Materialien auch neue Perspektiven im Bereich der Sicherung von Waffensystemen eröffnen. Durch eine ferngesteuert aktivierte oder infolge von Fremdeinwirkung ausgelöste Selbstzerstörung zentraler Kontrollelemente könnte hier eine unautorisierte Nutzung unterbunden werden.

So könnten Transiente Technologien in **Zukunft** neuartige und außerordentliche Entwicklungen in vielfältigen Anwendungsbereichen ermöglichen. Eine zentrale Herausforderung ist, die Abbaurate bzw. Lebensdauer transienter Systeme unter Berücksichtigung der relevanten Einflussgrößen optimal auf die anwendungsspezifischen Anforderungen zuzuschneiden. Hierzu sind genaue Kenntnisse über die jeweiligen Reaktionsgeschwindigkeiten der einzelnen Werkstoffe unter verschiedenen Bedingungen erforderlich. Fortgeschrittene transiente Systeme, also funktionelle Verbünde verschiedener auflösbarer Komponenten, befinden sich derzeit in einem experimentellen Stadium. Mit einer fortschreitenden Verbesserung existenter Systeme, der Implementierung von präziseren Triggern, der Erforschung von innovativen Abbaumechanismen und der Entwicklung von serientauglichen Fabrikationsprozessen könnten erste transiente Produkte in fünf bis zehn Jahren die Marktreife erlangen.

Dr. Carsten M. Heuer, Wolfgang Nätzker, März 2017

Atominterferometrische Trägheitssensoren

Bis einsatzreife atominterferometrische, auf quantenphysikalischen Phänomenen basierende Trägheitssensoren produziert werden können, bedarf es noch Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in beträchtlichem Umfang.

Trägheitssensoren (Inertialsensoren) dienen der Messung von Beschleunigungen und Drehungen zur Bestimmung der Bewegung mobiler Plattformen. Als Komponenten von Navigationssystemen ermöglichen sie – zu einem gewissen Grad – eine Unabhängigkeit von Satellitennavigationssystemen, deren Signale nicht überall empfangbar sind bzw. auch absichtlich gestört werden können. Äußerst genaue und langzeitstabile Trägheitsnavigationssysteme sind im Prinzip auf der Grundlage der Atominterferometrie realisierbar. Allerdings ist noch beträchtliche Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten, bis sich derartige auf quantenphysikalischen Phänomenen basierende Systeme in der Praxis einsetzen lassen.

Aus heutiger Sicht werden langfristig atominterferometrische Trägheitsnavigationssysteme für möglich gehalten, die im Vergleich zu den besten heute verfügbaren Trägheitsnavigationssystemen etwa 100-fach geringere Positionsdriften (mit der Zeit anwachsende Ungenauigkeiten der Positionsbestimmung) aufweisen. Zusätzlich haben sie das Potenzial, in Zukunft bei gleicher oder sogar höherer Genauigkeit deutlich kostengünstiger herstellbar zu sein als heutige Trägheitssensoren für höchste militärische Ansprüche – Schätzungen bewegen sich im Bereich von 10- bis 100-fach niedrigeren Kosten.

Atominterferometrische Trägheitssensoren beruhen zum Teil auf dem gleichen Effekt wie optische Interferometer, die heute üblicherweise in Form von optischen Gyroskopen, wie z. B. Laser- oder Faserkreiseln, als Drehratensensoren eingesetzt werden. Das Grundprinzip eines optischen Interferometers kann wie folgt beschrieben werden: Ein Lichtstrahl wird in zwei Teilstrahlen aufgespalten, die man mit einer entsprechenden Optik unter-

schiedliche Wege zurücklegen lässt, bevor sie wieder zur Überlagerung (Interferenz) gebracht werden. Drehungen des Interferometers verändern dabei die Längen der tatsächlich zurückgelegten Wege und lassen sich aus dem daraus resultierenden Interferenzsignal ableiten – dies ist auch bekannt als Sagnac-Effekt.

Unter bestimmten Bedingungen können sich bewegende Materieteilchen, wie Atome oder Elektronen, wie Wellen verhalten und als Materiewellen beschrieben werden. Auf diese Weise kann der Sagnac-Effekt auch mit Atomstrahlen zur Messung von Drehraten genutzt werden. Entsprechende Atominterferometer können deutlich empfindlicher als optische Interferometer sein, da Materiewellen, vereinfacht betrachtet, eine deutlich geringere Wellenlänge als Lichtwellen besitzen. Die höhere Empfindlichkeit ist auch verknüpft mit der Tatsache, dass Atome eine Masse besitzen, während Lichtteilchen (Photonen) masselos sind. Dieser Unterschied ist außerdem dafür verantwortlich, dass mit Atominterferometern nicht nur Drehraten, sondern auch Beschleunigungs- und Gravitationskräfte gemessen werden können, weil diese Kräfte die Bewegung der Atome direkt beeinflussen.

Heute sind atominterferometrische Trägheitssensoren bereits als Laborsysteme realisiert. Die hier üblichste technische Umsetzung stellen die sogenannten Raman-Interferometer dar. Als Atomquelle dient dabei in der Regel eine Art Ofen, in dem ein geeignetes reines Metall verdampft wird. Atome aus diesem Dampf werden dann in der Regel in einer sogenannten magneto-optischen Falle mit Hilfe von Magnetfeldern und Laserstrahlen zwischengespeichert und auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt ($-273,15^{\circ}\text{C}$) abgekühlt. Daraus wird dann ein Atomstrahl ausgeleitet, der mit präzise definierten Laserpulsen in Teilstrahlen aufgespalten, innerhalb des Interferometers gelenkt und wieder zusammengeführt wird. Raman-Interferometer mit zwei gegenläufigen Atomstrahlen können zur Messung von Beschleunigungen entlang aller drei Raumrichtungen und Drehungen um alle drei Raumachsen verwendet werden.

Entsprechende Trägheitsnavigationssysteme könnten aufgrund ihrer geringen Positionsdrift auch über längere Zeiträume und ohne Positions korrektur durch ein Satellitennavigationssystem zuverlässig funktionieren. Anwendungsbeispiele sind die Navigation von Fußgängern oder Fahrzeugen im Inneren von Gebäuden (Indoor-Navigation), die Navigation in engen Straßenschluchten oder von Unterwasserfahrzeugen. Im militärischen Bereich würden atominterferometrische Trägheitsnavigationssysteme einen regelrechten Game Changer für die Navigation von U-Booten während langdauernder Tauchfahrten darstellen.

len. Ausreichend kompakte atominterferometrische Trägheitsnavigationssysteme könnten in Zukunft aber auch zur Navigation von bemannten Flugzeugen sowie von Drohnen, Langstreckenraketen oder Marschflugkörpern eingesetzt werden, um bei technischem Ausfall oder mutwilliger Störung des GPS-Empfangs eine zuverlässige Positionsbestimmung zu gewährleisten.

Die wesentlichste Herausforderung bei der Entwicklung atominterferometrischer Trägheits-sensoren besteht darin, das Volumen und das Gewicht der Systeme deutlich zu verringern – ausgehend von den heutigen Laborsystemen, die inklusive aller Komponenten (wie Laserquellen, Atomquellen, Elektronik, optischen Aufbauten und Vakuumkomponenten) in der Regel mehrere Kubikmeter umfassen. Die dabei zu entwickelnden kompakten Systeme müssen darüber hinaus robust genug sein, um auf mobilen Plattformen unter unterschiedlichsten realistischen Einsatzbedingungen zu funktionieren – im Gegensatz zu heute typischen Atominterferometern, die unter kontrollierten Laborbedingungen betrieben werden müssen. Bis einsatzreife atominterferometrische Trägheitssensoren produziert werden können, bedarf es daher noch Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in beträchtlichem Umfang. Man geht jedoch davon aus, dass sich die technischen Hürden für die Einsatztauglichkeit atominterferometrischer Trägheitssensoren lösen ließen, wenn die dazu notwendigen finanziellen Mittel zur Verfügung stünden. Nach Meinung von Fachleuten könnten erste Systeme in fünf bis zehn Jahren zum Einsatz kommen.

Dr. David Offenberg, April 2017

Memristoren

Memristoren stehen als viertes fundamentales Bauelement neben Widerständen, Spulen und Kondensatoren. Vielversprechende Einsatzmöglichkeiten gibt es z. B. in neuartigen Datenspeichern für Computer, gehirnähnlichen (neuromorphen) Computerarchitekturen und bestimmten Hardwarelösungen im Bereich der Cyber Defence.

Ein Memristor (Kunstwort aus den Begriffen Memory und Resistor) ist ein (nano-)elektronisches Bauelement, dessen elektrischer Widerstand veränderbar und damit einstellbar ist. Sein Widerstand zu einem bestimmten Zeitpunkt hängt davon ab, welche Spannungsverlauf bis zu diesem Zeitpunkt an ihn angelegt war bzw. welche Menge an elektrischer Ladung ihn bisher durchflossen hat. Wird die Spannungsversorgung bzw. der Stromfluss unterbrochen, so bleibt der gerade eingestellte Widerstandswert ohne weitere Energiezufuhr erhalten. Vielversprechende Einsatzmöglichkeiten für Memristoren gibt es z. B. in neuartigen Datenspeichern für Computer, gehirnähnlichen (neuromorphen) Computerarchitekturen und bestimmten Hardwarelösungen im Bereich der Cyber Defence. Obwohl bereits erste kommerzielle Produkte auf der Grundlage von Memristoren existieren, befinden sie sich im Wesentlichen noch im Stadium der Forschung und Entwicklung.

Memristoren stehen als viertes fundamentales Bauelement neben Widerständen, Spulen und Kondensatoren. Sie bestehen typischerweise aus einer elektrisch isolierenden Schicht, die sich zwischen zwei Metallelektroden befindet, und können sehr geringe Abmessungen unterhalb von zehn Nanometern aufweisen. Für die Isolator-Schicht können z. B. Metalloxide, Nitride oder Telluride Verwendung finden. Als Metallelektroden kommen u. a. Edelmetalle wie Platin oder Silber, aber auch Kupfer zum Einsatz. Solche Memristoren nutzen mindestens zwei unterschiedliche Widerstandszustände, nämlich einen mit einem hohen und einen mit einem geringen Widerstandswert. Diese beiden Zustände lassen sich z. B. für die Darstellung der Bit-Werte 0 und 1 bei Computern verwenden. Durch Anlegen einer entsprechenden Spannung an die Metallelektroden kann zwischen den unterschiedlichen Widerstandszuständen umgeschaltet werden. Der augenblickliche Widerstandswert

des Memristors kann dabei mit einer geringen Spannung ausgelesen werden, die den Widerstandswert selbst nicht verändert.

Die Funktionsweise von Memristoren basiert vermutlich auf der spannungsabhängigen Ausbildung bzw. Auflösung von elektrisch leitenden Strukturen, sogenannten Filamenten, zwischen den beiden Metallelektroden. Eine Überbrückung der Isolator-Schicht durch diese Filamente führt hierbei zu einem geringen Widerstandswert, wohingegen die anschließende (teilweise) Auflösung dieser Struktur einen entsprechend höheren Widerstandswert nach sich zieht. Solche Filamente können z.B. durch Metall-Ionen entstehen, die aufgrund der angelegten Spannung aus einer geeigneten Metallelektrode herausgelöst werden.

Eine potenzielle Anwendung von Memristoren stellen Datenspeicher für Computer dar. Aufgrund der Eigenschaft von Memristoren, ihren augenblicklichen Widerstandswert, d.h. den jeweiligen Speicherinhalt, auch nach dem Abschalten der Energieversorgung beizubehalten, spricht man dabei von einem nichtflüchtigen Datenspeicher. Memristoren könnten einen im Vergleich zu derzeit üblichen Technologien u.a. erheblich schnelleren nichtflüchtigen Datenspeicher ermöglichen.

Aufgrund ihrer neuartigen elektronischen Eigenschaften eröffnen Memristoren außerdem generell neue Möglichkeiten beim Entwurf von integrierten Schaltkreisen. Durch ihren Einsatz könnte hier beispielsweise die Integrationsdichte erheblich erhöht und der Energieverbrauch gesenkt werden.

Bei herkömmlichen Computerarchitekturen ist die Datenverarbeitung und -speicherung in Gestalt von Prozessoren und Arbeitsspeicher räumlich voneinander getrennt. Diese Trennung kann zu einem Flaschenhals des Systems führen, wenn große Datenmengen zwischen Prozessoren und Arbeitsspeicher übertragen werden müssen. Memristoren erlauben dagegen neuartige Computerarchitekturen, bei denen Speicherzellen auch zur Datenverarbeitung genutzt werden könnten.

Eine weitere mögliche Anwendung von Memristoren ist neuromorphe Computerhardware. Eine solche orientiert sich hinsichtlich ihrer Funktionsweise an der neurobiologischen Architektur des Nervensystems. Eine wichtige Rolle spielen hier die Synapsen, weil sie z.B. die Grundlage für Lernprozesse im Gehirn bilden. Da das Verhalten eines Memristors der

Funktionsweise von biologischen Synapsen ähnelt, sind Memristoren gut für deren technische Nachbildung geeignet. Solche Systeme wären für Anwendungen im Bereich der künstlichen Intelligenz von großem Interesse.

Darüber hinaus stellen hardwarebasierte IT-Sicherheitslösungen ein potenzielles Einsatzgebiet dar, wie z. B. die sog. Physically Unclonable Functions. Dies sind hardwarebasierte Funktionen mit einer einzigartigen Ein-/Ausgabe-Beziehung, die auf Fertigungsschwankungen bei der Herstellung des zugrundeliegenden integrierten Schaltkreises basiert. Sie können z. B. zur Authentifizierung von Geräten oder zur Schlüsselerzeugung für kryptografische Verfahren verwendet werden. Die Nutzung von Memristoren könnte hier möglicherweise mehr Sicherheit gegenüber entsprechenden Angriffen bieten als herkömmliche Schaltkreise dieser Art.

Erste kommerzielle Produkte auf der Grundlage von Memristoren existieren bereits. Hierbei handelt es sich in erster Linie um nichtflüchtige Datenspeicher mit allerdings noch relativ geringen Speicherkapazitäten. Einer weiteren Verbreitung stehen noch einige Herausforderungen entgegen. Insbesondere sind die mikroskopischen Prozesse, die der Funktionsweise von Memristoren zugrunde liegen, bisher noch unzureichend verstanden. Ein besseres Verständnis dieser Prozesse würde eine entsprechende Verbesserung bei der Vorhersage der Eigenschaften von Bauelementen und damit auch beim Entwurf der darauf basierenden Schaltkreise erlauben. Eine weitere große Herausforderung stellt die Variabilität bzw. Reproduzierbarkeit der Eigenschaften von Memistor-Bauelementen dar. So kann es bisher nicht nur deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen, eigentlich gleichartigen Bauelementen in Bezug auf die Ausbildung (bzw. Auflösung) der Filamente geben, sondern auch zwischen aufeinanderfolgenden Schaltvorgängen bei ein und demselben Bauelement. Hieraus resultiert noch eine entsprechende Variabilität und damit nicht gewünschte Unvorhersehbarkeit der resultierenden Widerstandswerte.

Dr. Klaus Ruhlig, Mai 2017

3D-Druck in der regenerativen Medizin

Trotz erster großer Erfolge in den Bereichen Knochen- und Hautregeneration stehen viele für die regenerative Medizin nutzbare 3D-Druckverfahren aus biologischen Ausgangsstoffen erst am Anfang ihrer Entwicklung.

3D-Drucker stellen auf Basis digitaler Druckvorlagen dreidimensionale Werkstücke her, indem sie geeignete Ausgangsmaterialien schichtweise zusammenfügen. Sie finden heute zunehmende Verwendung zur kommerziellen Fertigung von kundenspezifisch maßangefertigten Bauteilen mit komplexen Geometrien, welche über herkömmliche Produktionsverfahren grundsätzlich nicht oder zumindest nicht in einem Stück gefertigt werden können. Einige 3D-Druckverfahren sind darüber hinaus prinzipiell dazu geeignet, aus biologischen Materialien Gewebe (z.B. Bindegewebe oder Knochen) und sogar Organe herzustellen. Trotz einzelner Erfolgsmeldungen befinden sich die diesbezüglichen Forschungs- und Entwicklungsbemühungen insgesamt jedoch noch in einem relativ frühen Stadium.

Grundvoraussetzung für die Herstellung biologischer Funktionsträger mit 3D-Druckern ist deren Arbeitsfähigkeit bei Raumtemperatur und normalen Umgebungsbedingungen. Besondere Vorteile verspricht man sich von ihnen für die personalisierte Medizin. Zum einen könnten sich hiermit patientenspezifisch Implantate als geometrisch exakte Kopien des zu ersetzenen Originals drucken lassen. Zum anderen können patienteneigene Zellen beim Drucken eingesetzt werden, so dass das Risiko einer Abstoßungsreaktion durch den Körper erheblich gemindert und der Heilungsprozess beschleunigt wird. Dabei kommen überwiegend biologisch resorbierbare und bioaktive synthetische Werkstoffe, echte biologische Materialien sowie gelegentlich auch bioinerte Werkstoffe zum Einsatz, die, passend strukturiert, Anlagerung und Wachstum körpereigener Zellen fördern.

Über die letzten 20 Jahre haben sich einige 3D-Druckverfahren so weit entwickelt, dass bereits heute Knochensegmente (z.B. zur Rekonstruktion von Gesichtspartien oder der

Schädeldecke bei Missbildungen oder nach schweren Unfällen) individuell passend gefertigt werden können und nach der Implantation biologisch einwachsen. Dadurch eröffnen sich der Medizin ganz neue therapeutische Möglichkeiten, die Patienten nicht nur ein menschenwürdigeres Leben ermöglichen können, sondern in Zukunft zunehmend auch das Überleben – z. B. durch das Drucken funktionsfähiger Organe in Originalgeometrie unter Verwendung von patienteneigenem Zellmaterial.

Zu den derzeit im Hinblick auf den Einsatz in der regenerativen Medizin interessanten 3D-Druckverfahren gehören die Stereolithographie (SL), das selektive Lasersintern (SLS), das laserunterstützte Bioprinting (Laser-assisted Bioprinting, LAB), das Bioplotting und das so genannte Direct Ink Writing.

Die SL ist das älteste 3D-Druckverfahren und datiert zurück in die 1970er Jahre. Mittels SL lassen sich Photopolymere über das Einstrahlen von Laserlicht in eine Polymerlösung ortsgenau vernetzen und aushärten. Hauptanwendungsgebiet in der regenerativen Medizin ist das Herstellen von porösen oder gitterartigen Stützstrukturen, sogenannten Scaffolds, für das Anzüchten von biologischem Gewebe im Reagenzglas sowie nach Implantation auch direkt im Körper des Patienten. Ein weiterentwickeltes junges SL-Verfahren ist die Projektions-SL, mit der z. B. bislang kaum verarbeitbare Hydrogele erfolgreich zu Stützstrukturen gedruckt wurden.

Für den Bereich Knochenersatz wird häufig Poly-Propylenfumarat (PPF) zum stereolithographischen Drucken der Stützstruktur verwendet. Um die Bioaktivität zu erhöhen und das regenerative Knochenwachstum nach Implantation anzuregen und zu steuern, können der PPF-Lösung Polymerkügelchen beigemischt werden, die biologische Boten- und Wirkstoffe wie z. B. Wachstumsfaktoren enthalten. Ebenso können keramische Nanopulver, speziell das knochenähnliche Mineral Hydroxylapatit (HA), beigemengt werden. Im Druckprozess werden sie in die Stützstruktur eingelagert und später im Körper bedarfsgerecht freigesetzt, wenn sie im Zuge der Umwandlung des SL-Bauteils in Knochensubstanz mit körpereigenen Produkten in Kontakt kommen.

Das SLS arbeitet mit einem Pulverbett und eignet sich besonders zur Verarbeitung metallischer und keramischer Werkstoffe in harte und steife Stützstrukturen, jedoch auch für bestimmte Polymere. Aus Polymer-Keramik-Biokompositen werden poröse Knochenimplantate für Schädel- und auch Gelenkrekonstruktionen hergestellt, in denen sich körpereigene

Zellen gut einnisten und ausbreiten können. Seit einigen Jahren lassen sich mit bestimmten Polymerpulvern auch Scaffolds für die Regeneration weichen Gewebes aufbauen.

LAB ist ein Spezialverfahren, das während des Druckens den synchronen Einbau von menschlichen Spenderzellen in Hydrogel-Stützstrukturen ermöglicht. Diese Scaffolds haben allerdings eine sehr geringe mechanische Festigkeit. In Laborversuchen konnte auf diese Weise z. B. bereits Lebergewebe gezüchtet werden.

Die Besonderheit des Bioplottings ist, dass hier Schicht für Schicht an der Oberfläche eines wässrigen Mediums aufgetragen wird. Zur Stabilisierung der entstehenden Struktur wird ausschließlich die Auftriebskraft des Mediums genutzt. So lassen sich mit mechanisch sehr empfindlichen Substanzen wie Hydrogelen aus natürlichen Polymeren speziell die komplexen, häufig fragilen Innenstrukturen von weichem und hartem Gewebe nachbauen.

Beim Direct Ink Writing wird, in Analogie zum Prinzip des Tintenstrahldruckers, flüssiges Bindermaterial auf ein Pulverbett gesprührt und so Festigkeit erzeugt. Auf diese Weise lassen sich fast alle medizinisch relevanten Werkstoffe zu Scaffolds aufbauen. Die Besonderheit dieses Verfahrens ist, dass es eine höchst genaue und reproduzierbare Einstellung von Porosität und Porositätsgradienten im Bauteil ermöglicht, also reale Strukturen aus harten, weichen und funktionellen Geweben (Organen) gut abbilden kann.

Trotz erster großer Erfolge in den Bereichen Knochen- und Hautregeneration stehen viele für die regenerative Medizin nutzbare 3D-Druckverfahren erst am Anfang ihrer Entwicklung. Besonders vielversprechenden Potenzialen stehen nur mit großem Aufwand zu lösende Probleme gegenüber. Eine wesentliche Hürde auf dem Weg zu funktionsfähigen Organen ist z. B. die Versorgung der Stützstrukturen mit Nervenbahnen und Blutgefäßen nach der Implantation.

Stefan Reschke, Juni 2017

Kohlenstoffbasierte Nanokomposite für Strukturanwendungen

Im Prinzip sind mit kohlenstoffbasierten Nanokompositen herausragende mechanische Eigenschaften realisierbar. Allerdings gibt es derzeit Bedenken bezüglich gesundheitlicher Risiken und der Langzeitstabilität.

Nanokomposite sind Verbundwerkstoffe, bei denen dem Grundmaterial, der sogenannten Matrix, nanoskalige Füllstoffe als verstärkender Bestandteil hinzugefügt werden. Als Matrixmaterialien können Metalle, Polymere und Keramiken genutzt werden. Bei kohlenstoffbasierten Nanokompositen finden als Füllstoff vorwiegend Graphen und Kohlenstoffnanoröhren (CNT), aber auch Nanodiamanten Verwendung. Im Prinzip sind mit kohlenstoffbasierten Nanokompositen herausragende mechanische Eigenschaften realisierbar, was sie insbesondere für eine Nutzung in den Bereichen des Leichtbaus und der Schutzanwendungen prädestiniert. Für ihre verbreitete Anwendung sind jedoch noch eine Reihe grundlegender Herausforderungen zu bewältigen. Bei den schon kommerziell verfügbaren CNT- bzw. Graphen-basierten Strukturwerkstoffen handelt es sich überwiegend um Polymer-Komposite aus dem Bereich des Sporthequipments.

Wegen ihrer hohen Festigkeit, Bruchzähigkeit und chemischen Beständigkeit sowie des möglichen geringen spezifischen Gewichts werden kohlenstoffbasierte Nanokomposite überall dort Anwendung finden, wo schwerpunktmäßig maximal leichte oder maximal harte, widerstandsfähige Materialien benötigt werden. Dies betrifft somit die Bereiche, die traditionell eng mit dem Leichtbau verknüpft sind, wie Raumfahrt, Transport, Energietechnologie und Sportartikel. Insbesondere im zivilen Automobil- und Flugzeugbau besteht ein hoher Anreiz, durch den Einsatz noch leichterer Strukturen Treibstoffkosten einsparen und Kohlendioxidemissionen senken zu können. Im Bereich der Elektromobilität wird eine zusätzliche Gewichtsverringerung der tragenden Strukturen des Fahrzeugs als entscheidend dafür angesehen, die Reichweiten erhöhen zu können. Auch die Entwicklung immer größerer Windkraftanlagen stellt einen wichtigen Treiber im Bereich des Leicht-

baus dar. Solche Impulse für den Leichtbau könnten auch für militärische Plattformen genutzt werden und hier sowohl zur Erhöhung von Traglast, Reichweite und Einsatzdauer genutzt werden als auch zu einer besseren Luftverlastbarkeit führen. Durch ihr geringes spezifisches Gewicht sind kohlenstoffbasierte Nanokomposite speziell von großer Relevanz als Strukturwerkstoffe für (z.B. unbemannte) Flugsysteme. Als Hochtemperaturwerkstoffe für Flugzeugturbinen könnten verbesserte Keramik-Matrix-Komposite zudem zu weiteren Treibstoffeinsparungen führen. Kohlenstoffbasierte Nanokomposite könnten weiterhin dazu beitragen, die Nutzungsdauer verschiedener Systeme oder Werkzeuge zu verlängern. So weisen Nanokohlenstoff-basierte Metall-Matrix-Komposite nicht nur selbst eine hohe Verschleißbeständigkeit auf, als Schutzbeschichtungen würden sie auch die Korrosions-beständigkeit anderer metallischer Strukturwerkstoffe erhöhen.

Die Zumischung von Nanokohlenstoffen kann darüber hinaus gezielt genutzt werden, um einem Strukturwerkstoff zusätzlich zu verbesserten mechanischen Eigenschaften weitere Funktionen zu verleihen. Hierzu gibt es eine Vielzahl von Forschungsbemühungen, Strukturwerkstoffe z. B. mit einem verbesserten Flammenschutz, aktorischen Fähigkeiten sowie mit Möglichkeiten zur Energiespeicherung, zur Abschirmung elektromagnetischer Strahlung oder zur Absorption von Radarwellen auszustatten. Integrierte Sensorfunktionen könnten beispielsweise Entwicklungsimpulse bei Structural-Health-Monitoring-Systemen für die Zustandsüberwachung von Strukturauteilen auslösen.

Kohlenstoffbasierte Nanokomposite weisen zudem ein großes Potenzial als neuartige Schutzwerkstoffe auf. Ein leichterer und flexiblerer Körperschutz würde sowohl die Beweglichkeit als auch die Leistungsfähigkeit des Soldaten erhöhen. Beispielsweise ließen sich damit leichtere Einschüsse für Schutzwesten fertigen und die Schutzwirkung von Helmen weiter verbessern. Als Teil passiver Schutzsysteme wie der Panzerung von Gefechtsfahrzeugen könnten sie mit ihrer geringen Dichte dazu beitragen, deren Gewicht zu senken, ohne den ballistischen Schutz der Systeme zu verringern. So könnten leichtere, mobilere Gefechtsfahrzeuge, für die schwere Panzerungssysteme nur begrenzt in Frage kommen, von leichten, aber schadenstoleranten Panzerungsmaterialien profitieren.

Weltweit ist eine enorme Dynamik sowohl im Bereich der anwendungsnahen Forschung an kohlenstoffbasierten Nanokompositen als auch der Implementierung geeigneter, massenproduktionstauglicher Herstellungsmethoden von CNT und Graphen zu beobachten. Die gesamte Bandbreite an denkbaren Nanokohlenstoff-Matrix-Kombinationen deckt alle

Forschungs- und Entwicklungsstadien ab. Der größte Teil befindet sich noch im Bereich der Grundlagenforschung. Insbesondere sind die Mechanismen, die zu den teils extremen Eigenschaftsverbesserungen führen, noch nicht im Detail bekannt. Ein weiteres Problem stellen die ungenügende Reinheit und Homogenität der lieferbaren Nanokohlenstoffe dar. Deren homogene Verteilung in der Matrix ist entscheidend für die zu erreichenden mechanischen Eigenschaften, bereitet jedoch immer wieder massive Schwierigkeiten.

Die Fragestellungen bezüglich eines tiefgreifenden Verständnisses der grundlegenden Mechanismen werden sich erst mittel- bis langfristig beantworten lassen. Im Umkehrschluss muss bei heutigem Erkenntnisstand die Produktentwicklung von spezifischen Anwendungsfällen ausgehen. Die bereits in Kleinserie oder als Spezialanfertigung hergestellten hochpreisigen Produkte wurden daher ausgehend von einem gut definierten Anforderungsprofil durch geschicktes Trial-and-Error zur Marktreife entwickelt. Für die Probleme mit den inhomogenen Ausgangsprodukten und der Steuerung der Prozesstechnik könnten kurz- bis mittelfristig Lösungen gefunden werden, wenn ein konkreter Handlungsbedarf formuliert und dieser mit entsprechendem Nachdruck und Investitionsmitteln verfolgt würde. Darüber hinaus gibt es derzeit Bedenken bezüglich der gesundheitlichen Risiken kohlenstoffbasierter Nanopartikel und es fehlt an ausreichenden Informationen über die Langzeitstabilität der Komposite. Hier könnten die größten Hindernisse für eine zügige Verbreitung dieser hochinnovativen Materialklasse liegen.

Dr. Heike Brandt, Juli 2017

Hyperschall-Antriebe

Wiederverwendbare Hyperschall-Flugzeuge oder Raumtransporter mit luftatmenden Antrieben wird es erst nach 2030 und vermutlich nicht vor 2040 geben können.

Von Hyperschall-Strömungen spricht man, wenn sich Fluggeräte mit fünffacher Schallgeschwindigkeit (Machzahl (Ma) 5) oder schneller durch die Erdatmosphäre bewegen. Antriebe, mit denen solche Fluggeschwindigkeiten erzielt werden können, werden als Hyperschall-Antriebe bezeichnet. Die dafür benötigte Vortriebsleistung können nur Strahltriebwerke erzeugen. Stand der Technik sind sie bereits auf der Basis von Raketen, die allerdings den Oxidator an Bord mitführen müssen. Luftatmende Hyperschall-Antriebe, die den Sauerstoff aus der Umgebungsluft verbrennen, befinden sich trotz jahrzehntelanger Bemühungen immer noch weitgehend im Stadium der Grundlagenforschung.

Das ungebrochen große Interesse an derartigen Systemen erklärt sich damit, dass sie im Vergleich mit Raketen zwar eine geringere Schubkraft hätten, aber wesentlich höhere Reichweiten erlauben würden. Das würde z. B. die Wirksamkeit verschiedener Waffensysteme, vor allem von Marsch- und Lenkflugkörpern, signifikant erhöhen. Die Erschließung des Hyperschall-Flugbereichs durch luftatmende Antriebe würde außerdem einen wichtigen Fortschritt für die Raumfahrt bedeuten, da diese z. B. als erste Stufe wiederverwendbarer Raumtransportsysteme den Zugang zum Weltraum vereinfachen und verbilligen würden. Aber auch der zivile Luftverkehr könnte von einer erfolgreichen Entwicklung geeigneter Hyperschall-Antriebe profitieren.

Konventionelle Turbojetantriebe mit rotierenden Kompressoren, welche den Oxidator Luft mechanisch verdichten, erreichen maximal etwa Ma 3. Größere Geschwindigkeiten sind mit Staustrahltriebwerken mit Unterschallverbrennung (Ramjets) möglich, die z. B. in Flugabwehrsystemen bereits vereinzelt realisiert sind, sich aber unter realen Bedingungen jenseits von

Ma 5 nicht eignen. Noch höhere Geschwindigkeiten wären mit Staustrahltriebwerken mit Überschallverbrennung (Supersonic Combustion Ramjet = Scramjet) erreichbar.

Staustrahltriebwerke besitzen keine mechanischen Komponenten zur Verdichtung der anströmenden Luft. Allein durch das sehr hohe Tempo staut und verdichtet sich die Luft in der Brennkammer. Deshalb funktionieren sie nicht vom Start weg, sondern erst ab einer gewissen Mindestgeschwindigkeit. Bei Ramjets entsteht schließlich ein vertikaler Verdichtungsstoß am Triebwerkseinlauf, hinter dem die Luft mit Unterschallgeschwindigkeit strömt. Bei Scramjets wird die Strömung bis zum Eintritt in die Brennkammer durch mehrere schräge Verdichtungsstöße auf etwa 30 – 50 % der Flugmachzahl abgebremst und damit verdichtet. Bei realen Brennkammerlängen ergeben sich damit Verweilzeiten im Bereich von 1 – 2 Millisekunden, in denen der Verbrennungsvorgang abgewickelt sein muss. Außerdem entstehen beim Aufstau der Luft im Triebwerk enorme Temperaturen und Drücke.

Unter diesen Bedingungen kommen als Treibstoffe Kohlenwasserstoffe oder Wasserstoff in Frage. Kohlenwasserstoffe (z.B. Kerosin) liefern eine wesentlich geringere Antriebsleistung als Wasserstoff, da letzterer eine mehr als dreimal höhere massebezogene Energiedichte aufweist. Im Vergleich zu Kohlenwasserstoffen beträgt die Dichte von flüssigem Wasserstoff aber nur etwa 10 %, so dass er in etwa das Vierfache an Tankvolumen benötigt. Wegen dieses und anderer Aspekte ist man bestrebt die Nutzung von Wasserstoff zu vermeiden. Jenseits von Ma 8 wird sein Einsatz jedoch unumgänglich.

Insgesamt ergeben sich aus dem bisher Gesagten zwei Notwendigkeiten: Erstens müssen für die Überwindung des Geschwindigkeitsbereichs von Null bis zum Zünden des Hyperschalltriebwerks andere Triebwerke eingesetzt werden, und zwar entweder Raketen-Booster oder verschiedene Kombinationen von Turbojet und Ramjet. Zweitens muss die Gestaltung des ganzen Fluggeräts auf die Integration des Triebwerks ausgerichtet werden, um die erforderlichen (schrägen) Verdichtungsstöße bis zum Einlauf und im Triebwerk bei Hyperschallgeschwindigkeit zu erreichen.

Einen alternativen Entwicklungsweg stellen sogenannte Detonations-Triebwerke dar. In konventionellen Brennkammern wird der Kraftstoff in einem kontinuierlichen Prozess mit Unterschall-Abbrandgeschwindigkeit verbrannt - als Deflagration. Wesentlich höhere Abbrandgeschwindigkeiten sind mit detonativer Verbrennung erreichbar. Hier geschieht

die Ausbreitung der Flammenfront in Form einer Stoßwelle mit Überschallgeschwindigkeit. Jede Detonation erzeugt also eine Überschall-Schockwelle, die nach dem Rückstoßprinzip für Schub sorgt. Die Entwicklungsbemühungen richten sich hierbei auf die Erzeugung eines kontinuierlich ablaufenden Prozesses. Die Möglichkeit eines Starts mit einem solchen Triebwerk von Geschwindigkeit Null bis zum Hyperschall wird erwartet, allerdings wird eine Limitierung auf den Flugbereich bis zu etwa Ma 6-7 gesehen. Ob Detonations-Antriebe langfristig im hohen Hyperschall-Bereich einsetzbar sein werden, ist noch unklar.

Bis heute existiert kein einsatzbereiter Antrieb für den luftatmenden Flug im Hyperschall-Bereich. Einzelne Testflüge von Scramjets für Sekunden bis Minuten erfordern derzeit noch hohen Aufwand und jahrelange Vorbereitung. Die Testflüge dienen dabei primär dem Sammeln grundlegender Erkenntnisse. Der iterative Prozess des naturwissenschaftlich-technischen Erkenntnisgewinns verläuft hier langsamer als in vielen anderen Forschungsgebieten. Quasi als Zwischenlösung existieren daher zivile wie militärische Konzepte, Fluggeräte mit Hilfe von Raketen auf Hyperschall zu beschleunigen und nach Abtrennung von der ausgebrannten Rakete im Gleitflug mit hoher Hyperschall-Geschwindigkeit antriebslos zum Zielort zu führen (Boost-Glide).

Insgesamt ist aber davon auszugehen, dass es langfristig luftatmende Gesamtkonzepte geben wird, die den Flugbereich von Ma 0 – 12 abdecken können. Die bisherige Entwicklungsdynamik und die noch zu lösenden Herausforderungen – neben der Realisierung eines gesamten Fluggeräts – legen allerdings nahe, dass die Entwicklung technisch ausgereifter Scramjet-Triebwerke noch mehr als ein Jahrzehnt benötigen wird. Wiederverwendbare Hyperschall-Flugzeuge oder Raumtransporter wird es somit erst nach 2030 und vermutlich nicht vor 2040 geben können.

Wolfgang Nätzker, August 2017

Electronic Skin

Elektronische Systeme, welche bestimmte Merkmale menschlicher Haut möglichst realistisch imitieren, könnten zukünftig für eine große Breite an Anwendungen von Bedeutung sein.

Unter dem Begriff Electronic Skin (E-Skin) versteht man ein elektronisches System, welches bestimmte Merkmale menschlicher Haut (z.B. Verformbarkeit und sensorische Eigenschaften) möglichst realistisch imitiert. Eingebettet ist die Entwicklung von E-Skin in den übergreifenden Bereich flexibler und dehnbarer Elektronik, in dem es in den letzten Jahren große Fortschritte gegeben hat. Auf Basis dieser Forschungen wurden bereits erste E-Skin-Systeme realisiert. Diese sind in ihrer Funktionalität allerdings noch recht einfach gehalten und typischerweise für die Messung bestimmter physiologischer Parameter vorgesehen.

Für eine realistische Nachbildung wird angestrebt, sämtliche Eigenschaften biologischer Haut auf dünne elektronische Systeme zu übertragen. Dazu zählt neben der Wahrnehmung von kleinsten Berührungen oder dem Erkennen von Oberflächentexturen auch die Fähigkeit zur Selbstheilung. Darüber hinaus ist es aber auch ausdrückliches Ziel, solchen Systemen Eigenschaften zu verleihen, die über die menschliche Haut hinausgehen. Hier ist insbesondere die Integration von Bio- und Chemosensoren zu nennen. Auch Technologien zur Energiegewinnung und Energiespeicherung sowie Kommunikationsmodule spielen eine große Rolle. Daneben ist noch eine Vielzahl an weiteren Funktionalitäten denkbar, z.B. eine selbstreinigende Oberfläche oder der Tarnung dienende Farbwechsel-eigenschaften. Darüber hinaus müssen E-Skin-Systeme für den praktischen Einsatz noch eine Reihe weiterer Anforderungen erfüllen, insbesondere eine hohe Verformbarkeit, eine lange Haltbarkeit, einen geringen Energieverbrauch, ein geringes Gewicht sowie eine gute Bioverträglichkeit.

Grundsätzlich bestehen E-Skin-Systeme aus einem Trägermaterial sowie je nach geplanter Anwendung aus verschiedenen funktionellen Bauelementen. Als Trägermaterial bzw. Substrat

verwendet man fast ausschließlich spezielle Polymerfolien, da diese eine hohe Dehnbarkeit und Flexibilität aufweisen, gut hautverträglich und kostengünstig sowie zumeist auch transparent sind. Für die Integration funktioneller Bauelemente stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen kann herkömmliche, starre Elektronik, Sensorik etc. auf ein elastisches Substrat aufgebracht werden, sodass nur die Verbindungen zwischen den Bauelementen dem Gesamtsystem Beweglichkeit verleihen. Solche Systeme lassen sich relativ einfach fertigen. Die maximale Dehnbarkeit, die mit ihnen erzielt werden kann, bleibt jedoch grundsätzlich recht gering. Die zweite Möglichkeit besteht darin, jedes einzelne Bauelement mit einer intrinsischen Beweglichkeit zu versehen, also z. B. dehbare Sensoren zu verwenden. Systeme basierend auf solchen Bauelementen sind unter anderem aufwändiger in Entwicklung und Fertigung, dafür lässt sich mit ihnen aber eine sehr große Verformbarkeit erzielen.

Erst durch diese Verformbarkeit ist Electronic Skin – im Gegensatz zu anderen Wearables, d. h. am Körper getragenen elektronischen Geräten wie Datenbrillen oder Smart Watches – in der Lage, sich exakt der Körperoberfläche anzupassen. Sie kann damit in Form von kaum noch spürbaren Pflastern an beliebigen Körperstellen getragen werden. Diese werden auch als Electronic Tattoos oder Epidermal Electronics bezeichnet. Ihr großes Potenzial liegt insbesondere in der Verwendung als Sensorplattformen zur Überwachung des Gesundheitszustands ihres Trägers. Ein Beispiel ist die Überwachung sogenannter Stressmarker während eines Einsatzes, die Auskunft über die weitere Leistungsfähigkeit geben könnte.

Gleichzeitig könnten solche E-Skin-Pflaster auch als Wirkstoffdepots eingesetzt werden, wobei sie ihren Wirkstoff nicht nur zeitgesteuert, sondern in Abhängigkeit von den aktuellen Messwerten abgeben könnten. Denkbar wären beispielsweise intelligente Wundaflagen, die nur an jenen Stellen, an denen auch tatsächlich eine verminderte Heilung festgestellt wird, heilungsfördernde Substanzen abgeben.

Electronic Skin könnte weiterhin in verschiedenster Form dazu genutzt werden, die Interaktion zwischen Mensch und Maschine zu verbessern und zu vereinfachen. Verschiedene Eingabemodule auf Basis eines E-Skin-Pflasters sind denkbar, zum Beispiel am Kehlkopf platzierte Silent-Speech-Interfaces oder dünne Handschuhe, die Fingerbewegungen an eine Roboterhand übertragen oder zur Gesteuerung genutzt werden können. Umgekehrt ist es auf diese Weise auch möglich, dem Träger über z. B. am Arm angebrachte E-Skin-Pflaster Mitteilungen zu übermitteln. Das könnte über Displays visuell, aber z. B. auch durch

Druckeinwirkung oder Vibrationen geschehen. Es ist auch vorstellbar, solche E-Skin-Pflaster zur biometrischen Identifizierung zu nutzen.

Der Einsatz von Electronic Skin als sensorische Oberfläche für Roboter könnte diesen zukünftig eine taktile bzw. haptische Wahrnehmung ermöglichen, die der des Menschen entspricht oder diese in einigen Aspekten sogar übertrifft. Dadurch könnten Roboter zukünftig eine große Bandbreite an komplexen Aufgaben übernehmen. So könnten sie ohne spezielle Programmierung beliebig geformte Objekte greifen und manipulieren oder sich bei schlechten Sichtbedingungen oder in unwegsamem Gelände tastend vorwärtsbewegen. Insgesamt wären solche Roboter besser für unvorhergesehene Situationen und insbesondere auch für die Zusammenarbeit mit dem Menschen geeignet (Manned-Unmanned Teaming).

Insgesamt ist Electronic Skin eine vielversprechende Technologie, die zukünftig für eine große Breite an Anwendungen von Bedeutung sein könnte. Eine Übertragung bereits entwickelter Demonstratoren in kommerzielle Anwendungen scheitert derzeit vor allem noch an einem Mangel an kostengünstigen Fertigungsverfahren. E-Skin-Pflaster für biomedizinische Anwendungen könnten bereits kurzfristig Marktreife erreichen. Auch erste Mensch-Maschine-Schnittstellen basierend auf Electronic Skin sollten sich vergleichsweise einfach realisieren lassen und mittelfristig zur Verfügung stehen. Mit einer elektronischen Haut, die Robotern und Prothesen eine dem Menschen vergleichbare haptische und taktile Gesamtwahrnehmung verleiht, ist dagegen erst langfristig zu rechnen.

Dr. Ramona Langner, September 2017

Cognitive Computing

Systeme, die den Prozess der menschlichen Kognition oder Informationsverarbeitung in einem Computer abbilden, werden zunehmend dazu beitragen, mit der steigenden Komplexität in vielen Bereichen von Gesellschaft, Wirtschaft, Technologie und Wissenschaft umgehen und diese nutzen zu können.

Anfang des Jahres 2011 erregte ein Computerprogramm mit Namen Watson mediales Aufsehen, als es die beiden besten Spieler in der Quizshow Jeopardy! besiegte. Die Technologie, die in diesem Programm zum Einsatz kommt, wird als Cognitive Computing bezeichnet. Dieser Begriff tauchte etwa Anfang der 1990er-Jahre zum ersten Mal in der wissenschaftlichen Literatur auf, hat seitdem aber einen Bedeutungswandel erlebt und ist nach wie vor nicht eindeutig definiert. Im Kern geht es jedoch immer darum, den Prozess der menschlichen Kognition oder Informationsverarbeitung in einem Computer abzubilden. Die darauf basierenden Technologieentwicklungen werden mittelfristig auch unseren beruflichen Alltag verändern.

Oft wird die Technologie des Cognitive Computing zum Themenfeld der kognitiven Informatik gezählt. Dabei handelt es sich um ein interdisziplinäres Forschungsgebiet aus Kognitions-, Computer- und Informationswissenschaften, welches erforscht, wie die internen Informationsverarbeitungsprozesse des Gehirns organisiert sind, um auf dieser Basis einen theoretischen Rahmen für diese zu erarbeiten. Das übergeordnete Ziel dieser Anstrengungen ist es letztlich, das menschliche Gehirn sowohl in Hard- als auch dazugehöriger Software nachzubilden. Im Unterschied dazu zielt Cognitive Computing jedoch eher darauf ab, die Kooperation zwischen Menschen und Computern zu verbessern und eine Art **Assistenzsysteme** für spezifische Anwendungsfelder zu entwickeln. Insofern können solche Systeme auch den Smart Machines zugerechnet werden. Ziel des Cognitive Computing ist letztlich, Wissen zu erschließen, indem es den Prozess der menschlichen Informationsverarbeitung nachzubilden versucht. Getrieben wird diese Entwicklung vor allem durch die immense Zunahme an verfügbaren Daten, von denen schätzungsweise etwa 80 % un-

strukturiert in Form von Texten, Bildern oder auch Audiodateien vorliegen. Von diesen riesigen Datenmengen kann nur ein Bruchteil von Menschen zur Kenntnis genommen werden – der Rest bleibt zusammen mit dem in ihm enthaltenen Wissen unbearbeitet.

Kognitive Systeme verfügen ähnlich wie der menschliche Verstand über folgende **Kern-eigenschaften**. Das ist zunächst die Fähigkeit, Informationen aller Art in einen Kontext zu setzen. Da sich viele Wortbedeutungen erst aus einem solchen Kontext erschließen lassen, sollen diese Systeme somit in die Lage versetzt werden, natürliche Sprache, ob geschrieben oder gesprochen, mit all ihren Mehrdeutigkeiten zu verstehen. So hat beispielsweise der Begriff „Zelle“ im biologischen Kontext eine ganz andere Bedeutung als im Mobilfunkbereich. Diese als **Kontextualität** bezeichnete Eigenschaft betrifft nicht nur das Verständnis von strukturierten, sondern vor allem auch von unstrukturierten Daten (vor allem Text, zunehmend aber auch Bilder, Videos und Audiodateien) aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Quellen. Ermöglicht wird dies z. B. durch entsprechende Fortschritte im Bereich der Computerlinguistik, aber auch der Bilderkennung.

Eine weitere wichtige Fähigkeit ist die, aus Erfahrungen lernen zu können und sich somit einem sich ständig (bspw. auf Grund neuer Daten) ändernden Umfeld anpassen zu können. Daher wird diese Fähigkeit auch als **Adaptivität** bezeichnet. Dies wird durch Algorithmen aus dem Bereich des maschinellen Lernens ermöglicht, die in den letzten Jahren erheblich weiterentwickelt und verbessert wurden. Kognitive Systeme wie beispielsweise Watson besitzen ferner die Fähigkeit **Hypothesen** aus den erschlossenen Daten generieren zu können. Ferner wird angestrebt, dass solche Systeme auf einfache und natürliche Art und Weise mit dem Nutzer **interagieren** können. Dabei sollen kognitive Systeme Menschen bei der Entscheidungsfindung unterstützen, indem sie ihm helfen, sehr große Datensätze zu erschließen und daraus Wissen zu generieren. Dies ist vermutlich auch der wesentliche Unterschied zur künstlichen Intelligenz, bei der angestrebt wird, dem Menschen Entscheidungen abzunehmen.

Eines der wichtigsten wissenschaftlichen **Anwendungsfelder** für Cognitive Computing ist derzeit die Medizin. Zur Erzeugung neuen Wissens werden hier nicht nur wissenschaftliche Publikationen genutzt, sondern auch Daten aus dem Bereich der Genomsequenzierung, Screeningdaten und Daten anderer medizinischer oder biochemischer Experimente. Mittels Cognitive Computing ist es möglich, diese sogenannten Datensilos nicht nur miteinander zu verknüpfen, sondern auf dieser Basis auch Hypothesen zu generieren, die dann über-

prüft werden können. Auf diese Weise ist es beispielsweise gelungen für den Stoffwechsel wichtige Enzyme zu identifizieren. Ein weiterer Anwendungsfall befasste sich damit, für bereits entwickelte Medikamente neue mögliche Indikationen zu identifizieren. Solche Systeme werden aber nicht nur in der medizinischen Forschung, sondern auch im klinischen Alltag eingesetzt, um zu einer evidenz- und datenbasierten Entscheidung über die passende Therapie zu gelangen.

Weitere Anwendungen finden sich beispielsweise im Bereich der Cybersicherheit oder der Analyse von Kundenbeschwerden. Flankiert werden diese Projekte durch medienwirksame Einsätze des Computerprogramms Watson. So wurde das Programm beispielsweise in der Filmindustrie genutzt, um einen Kinotrailer für einen neuen Film zu erstellen.

Insgesamt sollen Kognitive Systeme also dazu beitragen, mit der zunehmenden Komplexität in vielen Bereichen von Gesellschaft, Wirtschaft, Technologie und Wissenschaft, die mit immer größeren als Basis für Entscheidungsfindungen zur Verfügung stehenden Datenvolumen verbunden ist, umgehen und diese nutzen zu können. Dabei wird es zunächst darum gehen, entsprechende Systeme für jeweils spezielle Wissens- und Anwendungsdomänen zu entwickeln. Das ultimative Ziel wären jedoch Anwendungen, die ähnlich domänenübergreifend arbeiten können wie der Mensch. Solche Systeme könnten Entscheidungsfindungsprozesse im großen Maße unterstützen. Ob man in diesem Kontext allerdings gleich vom Beginn einer neuen Ära sprechen kann, sei dahingestellt.

Dr. Marcus John, Oktober 2017

Metall-organische Gerüstverbindungen

Viele potenzielle Anwendungsgebiete hochporöser metall-organischer Gerüstverbindungen werden auch von anderen, bereits etablierten Werkstoffen sehr gut bedient; hier müssen sie ihren Mehrwert erst unter Beweis stellen.

Metall-organische Gerüstverbindungen (MOF = metal-organic frameworks) gehören zu der vielfältigen Gruppe der hochporösen Materialien und besitzen extrem große Oberflächen auch bei sehr kleinen Volumina. Diese relativ jungen Materialien tauchten vor etwa 20 Jahren erstmals in der Literatur auf und haben seitdem eine rasante Entwicklung durchlaufen. Im zivilen Bereich werden sie beispielsweise als Elektrodenmaterialien in Batterien, als Katalysatoren oder Sensoren, aber vor allem zur Speicherung und Absorption von Gasen erforscht und teilweise bereits genutzt. Forschungsarbeiten für militärische Anwendungen befinden sich im Wesentlichen noch im Grundlagenstadium. Hier ist z.B. an den Einsatz von MOF zur Detektion und Zerstörung von Chemikalien oder als Explosivstoffe zu denken.

MOF sind aus Metallionen oder Metallionen-Gruppen, die als Knotenpunkte dienen, und organischen Verbindungsmolekülen (sog. Linkern) aufgebaut, die jeweils zwei oder mehr der Metallknotenpunkte verbinden. So entstehen sehr gleichmäßige Gitternetze. Typischerweise sind Größe und **Eigenschaften** der regelmäßigen Poren in MOF insbesondere durch die genutzten Linker schon bei der Herstellung einstellbar. Dies ist ein besonderer Vorteil von MOF gegenüber anderen hochporösen Materialien wie Zeolithen oder Aerogelen.

So führen längere Linker beispielsweise zu größeren Poren, wobei die Porengröße von derzeit weniger als 1 nm bis hin zu 50 nm variiert werden kann. Zudem kann die Beschaffenheit der Porenwände in einem MOF durch den Einsatz von speziell funktionalisierten Linkermolekülen auf eine bestimmte Anwendung hin zugeschnitten werden. So können beispielsweise katalytische Zentren zur Zersetzung von Chemikalien oder selbstleuchtende Strukturen als Sensorik-Komponenten direkt eingebaut werden. MOF können zudem

elektrisch leitende Eigenschaften aufweisen und im Verhältnis zu rein organischen Polymeren weisen sie eine hohe thermische Stabilität auf.

Für die **Herstellung** von MOF können verschiedene Verfahren, wie z.B. sogenannte hydro- oder solvothermale Prozesse genutzt werden. Dabei werden Metallsalze und Linker gemeinsam mit einem Lösungsmittel über Stunden bis hin zu mehreren Tagen erhitzt, wobei die MOF langsam auskristallisieren. Diese Verfahren sind häufig jedoch nur für kleinere Mengen geeignet, weshalb beständig an der Optimierung dieser und weiterer Prozesse geforscht wird. Beispielsweise werden auch analoge Prozesse in Mikrowellengeräten oder gänzlich lösungsmittelfreie Methoden getestet. Auch der gezielte Aufbau an speziellen Oberflächen durch schichtweises Wachstum wird erforscht. Eine spätere Modifikation der fertigen Gerüststrukturen ist zum Teil ebenfalls möglich. Auf diese Weise können neue oder noch benötigte Funktionalitäten auch nachträglich eingeführt werden.

Besonders relevante militärische **Anwendungsbereiche** sind die Detektion und Zerstörung von Kampf- und Explosivstoffen. Die Detektion toxischer Chemikalien und deren Unschädlichmachung durch die Aufnahme in das metall-organische Gerüst sind aber auch im zivilen Bereich von großem Interesse. Beispielsweise könnten entsprechende MOF als Filter in Industrieanlagen eingesetzt oder im Bereich der Kriminalaufklärung genutzt werden. Zur Detektion bestimmter Chemikalien werden dabei bevorzugt MOF genutzt, die selbst leuchten. Sind solche Chemikalien bei der Prüfung anwesend, lagern sie sich in das metall-organische Gerüst ein und das Leuchten lässt nach oder verschwindet ganz. Bei der katalytischen Zerstörung von giftigen Stoffen mit MOF werden hingegen Gerüstverbindungen genutzt, die in ihrem Inneren katalytische Zentren besitzen. Das können zum einen die Metallionen des Gitters sein (z.B. Kupfer-Ionen), aber auch speziell eingebaute chemische Strukturen, die an den Linkern befestigt und in der Lage sind spezifische Chemikalien zu zersetzen.

Neben der Detektion und Zerstörung von Kampfstoffen sind militärisch aber auch MOF mit hoher Energiedichte z.B. als Spreng- und Treibstoffe von Interesse. Ihre Wirkung und Einsetzbarkeit sind dabei entscheidend von ihrem inneren Aufbau abhängig. Vorteile von MOF gegenüber konventionellen Explosivstoffen sind ihre relative Unempfindlichkeit gegenüber mechanischen Belastungen wie Schlag oder Reibung und ihre relativ gute Stabilität gegenüber hohen Temperaturen. Konventionelle MOF können darüber hinaus potentiell auch als stabilisierende Wirtsgitter für Explosivstoffe wie z.B. TNT genutzt werden.

Die Forschung und Entwicklung dieser Bereiche steht jedoch noch vor großen **Herausforderungen**. Beispielsweise gibt es derzeit noch keine geeigneten Produktionsverfahren für die Massenfertigung solcher MOF. Zudem ist in den Bereichen Detektion und Zersetzung giftiger Chemikalien das Spektrum der detektierbaren Stoffe noch sehr gering. Auch die Zersetzungsgeschwindigkeiten sind noch nicht ausreichend hoch, um wirklich effektiv zu sein. Häufig stellt auch noch die Integration katalytischer Zentren in ein MOF ein Problem dar. Eine besondere Herausforderung für MOF mit hoher Energiedichte stellt außerdem deren systematische Erschließung dar, da sie in direkter Konkurrenz zu bereits existenten hoch-energetischen Materialien stehen. In vielen Fällen wurden bisher auch die Explosionswärmen lediglich rechnerisch abschätzt und nicht experimentell bestimmt.

Insgesamt sind MOF durch ihre Vielseitigkeit für viele verschiedene zivile und militärische Anwendungsbereiche von Interesse. Daher nehmen Forschung und Entwicklung dieser hochporösen Materialien in der Breite weiterhin stark zu. Viele potentielle Anwendungsbiete von MOF werden allerdings auch von anderen bereits etablierten Werkstoffen wie Zeolithen, Aerogelen oder anderen Polymernetzwerken sehr gut bedient; hier müssen sich die metall-organischen Gerüstverbindungen erst durchsetzen. Während die Forschung in den genannten militärischen Anwendungsbereichen noch im Grundlagenstadium und daher langfristig anzusehen ist, ist die Bandbreite der Entwicklungsstufen im Zivilen deutlich größer; dort reicht die Spanne heute von ersten Forschungsansätzen bis hin zur Marktreife.

Dr. Diana Freudendahl, November 2017

Active Debris Removal

Weltweit werden Konzepte entwickelt, den zunehmenden Weltraumschrott aktiv aus der für Weltraumtechnologien und -infrastrukturen gefährlichen Zone zu beseitigen.

Als Space Debris bezeichnet man alle künstlichen, nicht mehr im Gebrauch befindlichen Objekte, die sich in einer Umlaufbahn um die Erde befinden (z. B. Trümmerteile von kollidierten Satelliten). Während die Anzahl solcher auch als Weltraumschrott bezeichneten Teile immer mehr zunimmt, steigt gleichzeitig auf der Erde die Abhängigkeit von funktionierenden Satellitensystemen. Der Gefahr, dass diese schon durch Kollisionen mit sehr kleinen Objekten zerstört werden können, versucht man heute durch Detektion des Schrotts und das Fliegen von Ausweichmanövern zu begegnen. Da dieses Vorgehen schon in absehbarer Zeit nicht mehr auszureichen droht, werden weltweit Konzepte entwickelt, Space Debris aktiv aus der Gefahrenzone zu beseitigen (Active Debris Removal, ADR).

Erdgebundene Teleskop- und Radarstationen sind heute in der Lage, ca. 80 % von Space Debris Objekten mit Durchmessern von bis herab zu wenigen Zentimetern zu detektieren. Hingegen sind die schätzungsweise weit über 160 Millionen Objekte mit einem Durchmesser kleiner als cm mit heutigen Methoden noch gar nicht erfassbar. Dabei entfalten schon kleine Weltraumschrottteilchen von nur wenigen Gramm Masse eine fatale Wirkung beim Zusammenstoß, da sie aufgrund der hohen Relativgeschwindigkeit zu den Satelliten eine hohe kinetische Energie besitzen. Dazu kommt die aktuell anhaltende Zunahme von künstlichen Objekten im Erdorbit seitens staatlicher, aber auch vermehrt privater Akteure (Stichwort New Space). Damit besteht die Gefahr, dass die für den Betrieb von Satelliten erforderlichen Umlaufbahnen unpassierbar werden, was wiederum enorme Auswirkungen auf heute bereits tief in unseren Alltag integrierte Technologien wie Telekommunikation, Navigation oder Wettervorhersagen hätte. Auch das militärische operative Agieren im Weltraum könnte damit in Zukunft wesentlich behindert werden.

Als einziger Ausweg aus diesem drohenden Dilemma wird die Nutzbarmachung von Verfahren zum Active Debris Removal gesehen. Allen diesbezüglichen Konzeptvorschlägen liegt als Ziel ein kontrolliertes De-Orbiting der Trümmerstücke zugrunde, damit diese durch den Wiedereintritt in die Erdatmosphäre schließlich verglühen oder auf sogenannten Friedhofsorbits verbleiben, auf denen sie keinen Schaden anrichten können.

Bei ADR unterscheidet man zwischen Methoden mit und solchen ohne Kontakt. Zu den **kontaktlosen Methoden** zählen beispielsweise **Laser**, die von erdgebundenen oder im Orbit befindlichen Stationen aus betrieben werden und Space Debris Objekte durch gezielte Laserimpulse abbremsen. Die erforderliche Abbremsung erfolgt nicht instant und es kann mehrere Jahre dauern, bis das Objekt wieder in die Atmosphäre eintritt und verglüht. Der Vorteil von Lasersystemen ist, dass sie mehrfach eingesetzt werden und sowohl kleine als auch große Objekte auf niedrigen Erdorbits entfernen können. Dazu ist aber die genaue Kenntnis von Position und Geschwindigkeit der Objekte erforderlich. Auch besteht die Gefahr, dass durch zu starken Beschuss Objekte weiter auseinanderfallen und somit zusätzlichen Weltraumschrott erzeugen.

Das Prinzip von **Methoden mit Kontakt** ist das Einfangen von Space Debris Objekten mittels unterschiedlicher Lösungen, die auf einem Basissatelliten, dem sogenannten Chaser, montiert sind und im Orbit operieren. Ziel ist es, mit dem Antriebssystem des Chasers eingefangene Objekte auf den gewünschten Orbit zu transportieren oder abzubremsen. Grundsätzlich unterscheidet man hier zwischen steifen und flexiblen Verbindungen zwischen Chaser und dem Space Debris Objekt.

Zu den **steifen Methoden** zählen sowohl Roboter- als auch Tentakelsysteme. Bei Robotersystemen werden mechanische Arme dazu eingesetzt, Objekte mittels an den Armenden befestigten Greifern zu packen. Bei Tentakelsystemen kommen flexible Arme zum Einsatz, die die Objekte umspannen. Der Vorteil beider Methoden ist, dass sie sowohl auf niedrigen als auch auf hohen Orbits eingesetzt werden könnten. Momentan wären die Kosten solcher Lösungen noch sehr hoch und ihre mehrfache Verwendbarkeit stark begrenzt. Die größte Herausforderung ist jedoch, dass sie sowohl ihre Geschwindigkeit als auch ihre Lage bzw. Drehung an das Space Debris Objekt anpassen müssen, da diese Objekte oft einen Restdrehimpuls aufweisen und taumeln, was ein zielgerechtes Greifmanöver erheblich erschwert.

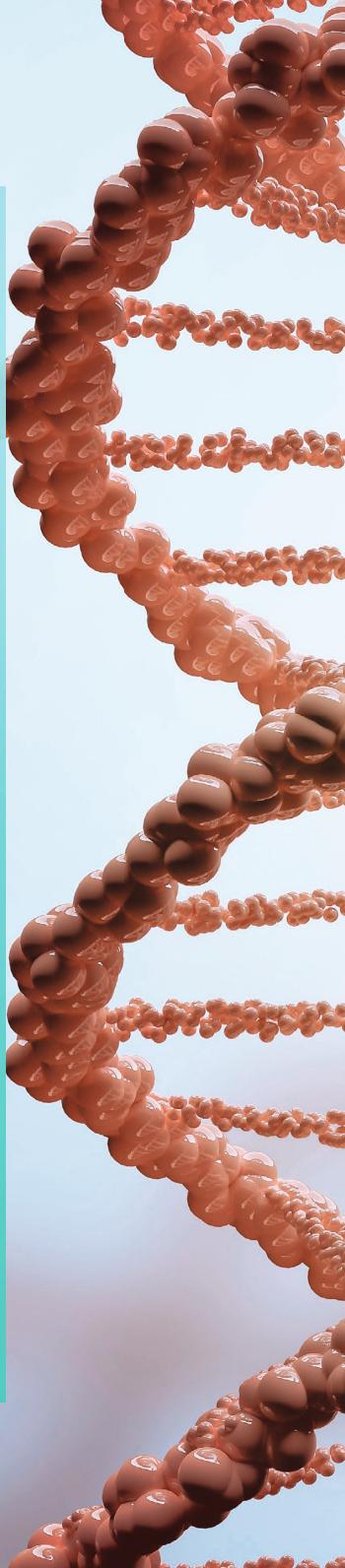
Von solchen Rotations- und Taumelbewegungen relativ unabhängig sind Methoden mit **flexiblen Verbindungen**. Bei Fangnetzen beispielsweise sind an den jeweiligen Ecken Gewichte befestigt, die über ein Abwurfsystem auf dem Chaser auf das Objekt abgeschossen werden und dafür sorgen, dass das Netz sich auf- und das Objekt umspannt. Bei Fangleinen sind, ähnlich wie bei Roboterarmen, am Ende Greifvorrichtungen installiert, die auf das Objekt abgeworfen werden und es packen sollen. Ebenfalls sind Lösungen im Gespräch, bei denen Harpunen auf das Objekt geschossen werden, um sie über ein Seil mit dem Chaser zu verbinden. Solche flexiblen Lösungen gelten momentan als vielversprechendste ADR Methoden, da sie nicht nur leicht, vielseitig und damit kosteneffektiv sind, sondern auch aus weiter Entfernung zum Objekt abgeworfen werden können. Auch hier besteht allerdings die Gefahr einer weiteren Fragmentierung des Objektes, z. B. bei ungünstigem Abwurf des Fangnetzes oder beim Eindringen der Harpunen in das Objekt.

Ungeachtet dessen, durch wen oder wodurch Space Debris produziert wurde und wird: Durch die Zunahme und immer tiefere Verflechtung von Weltraumtechnologien und -infrastrukturen in unserem Alltag und durch das Aufkommen neuer Akteure zählt das Problem des Weltraumschrotts zu den großen künftigen Aufgaben der Raumfahrt und ist nur in der internationalen Gemeinschaft zu lösen. Daher werden bereits viele der oben aufgelisteten Konzepte weltweit von Weltraumagenturen, staatlichen als auch privaten Organisationen hinsichtlich ihres Einsatzes bei künftigen ADR Missionen diskutiert und erprobt. Wir befinden uns momentan in einem Wettkampf um die besten Konzepte. Allen beteiligten Akteuren ist jedoch klar, dass die Lösung des Problems nicht länger aufgeschoben werden kann und dass es nun an der Zeit ist, erste Schritte zu unternehmen.

Dr. Fabrizio Musacchio, Dezember 2017

Beiträge aus 2018

Ionische Flüssigkeiten als Werkstoffbasis	340
Genome Editing	343
Künstliche Photosynthese	346
Structural Energy Storage	349
Soft Robots	352
Kognitives Radar	355
High-Entropy Alloys	358
All-Optical Circuits	361
Cyber Reasoning Systems	364
Gradientenwerkstoffe	367





Ionische Flüssigkeiten als Werkstoffbasis

**Das volle Potenzial aus Ionen bestehender Flüssigkeiten
als Basis für neue Werkstoffe ist heute noch kaum zu
überschauen.**

Konventionelle Flüssigkeiten wie z. B. Wasser bestehen überwiegend aus elektrisch neutralen Molekülen. Unter ionischen Flüssigkeiten (engl. Ionic Liquids, ILs) versteht man dagegen Salze in flüssigem Zustand, sie sind also hauptsächlich aus positiv und negativ geladenen Ionen sowie kurzlebigen Ionenpaaren aufgebaut. ILs sind im Prinzip seit über 100 Jahren bekannt, werden aber erst seit ca. 25 Jahren intensiver untersucht, als gezeigt werden konnte, dass viele von ihnen an Luft und Wasser stabil bleiben. Dabei sind sie mit einer Vielfalt physikalisch-chemischer Eigenschaften realisierbar. Heute findet ihre Untersuchung als Basis für neue Werkstoffe besonderes Interesse, z. B. für den Einsatz in der Sensorik oder auch als umweltverträglichere Explosivstoffe.

Die überwiegende Zahl an ILs, die bei niedrigen Temperaturen (unter 100°C, Kochsalz zum Vergleich schmilzt bei ca. 800°C) flüssig sind, besteht aus organischen Salzen. Zu ihren im Vergleich zu konventionellen Flüssigkeiten besonderen Eigenschaften zählen vernachlässigbarer Dampfdruck, hohe thermische und elektrochemische Stabilität, hohe Ionenleitfähigkeit, ein weiter Temperaturbereich des flüssigen Zustands, hohe Transparenz im sichtbaren Wellenlängenbereich sowie ein signifikantes Lösevermögen für organische, anorganische und polymere Stoffe. Aus diesen Gründen wurden sie bereits intensiv auf ihre Eignung als umweltverträglichere und v. a. maßschneiderbare Alternative zu leicht verdampfenden organischen, überwiegend toxischen Lösemitteln untersucht. Zu ihren Anwendungsfeldern gehören heute bereits viele Bereiche der sogenannten **Green Chemistry**. Ein weiteres wesentliches Einsatzgebiet ist **Energiegewinnung und -speicherung**. Hier dienen sie als sicherere Elektrolyten in Batterien, Superkondensatoren, Brennstoffzellen und Farbsolarzellen („Grätzel-Zellen“).

Die oben benannten Eigenschaften der ILs haben in den letzten 10 Jahren auch das Interesse der **Werkstoffforschung** als dritten großen Anwendungsbereich geweckt. Insbesondere werden sie hier als vielseitig einsetzbare Basis bzw. Bausteine für neuartige funktionelle Werkstoffe diskutiert. Kern dieses Ansatzes ist, dass ausgewählte Moleküle bzw. funktionelle Gruppen (organische, anorganische sowie polymere Bausteine) durch Ionen austausch oder chemische Funktionalisierung in das Gerüst der ILs eingebaut werden können. Dadurch lassen sich z.B. konventionelle Werkstoffe zu Ionenleitern modifizieren und aus ILs neuartige Funktionswerkstoffe maßschneidern. Wichtige einstellbare Stoffeigenschaften sind z.B. Viskosität, Dichte, Schmelzpunkt, Leitfähigkeit oder Löslichkeit, aber auch chemische Reaktivität.

Aktuell zeichnen sich vier große potenzielle Anwendungsfelder ab: Sensor- und Aktorwerkstoffe, energetische Werkstoffe, Stoffe mit einstellbaren optischen Eigenschaften und Hybridwerkstoffe aus ionischen Flüssigkeiten mit Nanokohlenstoffen. Von besonderem Interesse sind die drei erstgenannten. Das bislang umfangreichste Forschungsgebiet sind die **Sensor- und Aktorwerkstoffe**. Die Anwendbarkeit von ILs in diesem Bereich begründet sich in der Tatsache, dass ihre Eigenschaften durch Veränderung eines äußeren Reizes wie z.B. Helligkeit, Feuchtigkeit, Temperatur, Atmosphärenzusammensetzung (Gase) sowie durch ein elektrisches oder magnetisches Feld spontan oder über eine gewisse Zeitspanne hinweg geändert werden können, und das in der Regel reversibel.

Durch sichtbares sowie UV-Licht können beispielsweise Schmelzpunkt, Ionenleitfähigkeit oder das magnetische Moment verändert werden. Die relativ genaue Signalisierung von Umgebungsfeuchte gelingt durch den Einbau eines hydrophilen Anions, das Wassermoleküle in die Flüssigkeit zieht. Dadurch wird der Brechungsindex geändert, was wiederum optisch gemessen werden kann. Zusätzlich verändern diese ILs kontinuierlich mit der relativen Luftfeuchte auch ihre Farbe. Bei der Temperaturmessung lassen sich aktuell zwei Ansätze unterscheiden: Volumenänderung der ILs mit Temperaturänderung wie im klassischen Thermometer und optische Signalisierung über Farbänderung oder Lichtemission.

Für Gasmessungen scheinen ILs v. a. aufgrund der großen Löslichkeit von Gasmolekülen in ihnen sowie ihres extrem niedrigen Dampfdrucks, der eine stabile Messung über lange Zeiträume erlaubt, als besonders prädestiniert. Allerdings gibt es bislang erst ein indirektes Messverfahren (sog. Quarzkristall-Mikrowaage). Magnetisch responsive ILs sind neben vielfältigen weiteren Anwendungen besonders interessant für die Schwingungsdämpfung,

die bei Kraftfahrzeugen und auch Maschinen essentielle Bedeutung hat. Ihr Vorteil gegenüber konventionellen Trägerfluiden ist, dass sie magnetische Nanopartikel wesentlich besser und länger in Suspension halten können.

Energetische ILs stehen bereits seit über 15 Jahren erfolgreich im Fokus der Erforschung neuer, besser umweltverträglicher Explosivstoffe und Treibmittel und haben in der Fachliteratur bereits eine eigene Abkürzung (EIL) mit fortlaufender Nummerierung. Ein primäres Ziel ist, den Sprengstoff TNT zu ersetzen. Sehr jung dagegen ist der Ansatz, mit Hilfe von ILs ökologisch verträgliche selbstzündende Treibstoffe für Raketen zu entwickeln.

Das gesamte Gebiet der ILs mit einstellbaren optischen Eigenschaften befindet sich noch in einem sehr frühen Forschungsstadium. Erste photonische ILs können z. B. auf das Anlegen und Variieren einer elektrischen Spannung mit einer Verschiebung der Wellenlänge ihres Reflexionsmaximums für Licht reagieren. In Bezug auf nichtlineare optische Eigenschaften, die von hoher technischer Relevanz in den Bereichen optische Kommunikation und Datenverarbeitung sind, versprechen ILs v. a. kürzere Reaktionszeiten und eine niedrigere dielektrische Konstante als konventionelle Werkstoffe.

Insgesamt können ILs als eine Art Brückenwerkstoff zwischen organischen und anorganischen, molekular und ionisch aufgebauten sowie flüssigen und festen Werkstoffen gesehen werden. Ihr volles Potenzial ist heute noch kaum zu überschauen.

Stefan Reschke, Februar 2018

Genome Editing

Auf sog. Genscheren basierende Methoden zur Veränderung des Erbguts können zu einer revolutionären Erweiterung gentechnischer Möglichkeiten führen.

Schon seit längerer Zeit können Forscher mittels Gentechnik das Erbgut (also das Genom und damit insb. die DNA) von Organismen verändern. Bei konventionellen Verfahren wird das gewünschte Gen in Stammzellen (z.B. Eizellen), die aus dem Zielorganismus entnommen wurden, eingeführt, welche dann wieder in den Organismus eingebracht werden. Auf diese Weise enthält später jede Körperzelle das eingebrachte Gen. Derartige Methoden sind allerdings langwierig, aufwendig und oft ungenau und fehlerhaft. Die neueren Verfahren des sog. Genome Editing dagegen vermeiden den Umweg über zu entnehmende Stammzellen und können direkt im Zielorganismus wirken. Mit diesen seit einigen Jahren erforschten und teilweise schon praktisch genutzten Methoden kann man auf sehr schnelle und spezifische Weise Gene manipulieren und hier z.B. unerwünschte Mutationen korrigieren. Für eine neue Variante des Genome Editing steht das Akronym CRISPR/Cas. Dieses Verfahren ist gerade dabei, die Forschung zu revolutionieren, vor allem in der Medizin und in der Pflanzen- oder Tierzucht.

Beim Genome Editing werden bestimmte Enzyme genutzt, auch Designer-Nukleasen oder **Genscheren** genannt, die die DNA an vorher definierten Bereichen durchschneiden. Die Designer-Nukleasen (wie beispielsweise die mit den Akronymen ZFN oder TALEN bezeichneten Varianten) werden aus zwei verschiedenen Hauptbestandteilen künstlich hergestellt: Einer „Sonde“, welche im Labor so konstruiert wird, dass sie eine bestimmte DNA-Sequenz erkennt, und einer „Schere“, welche den DNA-Strang an der durch die Sonde definierten Stelle zerschneidet. Die so erzeugten Schnitte in der DNA-Doppelhelix setzen einen zelleigenen Reparaturmechanismus in Gang, der die DNA wieder repariert. Während dieser Reparatur können Gensequenzen eingebaut, ausgetauscht oder entfernt

werden. Auch die Manipulation von kurzen Gensequenzen bis hin zu einzelnen Basen in der DNA ist mit dieser Methode möglich.

Ein breites Anwendungsspektrum hat das Genome Editing bereits im Bereich der Landwirtschaft von **Kulturpflanzen**. Einige „editierte“ Lebensmittel sind in den USA schon zum Anbau und Verkauf zugelassen. Auch ein Einsatz in der landwirtschaftlichen **Nutztierzucht** wird immer aktueller. Der Unterschied zu herkömmlichen gentechnischen Verfahren (Herstellung transgener Organismen) besteht hier darin, dass keine artfremden Gene in den Organismus eingebracht, sondern lediglich einzelne Bausteine verändert bzw. arteigene Sequenzen eingebaut werden. Die veränderten Organismen sind im Nachhinein also nicht als technisch verändert erkennbar, da die herbeigeführten Veränderungen ebenso als natürliche Mutation hätten entstehen können. Daher unterscheidet sich das Genome Editing von bisher gesetzlich geregelten Methoden der Gentechnik maßgeblich und die Frage nach der gesetzlichen Einstufung solcher Organismen tritt immer wieder in den Vordergrund.

Neben den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten in der Grundlagenforschung und der Landwirtschaft wird das Genome Editing auch im Bereich der **Gentherapie** immer aktueller. So könnte es zum Beispiel eingesetzt werden, um bestimmte Erbkrankheiten zu behandeln. Bereits in den letzten Jahren wurden Krebs- oder HIV-Patienten mit Hilfe von Genscheren behandelt. Die Veränderung des Erbgutes wurde dabei allerdings außerhalb des Körpers vorgenommen und die „korrigierte“ Version dann wieder in den Körper eingebracht. Ende 2017 wurde erstmals eine Genschere (ZFN) direkt im Körper eingesetzt, das heißt in die Blutbahn eines Menschen eingebracht, um die Erbkrankheit Morbus Hunter zu behandeln. Allerdings sind Ergebnisse zu Wirkung und Nebenwirkungen erst in einigen Monaten zu erwarten.

Eine neue Methode des Genome Editing ist das **CRISPR/Cas-System**. Dies beruht auf einer bakteriellen Immunabwehr, mithilfe derer sich Bakterien vor einer wiederholten Infektion mit Viren schützen. Das CRISPR System baut dafür Stücke der viralen DNA in das eigene Erbgut ein, die daraus resultierende Sequenz wird als CRISPR bezeichnet. Die Zelle produziert folgend RNA, welche Gegenstücke zu der Virus-DNA darstellen. Diese Leit-RNA dient als Sonde für das Cas-Protein und leitet es bei erneuter Infektion zum Viren-Genom, wo das Protein die virale DNA zerschneidet und somit unschädlich macht. Diese hochspezifische Leit-RNA markiert den Hauptunterschied zwischen CRISPR und anderen Methoden

des Genome Editings und macht CRISPR zur neuen Wunderwaffe. Denn die Leit-RNA kann durch Wissenschaftler im Labor in kurzer Zeit selber synthetisiert werden. Weiterhin ist die Herstellung von CRISPR wesentlich einfacher als beispielsweise die von ZFN oder TALEN, dauert nur ca. 3 Tage (statt 5 Tage (TALEN) oder mehrere Monate (ZFN)) und kostet nur etwa 10 % im Vergleich zu den anderen Genscheren.

Eine neue revolutionäre, im Zusammenhang mit CRISPR/Cas diskutierte Methode ist der **Gene Drive**. Mit dieser Methode wäre es möglich mit einzelnen veränderten Individuen Einfluss auf ganze Populationen zu nehmen und innerhalb kürzester Zeit, sogar in der freien Wildbahn, in die Evolution einzugreifen. CRISPR wird hier dazu genutzt, um bestimmte veränderte Eigenschaften des Erbgutes, die, wenn sie an die nächste Generation vererbt werden, nur auf einem der Chromosomensätze vorhanden sind, auf den zweiten, vom nicht veränderten Elternteil stammenden Chromosomensatz zu übertragen. Das garantiert eine hundertprozentige Sicherheit der Weitervererbung des veränderten Genmaterials. So könnte möglicherweise Malaria innerhalb kurzer Zeit ausgerottet werden.

Mit dem Potential der Methode steigen allerdings auch die mit dem Genome Editing verbundenen **Risiken und Bedenken** an. Fehler in der Vererbung, falsches Schneiden der Gene oder falsches Zusammenbauen beim Reparaturmechanismus sind nicht ausgeschlossen und können, gerade in der freien Wildbahn eingesetzt, verheerende Folgen für Mensch und Umwelt haben. Viele Wissenschaftsorganisationen sprechen sich daher für eine vorsichtige Herangehensweise und Sicherheitsmaßnahmen bei dieser Technik aus.

Dr. Vanessa Hollmann, März 2018

Künstliche Photosynthese

Die gegenwärtig intensiven Forschungsbemühungen lassen erwarten, dass man bereits in 10 bis 20 Jahren zu praxistauglichen Verfahren der Künstlichen Photosynthese zur Erzeugung von Wasserstoff oder anderen Brennstoffen kommen kann.

Mit der natürlichen Photosynthese nutzen Pflanzen Energie aus dem Sonnenlicht zur Einbindung des Kohlenstoffdioxids aus der Umgebungsluft in neue Pflanzenmasse. Dieser Vorgang wird von Experten als der wahrscheinlich wichtigste biochemische Prozess auf der Erde eingeschätzt, läuft aber nur mit einem geringen Wirkungsgrad ab. Schon seit den 1970er Jahren versucht man ernsthaft, ihn technisch nachzubilden und zu optimieren. Aber erst in jüngster Zeit haben neue Erkenntnisse aus der synthetischen Biologie zusammen mit einem verstärkten Einsatz von Fördermitteln zu Fortschritten geführt, die auf erste praktische Einsätze künstlicher Photosynthese bereits in absehbarer Zeit hoffen lassen.

Grob gesprochen ist Photosynthese der Prozess der Nutzung von Strahlungsenergie durch den das Sonnenlicht absorbierenden Pflanzenfarbstoff Chlorophyll zur Umwandlung von Wasser und Kohlenstoffdioxid in Sauerstoff und Glucose, aus der schließlich neues Pflanzenmaterial gebildet wird. In Zwischenschritten dieses natürlichen Prozesses entstehen freie, durch das Licht energetisch angeregte Elektronen sowie schließlich Wasserstoff, der zur Synthese der entstehenden Kohlenwasserstoffe (also der Glucose bzw. des neuen Pflanzenmaterials) gebraucht wird. Die Nutzung des Endprodukts Biomasse z.B. zur Erzeugung alternativer Kraftstoffe ist heute Stand der Technik, wenn auch wegen des geringen Gesamtwirkungsgrads der natürlichen Photosynthese (ca. 1 %) mit relativ großem Flächenbedarf verbunden. Letzteres liegt schon allein daran, dass der natürliche Farbstoff Chlorophyll lediglich blaue und rote Anteile des Sonnenlichts absorbiert, Wellenlängen im mittleren grünen Bereich jedoch reflektiert. Aber auch auf die „Zwischenprodukte“ elektrische Energie oder Wasserstoff kann im Prinzip zugegriffen werden. Allerdings sind die Wirkungsgrade der hier zugrunde liegenden natürlichen Prozesse so

gering, dass nur deren technische bzw. künstliche Optimierung zu brauchbaren Ergebnissen führen kann. Große Probleme bei der Entwicklung künstlicher Photosynthesesysteme bereitet jedoch immer wieder die geringe Umweltstabilität der eingesetzten Komponenten bzw. Materialien. Diese sollen gleichzeitig robust und kostengünstig sein und einen hohen Wirkungsgrad ermöglichen. Bis heute ist es nicht gelungen, diese drei Forderungen alle gleichzeitig zu erfüllen.

Auf der Grundlage photosynthetischer Teilprozesse basierende photovoltaische Systeme sind die sog. **Farbstoffsolarzellen**, nach ihrem Erfinder auch als Grätzelzellen bezeichnet. Eine Grätzelzelle besteht aus zwei Elektroden in sehr geringem Abstand, von denen eine doppelt beschichtet ist. Unmittelbar auf dieser Elektrode ist eine dünne Schicht aus Titan-dioxid aufgetragen, darauf eine weitere dünne Schicht aus Farbstoffmolekülen. Durch Absorption von Licht werden Elektronen von den Farbstoffmolekülen gelöst. Das Titandioxid nimmt die dabei frei werdenden Elektronen auf, während die positiven Ionen zur anderen Elektrode wandern. Dadurch entsteht eine elektrische Spannung. Im Detail weisen unterschiedliche Varianten der Farbstoffsolarzellen erhebliche Unterschiede auf. So nutzte Grätzel natürliche pflanzliche Farbstoffe, während heute synthetische Farbstoffe eingesetzt werden. Theoretisch könnten mit Grätzelzellen Alternativen zu herkömmlichen Solarzellen zur Verfügung stehen, die sowohl ökonomisch als auch ökologisch eine gute Bilanz vorweisen. Zum Beispiel können sie indirektes Licht ebenso gut nutzen wie direkte Sonneneinstrahlung. Hinzu kommt, dass Farbstoffsolarzellen in beliebigen Formen und Farben hergestellt werden können und sich so jeder Architektur anpassen. Allerdings fehlt es noch an Erfahrungen im alltäglichen Praxiseinsatz. Bis ins Detail sind die Vorgänge in einer Grätzelzelle außerdem noch immer nicht verstanden.

Die neuesten Erfolgsmeldungen zur Künstlichen Photosynthese kommen aus Projekten zur Nutzbarmachung der **Wasserstoffgewinnung** aus der Energie des Sonnenlichts bzw. zur instantanen Weiterverarbeitung des Wasserstoffs zu **Biokraftstoffen** oder schließlich gar zu **beliebigen Verbindungen aus Kohlenstoffdioxid**. Ziel ist auch hier, die geringen Wirkungsgrade der natürlichen Photosynthese deutlich zu verbessern und z.B. auf Werte um die 20 % zu steigern. Ein wesentlicher Ansporn zur Realisierung von Verfahren der Künstlichen Photosynthese zur Erzeugung von Kohlenwasserstoffen ist neben der Nutzbarmachung der Endprodukte insbesondere die Tatsache, dass gleichzeitig das klimaschädliche Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre entfernt wird.

Eines der größten Probleme sind jedoch bisher die Materialien für die Photoanode, die für die Absorption des Sonnenlichts zuständig sind (also die Ersatzstoffe für das natürliche Chlorophyll). Eine Forschungsrichtung konzentriert sich bei ihrer Suche auf Materialien, die sowohl kostengünstig als auch stabil sind und entwickelt diese zu besseren Lichtabsorbern. In diesem Zusammenhang sind insbesondere bestimmte Metalloxide zu nennen. Eine andere Schule geht dagegen von effizienten Lichtabsorbern aus und arbeitet daran, diese stabil und preisgünstig zu machen. Auch organische Moleküle oder die in die Solarzellenforschung in den letzten Jahren intensiv untersuchten Perowskite könnten in der Künstlichen Photosynthese eine Rolle spielen. Ein weiterer Schwerpunkt der Entwicklungsbemühungen liegt bei den benötigten Katalysatoren. Erfolgversprechende Ansätze gibt es hier bei der Nachbildung der Funktionalität natürlicher Enzyme durch anorganische Werkstoffe, die gleichzeitig über ausreichende Robustheit und Lebensdauer verfügen.

So lassen die gegenwärtig intensiven Forschungsbemühungen insgesamt erwarten, dass man bereits in 10 bis 20 Jahren zu praxistauglichen Verfahren der Künstlichen Photosynthese zur Erzeugung von Wasserstoff oder anderen Brennstoffen kommen kann. Erste Anwendungen könnte es dort geben, wo keine herkömmliche Energieinfrastruktur vorhanden ist, also z. B. in Entwicklungsländern für die Versorgung einzelner Gehöfte mit Biokraftstoffen.

Jürgen Kohlhoff, April 2018

Structural Energy Storage

Erste Anwendungen von Strukturwerkstoffen, die gleichzeitig elektrische Energie speichern, werden vermutlich mittelfristig bei in großen Stückzahlen gefertigten Produkten wie Smartphone-Gehäusen realisiert werden.

Mit der starken Verbreitung tragbarer elektronischer Systeme und dem Aufkommen verschiedenster Varianten elektrisch angetriebener Land- und Luftfahrzeuge hat die Forschung an Speichern für elektrische Energie in den letzten ca. zwei Jahrzehnten großen Auftrieb erfahren. Auch wenn über diesen Zeitraum hinweg deutliche Erfolge bei der Erhöhung der Speicherdichten z.B. von elektrochemischen Energiespeichern wie Batterien zu verzeichnen sind, sind diese doch nicht beliebig steigerbar und werden voraussichtlich auch immer unterhalb der Energiedichte flüssiger Treibstoffe bleiben. Um diesem prinzipiellen Nachteil zu begegnen, müssen in den jeweiligen Systemen alle Potenziale zur Speicherung elektrischer Energie ausgeschöpft werden. Hierfür ist der vergleichsweise neue Ansatz des Structural Energy Storage eine besonders interessante Option. Darunter versteht man die Speicherung elektrischer Energie in multifunktionalen Werkstoffen, die gleichzeitig sowohl als leichte, stabile Strukturwerkstoffe als auch als Energiespeicher dienen und so beträchtliche zusätzliche Volumina der Systeme zur Energiespeicherung nutzbar machen. Heute befinden sich die diesbezüglichen Forschungs- und Entwicklungsbemühungen noch weitgehend im Grundlagenbereich.

Für die Energiespeicherung in Strukturmaterialien kommen in der Praxis vor allem die Speicherprinzipien von wiederaufladbaren Batterien und Superkondensatoren in Frage. Man kann dann von Strukturbatterien bzw. strukturellen Superkondensatoren sprechen. Batterien speichern elektrische Energie durch in ihrem Inneren stattfindende elektrochemische Reaktionen. Mit ihnen lassen sich vergleichsweise hohe Energiedichten erreichen, d.h. der nutzbare Energieinhalt bezogen auf die Masse bzw. das Volumen ist relativ hoch. Superkondensatoren bestehen in ihrer einfachsten Form aus zwei Elektroden, die durch

einen Elektrolyten (Ionenleiter) und einen Separator, der zwar Ionen, nicht aber Elektronen leitet, getrennt werden. Sie speichern Energie an ihren Elektroden in ionisierten Schichten, welche entstehen, wenn die im ungeladenen Zustand gleichmäßig in dem Elektrolyten verteilten Ionen nach Anlegen einer äußeren Ladespannung zu den Elektroden wandern. Zwar ist die mit Superkondensatoren erreichbare Energiedichte etwa zehnfach geringer als bei Batterien, dafür lassen sich mit ihnen bis zu etwa hundertfach höhere elektrische Leistungen erreichen, da bei ihnen keine bremsenden chemischen Reaktionen an der Energiefreisetzung beteiligt sind. In der Praxis bedeutet das, dass sie sehr viel schneller geladen und entladen werden können als Batterien.

Will man multifunktionale Werkstoffe entwickeln, die als Energiespeicher und auch als Strukturwerkstoff dienen sollen, so müssen die Bestandteile sehr unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Ein interessanter Ausgangspunkt sind Kohlenstofffasern, die in eine Matrix aus Kunststoff eingebbracht für besondere Stabilität sorgen (Kohlefaser verstärkter Kunststoff, CFK). Kohlenstoff wird aber auch als Elektrodenmaterial in Energiespeichern genutzt. Zwar verwendet man hier traditionell sehr unterschiedliche Formen des Kohlenstoffs, aber es besteht die Möglichkeit, diese beiden Rollen zu vereinen. Ähnliches gilt für Polymere, die in Faserverbundwerkstoffen als Matrixmaterial dienen, aber in speziellen Varianten auch als Ionenleiter in Energiespeichern vorkommen. Diese beiden Rollen in einem Werkstoff zu vereinen, gehört zu den Herausforderungen der Structural Energy Storage.

Die Forschung an Strukturbatterien konzentriert sich auf die Adaption des Funktionsprinzips von Lithium-Ionen-Batterien, die sich heute in vielen Bereichen durchgesetzt haben. Um eine solche Batterie mechanisch stabil zu gestalten, müssen Kohlenstofffaser-Elektrodenmaterialien mit hoher Festigkeit und hohem Aufnahmevermögen für Lithium-Ionen gefunden werden. Außerdem muss der flüssige Elektrolyt, in dem sich die Lithium-Ionen bewegen, durch einen festen Polymerelektrolyt ersetzt werden. Hier steckt eine der größten Herausforderungen, da mit steigender mechanischer Festigkeit der Materialien die für den Speichervorgang benötigte Ionenleitfähigkeit abnimmt. Neben der Optimierung der Werkstoffe selber wird hier auch an komplett neuen Anordnungen der Einzelkomponenten der Batterien gearbeitet, um die Dicke der Elektrolytschichten und damit den Weg, den die Lithium-Ionen zurücklegen müssen, zu verringern. Strukturelle Superkondensatoren sind ebenso wie Strukturbatterien auf gut ionenleitende, mechanisch stabile Elektrolyte angewiesen. Des Weiteren geht es in der Forschung hier um die Erhöhung der Oberfläche

der Elektroden, um dort beim Aufladen möglichst viele Ionen einzulagern zu können und damit die Speicherdichte entsprechend zu erhöhen.

Structural Energy Storage hat das Potenzial, einen wichtigen Beitrag zum Leichtbau zu leisten, der eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Realisierung von Elektrofahrzeugen mit praxisgerechten Reichweiten ist. Für Elektrofahrzeuge wären sowohl Strukturbatterien als auch strukturelle Superkondensatoren einsetzbar, wobei Batterien aufgrund ihrer Speicherdichte im Wesentlichen den Energievorrat speichern und damit die Reichweite bestimmen, während Superkondensatoren wegen ihrer hohen Leistungsdichte besser in der Lage sind, Bremsenergie aufzunehmen oder beim Beschleunigen Spitzenlasten abzudecken. Verwandte Einsatzgebiete sind Straßenbahnen, Eisenbahnen, Elektrofahrräder, der in den letzten Jahren rasant wachsende Markt für Drohnen, aber auch größere elektrisch bzw. hybridelektrisch angetriebene Flugzeuge. Ein weiteres Anwendungsfeld wären außerdem tragbare elektronische Geräte wie Mobiltelefone, bei denen energiespeichernde Gehäuse einen signifikanten Anteil an der Energieversorgung beisteuern könnten.

Erste Anwendungen energiespeichernder Strukturwerkstoffe werden vermutlich mittelfristig bei in großen Stückzahlen gefertigten Produkten wie Smartphone-Gehäusen realisiert werden. Eine breite Nutzung in Autos oder Flugzeugen, wo die Ansprüche an die Struktureigenschaften deutlich höher sind, ist erst langfristig zu erwarten.

Dr. Ulrik Neupert, Mai 2018

Soft Robots

Weitgehend aus nachgiebigen Materialien bestehende Roboter z.B. zur feinfühligen Handhabung empfindlicher Gegenstände haben ein großes Potenzial, ihr Durchbruch im Massenmarkt kann aber frühestens mittelfristig erfolgen.

Mit dem Begriff Roboter werden im allgemeinen Sprachgebrauch computergesteuerte automatisierte Maschinen verbunden, die eine starre Struktur besitzen und Gelenke, Scharniere oder Klappen aufweisen. Soft Robots bestehen im Gegensatz dazu aus nachgiebigen Materialien und sind an biologische Systeme angelehnt. Auch Sensorik und Aktorik, der Steuerungscomputer, die Energieversorgung und Kommunikationsvorrichtungen müssen in das flexible Material eingebettet sein bzw. idealerweise selbst aus flexiblen Materialien bestehen.

Potenzielle Anwendungsgebiete von Soft Robots liegen z.B. in der feinfühligen Handhabung empfindlicher Gegenstände oder der direkten Zusammenarbeit mit Menschen. Erste Varianten sind kommerziell erhältlich, insgesamt befindet sie die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Soft Robots aber noch allenfalls im Prototypenstadium.

Im Gegensatz zu starren robotischen Systemen sind die für Soft Robots verwendeten Materialien hoch beweglich und flexibel. Damit bieten sie viel mehr Möglichkeiten zur gezielten Verformung und zur Fortbewegung. Dafür werden speziell angepasste Kontrollmechanismen bzw. entsprechende Algorithmen entwickelt (z.B. künstliche neuronale Netze). Ihre Beweglichkeit verleiht Soft Robots potenziell Fähigkeiten, die in ähnlicher Weise nur bei lebenden Systemen zu finden sind. Als Demonstrationsobjekte für die Gestalt von Soft Robots wurden bereits verschiedenste Formen gezeigt, wie z.B. X-förmige Kriechroboter, raupenartige Systeme, fischartige Roboter, handähnliche Gebilde oder Greifer mit zumeist drei bis sechs Fingern. Auch besonders aufwändige Prototypen einer künstlichen Qualle oder eines künstlichen Rochens wurden bereits vorgestellt.

Häufig werden Soft Robots mit einer 3D-CAD (Computer-Aided Design) Software entworfen, wobei auch evolutionäre Algorithmen, also naturanaloge Optimierungsverfahren, genutzt werden, um Form und Funktion möglichst ideal auszugestalten. Für die Herstellung von komplexen Soft Robots aus solchen CAD-Dateien sind generative Fertigungsverfahren (3D-Druck) am besten geeignet. Die für den Aufbau eingesetzten Materialien besitzen typischerweise Eigenschaften, die natürlichen Geweben ähneln (z. B. Muskeln, Haut, Knorpel) bzw. ein geringes Elastizitätsmodul aufweisen (z. B. verschiedene Elastomere). Passend dazu wird eine Aktorik benötigt, die die einzelnen Segmente eines Soft Robots gezielt bewegen kann.

Hierbei gibt es zwei Varianten der Kraftübertragung: Einerseits können z. B. Formgedächtnismaterialien oder elektroaktive Polymere eingesetzt werden, die aufgrund bestimmter Reize (z. B. Strom, Licht oder Temperatur) Kräfte oder Drehmomente punktuell in die Struktur einleiten können. Zum anderen kann auch pneumatisch oder hydraulisch erzeugter Druck genutzt werden, beispielsweise in Form sog. künstlicher pneumatischer Muskeln.

In jedem Fall ist jedoch ein Mindestmaß an elektronischen Komponenten nötig, um den Roboter zu steuern. Zur Kontrolle von Aktoren, Sensoren und Energiequellen wurde bisher vornehmlich konventionelle und starre Elektronik eingesetzt. Mit dem Fortschreiten von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der flexiblen Elektronik (z. B. auf Basis organischer Materialien oder ultradünner Schichten) kann jedoch damit gerechnet werden, dass sich diese zunehmend bei der Gestaltung von Soft Robots durchsetzen wird. Auf Seiten der Sensorik sind hier aktuelle Entwicklungen sog. elektronischer Haut (Electronic Skin) besonders erwähnenswert.

Die größte Herausforderung für den Betrieb von Soft Robots stellt die Energieversorgung dar. Ideal sind hier kleine, weiche, dehn- und tragbare Energiequellen. Der Einsatz kleiner Energiequellen, die Miniatur-Kompressoren antreiben, ist möglich, solche Strukturen sind aber normalerweise nicht weich oder dehnbar. Mittlerweile wurden jedoch alternative Systeme entwickelt, wie z. B. eine pneumatische Batterie, bei der mit Hilfe von Wasserstoffperoxid ein Gasdruck zur Fortbewegung aufgebaut werden kann, oder die Nutzung von Kraftstoffen für zielgerichtete Verbrennungsprozesse. Vielversprechend ist aber vor allem die Forschung an flexiblen Batterien basierend auf Graphen, organischen Polymeren oder integrierten elektrisch leitenden Fasern, die in Soft Robots eingebaut werden könnten.

Potenzielle Anwendungsgebiete von Soft Robots sind beispielsweise Such- und Bergungseinsätze auf unzugänglichem Terrain, die feinfühlige Handhabung empfindlicher Gegenstände oder weiche Orthesen, die insbesondere für die Stabilisierung von Gliedmaßen sehr gezielte Versteifungen oder Formungen ermöglichen. Außerdem könnten Soft Robots z. B. als künstliche Exoskelette zur Unterstützung des Bewegungsapparats, als kollaborative Roboter in Industrie oder Medizin oder in der Exploration eingesetzt werden. Miniaturisierte Systeme könnten im Bereich des Katastrophenschutzes potenziell nicht nur zum Auffinden von Personen genutzt werden, sondern auch zur generellen Aufklärung, z. B. als Detektoren für Gefahrstoffe oder zur Inspektion und Reparatur von engen Leitungen. Zudem besitzen miniaturisierte Systeme das Potenzial in der Medizin sowohl zur Unterstützung von minimal-invasiven Operationen als auch zur Diagnose und Therapie direkt im Körper eingesetzt zu werden. Es wurden auch bereits Möglichkeiten untersucht, wie Soft Robots nach der Durchführung einer gestellten Aufgabe durch eingebaute (Selbst-)Zerstörungsmechanismen aktiv zersetzt werden könnten.

So ergibt sich insgesamt ein großes Potenzial für Soft Robots. Die diesbezügliche anwendungsnahe Forschung ist jedoch ein sehr interdisziplinäres Feld, das querschnittliche Expertisen aus Informatik, Materialwissenschaften und dem Maschinenbau nutzt. Entsprechend groß ist die Abhängigkeit von Entwicklungen in den verschiedensten Bereichen. Erste Schritte in der Entwicklung von Soft Robots sind aber bereits getan und mit einer stetigen Fortentwicklung der Technologie kann gerechnet werden. Bis zu einem größeren Durchbruch im Massenmarkt kann es jedoch noch einige Zeit dauern.

Dr. Diana Freudendahl, Juni 2018

Kognitives Radar

Die weiteren Leistungssteigerungen von Hochfrequenz- und Leistungselektronik sowie von signalverarbeitenden Schaltungen auf der einen und die rasante, allgemeine Weiterentwicklung der Automatisierung kognitiver Fähigkeiten auf der anderen Seite bringen für Radarsysteme noch ein erhebliches Potenzial für zukünftige Verbesserungen mit sich.

Der Begriff Kognitives Radar steht für die zunehmende Nutzbarmachung technischer Intelligenz zur Steuerung und Auswertung von Signalen innovativer Radarsysteme. Hier ist die Automatisierung kognitiver Fähigkeiten unabdingbar, wenn man die sich durch die immer komplexeren Technologien zur Signalerzeugung und -verarbeitung ergebenden Möglichkeiten adäquat ausschöpfen möchte. Bis zu einem gewissen Grad sind kognitive Radare heute bereits realisiert, für die Zukunft erwartet man sich hier aber noch weitere erhebliche Fortschritte, mit allen sich daraus ergebenden positiven Auswirkungen auf die Aufklärungsleistungen.

Durch neue Fertigungstechnologien konnten in den letzten Jahren Bauteile für Signalverarbeitung, Hochfrequenz und Antennen hergestellt werden, die die Zahl der möglichen Betriebszustände eines Radarsystems drastisch vervielfacht. Der Prozess der Detektion, Identifikation und des Trackings wird damit immer leistungsfähiger, die vorliegende Entscheidungssituation für den Bediener jedoch auch immer komplexer.

In der Fachwelt wird hier metaphorisch mit „Radar Cambrium Explosion“ der anschauliche Vergleich zur Artenexplosion im erdgeschichtlichen Kambrium gezogen, um die Vielzahl der jüngst entstandenen technologischen Möglichkeiten für Radarsysteme bildlich zu umreißen. Diese große Zahl an Betriebsparametern kann von Radarbedienern mit der erforderlichen operativen Geschwindigkeit nicht mehr manuell beherrscht werden. Daher wird IT-gestützte Automatisierung immer breiter angewendet. Kognitive Lösungen auf der Grundlage künstlicher Intelligenz finden hier ein herausforderndes Einsatzgebiet.

Doch welche technologischen Möglichkeiten führen bei adaptiven Radaranwendungen im Einzelnen zu dieser hohen Komplexität?

Da ist einerseits die hohe Variabilität schon bei der Strahlerzeugung. Durch den Übergang von einer einzelnen, großen Antenne hin zu Antennenfeldern von vielen tausend kleinen Einzelantennen, von der idealerweise jede einzelne in Wellenlänge, Phasenlage und Signalstärke individuell angesteuert werden kann, können maßgeschneiderte Wellenfronten erzeugt werden. So lässt sich die verfügbare Sendeleistung zum Beispiel auf ein schmales Beleuchtungsgebiet bündeln, was die Reichweite verbessert und die eigene Signatur in die anderen Richtungen minimiert. Auch kann elektronisch angesteuert eine schnelle Schwenkung des Strahls in andere Richtungen realisiert werden, ohne das Antennenfeld selbst mechanisch zu bewegen.

Auf den Fregatten der Klasse F124 sind beispielsweise vier solche Antennenfelder rund um den Mast fest verbaut und überwachen jeweils einen 90°-Sektor, ohne die Notwendigkeit beweglicher Teile. Mit dieser Flexibilität in der Strahlerzeugung können ebenfalls die Funktionen von Suchradar und Feuerleitradar zu einem Multifunktionsradar vereinigt werden. Für noch komplexere Aufgabenstellungen könnten auch Einzelantennen eines Antennenfeldes zu verschiedenen – und sich über die Zeit durchaus flexibel ändernden – Gruppen zusammengefasst werden, die dann jeweils andere Messaufgaben unabhängig voneinander zwar leistungsreduziert jedoch gleichzeitig erledigen. Andererseits machen all' diese Vorteile das Antennenmanagement jedoch auch um ein Vielfaches komplizierter.

Auch empfangsseitig können die einlaufenden Radarsignale immer detailreicher erfasst und verarbeitet werden. Zum einen liefert jede Einzelantenne des Feldes einen Signalbeitrag und erhöht die Zahl der verfügbaren und unterscheidbaren Einzelsignale, zum anderen kann jedes dieser Einzelsignale dank schneller und dynamischer Analog-Digital-Wandler auch noch in hoher zeitlicher Auflösung aufgezeichnet werden. Zusammen mit weiteren Baugruppen zur schnellen, digitalen Signalverarbeitung ergibt jedes Radarecho zwar einen sehr umfangreichen Datensatz, der jedoch andererseits auch eine differenzierte Auswertung ermöglicht. Hier die richtige Balance zu finden ist Aufgabe des Radar-Ressourcenmanagements.

Viele digitale Baugruppen der Signalverarbeitung lassen sich darüber hinaus programmierbar ausführen, sind also Software-definiert, und erlauben so, bei Bedarf einzelne

Komponenten des Radarsystems weitgehend umzuprogrammieren und damit schnell an den jeweiligen Aufklärungsauftrag anzupassen.

Um die schon heute hohe und künftig weiter steigende Adaptivität von Radarsystemen auch in zeitkritischen Anwendungen voll auszuschöpfen und die Leistungsgrenzen zu erreichen, wird versucht, die Steuerung weitgehend auf kognitive Verfahren zu stützen. Grundlegend ist dafür die Auslegung des Radarsystems in Regelkreisen zur selbstständigen Optimierung der Signalqualität. Eine Datenbank von Erinnerungen ermöglicht dabei eine automatisierte Abschätzung der erwarteten Auswirkungen veränderter Betriebsparameter, unterstützt so die operative Systemoptimierung und erweitert dabei gleichzeitig fortlaufend eben diese Datenbank. Ein kognitives Radar erfordert ferner eine Sensibilität, um die vorhandenen Handlungsmöglichkeiten und Ressourcen nach ihrer Bedeutung für den Auftrag priorisieren zu können sowie Intelligenz zur Entscheidungsfindung auf Basis eines stets mit Unsicherheiten behafteten Lagebildes.

In Teilespekten sind kognitive Radare schon heute realisiert. Die weiteren Leistungssteigerungen von Hochfrequenz- und Leistungselektronik sowie von signalverarbeitenden Schaltungen auf der einen und die rasante, allgemeine Weiterentwicklung kognitiver Lösungen auf der anderen Seite bringen für Radarsysteme noch ein erhebliches Potential für zukünftige Verbesserungen mit sich. Die Forderung nach Leistungssteigerungen lässt sich dabei schon allein aus der abnehmenden Radarsignatur potentieller Ziel durch Stealth-Technologie und geringe Zielgrößen (bspw. Unmanned Areal Systems) bei Verwendung von Werkstoffen mit geringer Radarrückstreuung (bspw. Faserverbünde) ableiten. Auch die Möglichkeit zur gezielten Reduktion der eigenen aktiven Signatur und die zunehmende Herausforderung der Koexistenz von Radaraufklärung und Kommunikation auf den begrenzt verfügbaren Nutzfrequenzen sind hier von Bedeutung.

Dr. Karsten Michael, Juli 2018

High-Entropy Alloys

Trotz vielversprechender Einzelergebnisse können signifikante bzw. kommerziell anwendungsrelevante Durchbrüche bei Legierungen, in denen alle Elemente in ungefähr gleicher Teilchenanzahl vorliegen, erst mittelfristig erwartet werden.

High-Entropy Alloys (HEAs) bilden eine neue Klasse von Legierungen, in denen alle Elemente in etwa gleicher Teilchenanzahl vorliegen. Dies unterscheidet sie fundamental von klassischen Legierungen, bei denen ein Element wie z. B. Nickel (in Nickel-Basislegierungen) oder Eisen (in Stählen) den Hauptanteil, die so genannte Basis, stellt, und alle weiteren Elemente in deutlich geringerem Anteil begleitend den Werkstoff bilden. HEAs werden erst seit Anfang der 2000er Jahre systematisch untersucht und befinden sich noch weitgehend im Stadium der Grundlagenforschung. Seit einigen wenigen Jahren gewinnen sie international stark an Aufmerksamkeit, weil sie des Öfteren außergewöhnliche thermische, elektrische, magnetische und insbesondere mechanische Eigenschaften zeigen, die sie für Anwendungen beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt prädestinieren.

HEAs werden i. d. R. aus vier oder mehr metallischen Elementen hergestellt. Über die praktisch nutzbaren Eigenschaften hinaus regen sie durch die bislang bei Legierungen nicht in Erwägung gezogene äquimolare Zusammensetzung neue theoretische Konzepte und Diskussionen an. Insbesondere kann mit klassischen thermodynamischen Simulationsansätzen die Phasenbildung der Legierungen nicht korrekt vorausberechnet werden. Ebenso gibt es noch erhebliche Wissenslücken in Bezug auf den Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung der HEAs, ihrer sich bildenden Mikrostruktur und den daraus resultierenden Eigenschaften, sodass noch immer sehr viele Laborversuche zur Erschließung dieses Gebietes nötig sind.

HEAs können auf unterschiedlichen Wegen hergestellt werden: Aus der Schmelze, aus dem festen Zustand oder über die Gasphase. Überwiegend wird der klassische Ansatz der Legierungsbildung über die Schmelze genutzt. Die Herstellung von HEAs aus dem festen

Zustand erfolgt über Mahlen der Ausgangsstoffe in einer Hochenergiiekugelmühle. Die Pulver werden anschließend pulvermetallurgisch weiterverarbeitet. Die durch Gasphasenprozesse gebildeten Legierungen können einphasige sowie mehrphasige Mischkristalle sein, bei bestimmten Zusammensetzungen sowie Herstellbedingungen entstehen jedoch auch amorphe Legierungen, so genannte Metallische Gläser. Ansonsten reicht die Struktur der gebildeten Gefüge vom einkristallinen über den nanokristallinen bis in den makrokristallinen Bereich.

HEAs vereinen häufig hohe Festigkeit und sehr gute Duktilität, was bisher eher als Widerspruch in sich gilt. Je nach ihrer Elementzusammensetzung können HEAs auch ein deutlich geringeres spezifisches Gewicht bei erheblich besseren mechanischen Eigenschaften besitzen als konventionelle Legierungen, was sie ggf. für Anwendungen im Leichtbau interessant macht. So wurden bei Raumtemperatur für ein HEA der Elemente Aluminium, Lithium, Magnesium, Scandium und Titan im Vergleich zu verschiedenen Al-Basislegierungen vergleichbarer Dichte (ca. 2,7 g/cm³) eine ca. 3- bis 30-fache Mikrohärte, eine 4- bis 20-fach höhere Fließgrenze und eine bis zu ca. 3-fach höhere spezifische Festigkeit berichtet. Im Hinblick auf die Festigkeit kommt man hier mit einem metallischen Werkstoff also schon in den Bereich von Siliziumcarbid, einer Hochleistungskeramik.

Auch in anderen Temperaturbereichen zeigen sich erste HEAs mit exzellenten mechanischen Eigenschaften. In der Domäne metallischer Feuerfestwerkstoffe wurden verschiedene HEAs aus 5 bis 6 Elementen synthetisiert, die um gut 20 % höhere Fließgrenzen als z. B. die in diesem Bereich eingesetzten Nickel-Chrom-Basislegierungen zeigen und bei deutlich höheren Temperaturen, z. T. erst jenseits von 1400 °C, versagen. Sie bestehen in der Regel aus Refraktärmetallen wie Titan, Zirkonium, Vanadium, Niob, Chrom oder Molybdän. Im Temperaturbereich deutlich unter 0 °C, in dem viele konventionelle Legierungen zu Versprödungsversagen neigen, zeigt beispielsweise ein HEA aus Chrom, Mangan, Eisen, Kobalt und Nickel sogar sich mit sinkender Temperatur noch verbesserte Messwerte (bis hinab zu –196 °C).

In Bezug auf elektrische, magnetische und thermische Eigenschaften wurden bislang hauptsächlich HEAs aus Übergangsmetallen untersucht, z. B. im System Aluminium, Eisen, Kobalt, Nickel, Chrom. Ihre Wärmeleitfähigkeit liegt je nach exaktem Mischverhältnis der Elemente zwischen 10 und 30 W/mK. Sie entspricht damit in etwa der hochlegierter Stähle und Nickel-Basislegierungen, ebenso wie die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit. Erste Untersuchungen zu magnetischen Eigenschaften gehen von HEAs aus,

die grundsätzlich Kobalt, Nickel und Eisen enthalten, dazu ein bis zwei weitere Metalle wie z.B. Aluminium, Silizium oder Kupfer. Durch temperaturabhängige Phasenübergänge zeigen diese Werkstoffe sich mit der Temperatur verändernde magnetische Eigenschaften, sind bei Raumtemperatur aber immer ferromagnetisch. Auch beim elektrischen Widerstand der bislang vermessenen HEAs zeigen sich signifikante Änderungen der Werte durch Hinzufügen oder Austausch einzelner Elemente sowie durch Gefügeveränderungen aufgrund von Wärmebehandlung. Bei einem HEA auf der Basis von Hafnium, Niob, Tantal, Titan und Zirkonium wurde unterhalb einer Sprungtemperatur von ca. 7,3 K Supraleitfähigkeit festgestellt.

Weitere einzelne Untersuchungen umfassen die Anwendung von HEAs als diffusionshemmende Beschichtungen, zur Wasserstoffspeicherung, als Katalysatoren für chemische Reaktionen oder in Bezug auf ihre thermoelektrischen Eigenschaften. Da sich das Forschungsfeld überwiegend im frühen Laborstadium befindet, noch keine geeigneten Simulationsansätze zur Berechnung von Eigenschaften in Abhängigkeit von der jeweiligen Zusammensetzung sowie keine Hochdurchsatzanalytik vorhanden sind, können trotz aller vielversprechenden Einzelergebnisse signifikante bzw. kommerziell anwendungsrelevante Durchbrüche erst mittelfristig erwartet werden.

Stefan Reschke, August 2018

All-Optical Circuits

Es ist heute schon absehbar, dass volloptische Schaltkreise die siliziumbasierte Elektronik allenfalls ergänzen, aber nicht völlig ersetzen werden.

Die Weiterentwicklung rein elektronischer Schaltkreise wird in Zukunft im Hinblick auf einen akzeptablen Energieverbrauch und erreichbare Datenübertragungsraten an physikalische Grenzen stoßen. Abhilfe verspricht hier die zunehmende Nutzbarmachung mit Photonen statt Elektronen arbeitender optischer Komponenten. Bei der Entwicklung sog. All-Optical Circuits geht es darum, eine Datenverarbeitung, -übertragung und -speicherung mit möglichst vollständig lichtbasierten Ansätzen zu realisieren. Dabei ist heute schon absehbar, dass solche volloptischen Schaltkreise die siliziumbasierte Elektronik allenfalls ergänzen, aber nicht völlig ersetzen werden.

Die meiste Energie wird bei der elektronischen Datenübertragung innerhalb von Computerchips oder zwischen Computerkomponenten verbraucht und geht als Abwärme verloren. Dies wird bei hochintegrierten Schaltkreisen mit den steigenden Datenraten immer problematischer – sowohl im Hinblick auf die technische Umsetzung der Wärmeabfuhr als auch auf den ökologisch signifikanten Gesamtenergieverbrauch der globalen IT-Infrastruktur. Prinzipiell ist die optische Datenübertragung der elektronischen überlegen, weil sich Lichtsignale z. B. über Glasfasern mit deutlich geringerem Energieverlust übertragen lassen und außerdem mit unterschiedlichen Wellenlängen viele unterschiedliche Signale parallel übertragen werden können (Multiplexing), ohne dass sie sich gegenseitig beeinflussen. Die elektronische Datenübertragung über Kabel oder Leiterbahnen ist zudem physikalisch auf Übertragungsraten von etwa 10 Gigabit pro Sekunde begrenzt. Dagegen sind die Grenzen der optischen Datenübertragung über Wellenleiter technisch noch längst nicht ausgereizt – aktuelle Laborrekorde liegen im Bereich von mehreren 10 Terabit pro Sekunde (bei Verwendung nur einer einzigen Wellenlänge). Daher ist die optische Datenübertragung

im Bereich der Telekommunikation über längere Strecken schon seit Jahrzehnten etabliert, wird zum Teil bereits in Rechenzentren zur Verbindung von Computern und Computer-Boards genutzt und ist nun Ziel der Entwicklung von Verbindungen auch zwischen oder innerhalb von Computerchips bis hin zu volloptischen Lösungen.

Betreiber von Rechenzentren und Datennetzwerken stehen außerdem vor großen Herausforderungen, die sich aus dem enormen Anstieg des Internet-Datenverkehrs ergeben. Problematisch ist dabei insbesondere die Vermittlung (Switching bzw. Routing) von optisch übertragenen Daten, die heute in der Regel mit elektronischen Komponenten erfolgt, wozu die optischen Signale zunächst in elektrische und dann wieder in optische Signale umgewandelt werden müssen. In volloptischen Netzwerken basierend auf volloptischen Switches wären solche Signalumwandlungen nicht nötig und dadurch deutlich höhere Datenübertragungsraten bei geringerem Energieverbrauch erreichbar.

Bei der Entwicklung volloptischer Switches und anderer aktiver Komponenten ist man jedoch mit zwei Besonderheiten von Photonen gegenüber Elektronen konfrontiert. Zum einen besitzen Elektronen eine elektrische Ladung, wodurch sie direkt miteinander wechselwirken und einfach manipuliert werden können, was grundlegend für die Signalverarbeitung und -vermittlung ist. Photonen hingegen sind ungeladen und können nicht direkt miteinander wechselwirken, sondern nur unter bestimmten Bedingungen innerhalb von geeigneten Medien. Dies macht volloptische Prozessoren und Switches vergleichsweise schwer realisierbar. Die zweite angesprochene Besonderheit besteht darin, dass es sich bei Lichtsignalen um elektromagnetische Wellen handelt, die sich als solche nicht ohne Weiteres beliebig lange zwischenspeichern lassen. Dies wiederum erschwert die technische Realisierung eines volloptischen Pendants zu elektronischen Arbeits- und Zwischenspeichern.

Für den Umgang mit optischen Signalen werden verschiedene physikalische Effekte genutzt. Eine wichtige Rolle spielen dabei nichtlineare optische Effekte, mit denen sich Licht auf unterschiedliche Arten manipulieren lässt. Beispiele hierfür sind Umwandlungen von Wellenlängen zum Multiplexing oder optisch induzierte Änderungen des Brechungsindex zur Umlenkung von Lichtsignalen. Die dabei stattfindende Wechselwirkung der Lichtwellen ist deutlich schwächer als die Wechselwirkung elektrischer Signale, weswegen hohe Lichtintensitäten benötigt werden. Aus diesem Grund sind optische Resonatoren eine wichtige Komponente von volloptischen Schaltkreisen – in ihnen wird einfallendes Licht gewissermaßen eingeschlossen, wodurch sich hohe Intensitäten aufbauen können. Beispiele für weitere

benötigte photonische Komponenten sind Lichtquellen, Modulatoren, Wellenleiter, Strahlteiler, Filter, optische Verstärker, Photodetektoren, Interferometer etc.

Optische Verbindungen über immer kürzere Strecken bis hinunter auf Chipebene wurden bereits demonstriert, sind jedoch im Vergleich zu heute üblichen elektronischen Verbindungen noch deutlich teurer und damit in dieser Hinsicht auf längere Sicht nicht konkurrenzfähig. Auch die Realisierung wirklich volloptischer Switches scheint auf absehbare Zeit nicht umsetzbar zu sein, was u.a. darauf zurückzuführen ist, dass bei der Vermittlung von Signalen in Netzwerken Daten auch immer verarbeitet und zwischengespeichert werden müssen, was sich bisher nur elektronisch umsetzen lässt. Bisher demonstrierte volloptische Prozessoren sind in ihrem Leistungsumfang auf grundlegendste Operationen beschränkt und ihre Umsetzung kann allenfalls als gelungener Machbarkeitsbeweis ohne aussichtsreiche Zukunftsperspektive betrachtet werden. Es ist eine weitverbreitete Einschätzung, dass volloptische Computer allein bestehend aus photonischen Komponenten auf absehbare Zeit nicht realisiert werden können. Jedoch ist davon auszugehen, dass in nächster Zeit zunehmend hybride optisch-elektronische Schaltkreise realisiert werden, in denen volloptische und elektronische Komponenten jeweils für die Teilaufgaben eingesetzt werden, die von ihnen am besten erfüllt werden können.

Dr. David Offenberg, September 2018

Cyber Reasoning Systems

Mit der zunehmenden Vernetzung technischer Systeme könnten mit hoher Geschwindigkeit arbeitende Abwehrmechanismen zur automatischen Beseitigung von Sicherheitslücken in Software zukünftig von erheblicher Bedeutung für deren sicheres Funktionieren sein.

Cyber-Angriffe nutzen vielfach Sicherheitslücken in Software aus, um ihre jeweiligen Ziele zu erreichen. Solche Sicherheitslücken sind dabei häufig das Ergebnis von unabsichtlichen Programmierfehlern. Cyber Reasoning Systems (CRS) sind IT-Systeme, die automatisiert, d.h. ohne menschliche Unterstützung, Sicherheitslücken in Software finden und diese anschließend beseitigen. CRS können dementsprechend als eine Form von automatisierter Cyber Defence angesehen werden. Mit der zunehmenden Vernetzung technischer Systeme könnten solche mit potenziell hoher Geschwindigkeit arbeitenden Abwehrmechanismen in Zukunft von erheblicher Bedeutung für deren sicheres Funktionieren sein. Heute befinden sich CRS allerdings im Wesentlichen noch im Forschungsstadium.

Generell nutzen Angreifer Sicherheitslücken in Software mit Hilfe eines geeigneten Programmcodes aus, eines sogenannten Exploits. In Abhängigkeit von der genauen Art der Sicherheitslücke kann mit Hilfe eines Exploits unter anderem ein System durch bestimmte Eingaben zum Absturz gebracht werden, so dass beispielsweise ein eventuell von diesem System angebotener Dienst nicht mehr verfügbar ist (Denial of Service). Außerdem können bestimmte Exploits verwendet werden, um Schadsoftware (Malicious Software = Malware) auszuführen.

CRS nutzen den Maschinencode einer Software, um auf dieser Grundlage eventuelle Sicherheitslücken zu entdecken. Software wird zwar durch einen Programmierer in Form eines sogenannten Quelltextes mit Hilfe einer geeigneten Programmiersprache erstellt. Dieser Quelltext kann allerdings durch einen Computer nicht direkt ausgeführt werden, sondern muss zuvor erst in den Maschinencode des jeweiligen Computers umgewandelt

werden. Im Gegensatz zum Quelltext ist der Maschinencode jedoch nicht oder nur schwer für Menschen lesbar. CRS verwenden den Maschinencode, da unter anderem der Quelltext typischerweise nur dem jeweiligen Hersteller, nicht aber deren Anwendern zur Verfügung steht.

Das Auffinden von Sicherheitslücken erfolgt bei CRS mit Hilfe von geeigneten Methoden der Software-Analyse. Hierbei kann allgemein zwischen statischen und dynamischen Methoden unterschieden werden. Während die statische Software-Analyse eine Software untersucht, ohne diese dabei auszuführen, betrachtet die dynamische Software-Analyse die Software bei deren Ausführung. Ein wichtiger Ansatz zum Auffinden von Sicherheitslücken ist beispielsweise das sogenannte Fuzzing. Bei dieser dynamischen Methode wird das Verhalten einer Software bei verschiedenen, teilweise zufällig gewählten, Programm-eingaben getestet, um auf diese Weise Fehler, wie z. B. Programmabstürze oder fehlerhafte Ausgaben, zu provozieren.

CRS sind generell für eine Vielzahl von IT-Systemen von großem Interesse. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der zunehmenden Verbreitung von miteinander vernetzten IT-Systemen. Diese Entwicklung kommt unter anderem im aktuellen Trend zum Internet der Dinge zum Ausdruck. Hierunter versteht man die Ausstattung von physischen Objekten mit Computertechnologie und deren, häufig drahtlose, Vernetzung untereinander. Hierzu zählen beispielsweise Objekte wie Haushaltsgeräte, am Körper getragene IT-Geräte (Wearables), medizinische Geräte, aber auch größere Objekte wie Fahrzeuge, Gebäude oder Industrieanlagen. Dies schließt auch kritische Infrastrukturen wie die Energieversorgung oder Transport und Verkehr ein.

Aktuelle Geräte dieser Art weisen jedoch vielfach Sicherheitslücken auf. Das Risiko durch diese Sicherheitslücken wird dabei noch erheblich durch die potenziell sehr große Anzahl dieser Geräte verstärkt. Beispielsweise wurden kürzlich vermutlich mehrere Millionen Geräte aus dem Bereich des Internets der Dinge durch einen Angreifer mit Malware infiziert, der diese Geräte dadurch fernsteuern und auf diese Weise für einen Denial-of-Service-Angriff missbrauchen konnte. Weitere Bedrohungen können unter anderem durch Sensoren, wie z. B. Kameras, entstehen, die häufig in derartigen Geräten enthalten sind und die beispielsweise zu Spionagezwecken missbraucht werden können. Darüber hinaus können Cyber-Angriffe auch ernsthafte physische Auswirkungen zur Folge haben. Hierzu zählt beispielsweise das Verursachen von Verkehrsunfällen oder der Ausfall der Stromversorgung.

Die potenziell große Menge und Vielfalt von Geräten im Internet der Dinge erfordert dabei einen automatisierten Ansatz für die Entdeckung von Sicherheitslücken.

Gegenwärtig erfolgt sowohl das Auffinden von Sicherheitslücken in Maschinencode als auch die notwendige Veränderung des Programmcodes zur Beseitigung der entdeckten Sicherheitslücken typischerweise noch nicht vollständig automatisiert, sondern überwiegend manuell und dementsprechend zeitaufwändig durch geeignete IT-Sicherheitsexperten. Der aktuelle technologische Stand von CRS lässt sich gut an den Ergebnissen eines von der US-amerikanischen DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) 2016 durchgeführten Wettbewerbs, der Cyber Grand Challenge, ablesen, bei dem erstmalig CRS gegeneinander antraten. Im Anschluss an die Cyber Grand Challenge nahm das Gewinner-system noch an einem Wettbewerb mit menschlichen Gegnern teil und wurde dabei lediglich Letzter. Dies verdeutlicht, dass CRS zumindest augenblicklich entsprechenden IT-Sicherheitsexperten noch merklich unterlegen sind.

Daher ist wahrscheinlich erst langfristig mit tatsächlich praktisch einsetzbaren und mit all den derzeit angestrebten Fähigkeiten ausgestatteten CRS zu rechnen. Allerdings könnten eingeschränktere CRS wohl schon deutlich früher Bedeutung als Unterstützung von menschlichen IT-Sicherheitsexperten erlangen. Durch diesen kooperativen Ansatz lassen sich die jeweiligen Stärken von menschlichen Experten und automatisierten Systemen entsprechend kombinieren. Außerdem könnten CRS möglicherweise dazu beitragen, in Zukunft den aktuellen Mangel an Fachkräften auf dem Gebiet der Cyber Defence zu lindern. Allerdings könnten CRS zukünftig auch eine Bedrohung für die IT-Sicherheit darstellen, wenn solche Systeme offensiv zum Auffinden und Ausnutzen von Sicherheitslücken eingesetzt würden.

Dr. Klaus Ruhlig, Oktober 2018

Gradientenwerkstoffe

Der jeweilige Zeitpunkt der Verfügbarkeit von Werkstoffen aus verschiedenen, stufenlos bzw. kontinuierlich ineinander übergehenden Bestandteilen ist eng mit dem im Vergleich zu konventionellen Werkstoffen erreichbaren Kosten/Nutzen-Verhältnis verknüpft.

Gradientenwerkstoffe sind Komposite mit kontinuierlichem räumlichem Verlauf der chemischen Zusammensetzung, der Anteile einzelner Kompositbestandteile oder des strukturellen Aufbaus (z. B. Poren oder Korngröße). Mit der Variation dieser Parameter können die thermischen, mechanischen, elektrischen, optischen, magnetischen, biologischen oder auch ballistischen Eigenschaften des Werkstoffs beeinflusst werden. Von der Realisierung graderter Eigenschaftsänderungen verspricht man sich daher eine gezielte Einstellung der Materialeigenschaften innerhalb eines dreidimensionalen Werkstücks. Im Vergleich zu konventionellen Verbundwerkstoffen gibt es hier außerdem keine abrupten Strukturübergänge, die speziell bei starker mechanischer oder thermischer Belastung Schwachstellen darstellen können. Seit Beginn ihrer Erforschung Mitte der 1980er Jahre konnten bereits bestimmte Varianten von Gradientenwerkstoffen realisiert werden, bemerkenswerte Dynamik hat ihre Entwicklung aber erst in jüngerer Zeit mit den Fortschritten bei additiven Fertigungsmethoden (sog. 3D-Druck) angenommen.

Das Konzept der Gradientenwerkstoffe mit kontinuierlichen Eigenschaftsübergängen wurde in Japan geprägt, indem sie nicht nur theoretisch beschrieben, sondern als Barriere für extreme thermische Spannungen, wie sie in der Raumfahrt auftreten, herangezogen wurden. Die präzise Einstellung von dreidimensionalen Verläufen ist technisch aufwendig. Aus diesem Grund beschränkte sich damals ihre Nutzung fast ausschließlich auf gradierte Oberflächen. Global gesehen ist seit 2008 jedoch eine erhöhte universitäre Forschungsdynamik im Bereich graderter Massivwerkstoffe zu verzeichnen, die im Zusammenhang mit additiven Fertigungsmethoden steht. Von deren dynamischer Entwicklung profitieren Gradientenwerkstoffe, da hier lokal im Mikrometerbereich Ausgangsmaterialien verfestigt werden,

was sie für die Gradierung von Werkstoffen prädestiniert. Diese Verfahren kommen auch dem Wunsch entgegen, spezielle Eigenschaften in einem Werkstückvolumen an exakt der Stelle des Bedarfs zu Verfügung zu stellen.

Je nach Materialsystem werden in aktuellen Forschungsarbeiten zu Gradientenwerkstoffen vorwiegend zwei Strategien verfolgt. So können Gradienten durch eine gezielte Variation des Mischungsverhältnisses der pulverförmigen Ausgangsmaterialien während der additiven Fertigung erzielt werden. Abhängig von der Anzahl der Zuführsysteme für diese Ausgangsmaterialien, aber auch der Präzision bei ihrer Steuerung, sind unterschiedlichste Materialgradienten, wie z.B. Wolframcarbid-Partikel in einer Stahlmatrix oder Graphen in einer Polymermatrix, denkbar. Die zweite Strategie betrifft Legierungen, bei denen eine Gradierung der Mikrostruktur durch Variation der Prozessparameter erreicht werden kann. So ist beispielsweise die Härte eines Stahls oder einer Nickelbasislegierung von der erzeugten Mikrostruktur abhängig, die mit Hilfe der gewählten Leistung des zur Aufschmelzung verwendeten Lasersystems eingestellt werden kann. Darüber hinaus werden additive Fertigungsverfahren zukünftig die Möglichkeit bieten, Erkenntnisse aus der Nutzung simulationsbasierter Verfahren zur Entwicklung neuartiger Werkstoffe und zur Optimierung von Multimaterialkombinationen zeitnäher einfließen zu lassen.

Gradientenwerkstoffe können für eine Vielzahl von Herausforderungen intelligente Lösungen bieten. Der Fokus liegt vermehrt auf Strukturwerkstoffen zur Nutzung bei sehr hohen Betriebstemperaturen, z.B. in Kraftwerken. Im Bereich der Energieerzeugung könnten Gradientenwerkstoffe darüber hinaus auch für Solarzellen und thermoelektrische Generatoren eingesetzt werden. Für Plattformen ist die Nutzung von Gradientenwerkstoffen speziell dann von Interesse, wenn unsymmetrische Belastungen auf ein Bauteil ausgeübt werden. Dies tritt aufgrund der erzeugten thermischen Belastung bei mit hohen Geschwindigkeiten fliegenden Flugkörpern oder Plattformen auf, ist aber insbesondere bei ballistischen Schutzmaterialien von Relevanz. Die verbreitete Anwendung von gradierten Metall-Keramik-Werkstoffen unter dem Aspekt der ballistischen Schutzwirkung könnte als Teil von passiven Panzerungssystemen relevant werden, was jedoch mit hohen Entwicklungskosten verknüpft wäre. Da die Ausbreitung von Wellen stark von Grenzflächen beeinflusst wird, können Gradientenwerkstoffe beispielsweise auch wirkungsvoll zur Dämpfung von Schall oder Vibrationen eingesetzt werden. Ein weiterer Aspekt im Bereich der Luftfahrt und auch der Automobilindustrie stellt das Crash-Verhalten der Materialien dar. Hinsichtlich der Zustandsüberwachung von Bauteilen könnten Gradientenwerkstoffe

unabhängig von der Form des Bauteils als Grundlage für Verschleißindikatoren dienen. Das Gebiet der Kommunikation könnte ebenfalls von graduierten Werkstoffen profitieren, z. B. durch die Nutzung entsprechender Wellenleiter und Linsen in der optischen Kommunikation. Medizinprodukte könnten von einer maßgeschneiderten Anpassung an die zu erwartenden Belastungen und das umgebende Material profitieren.

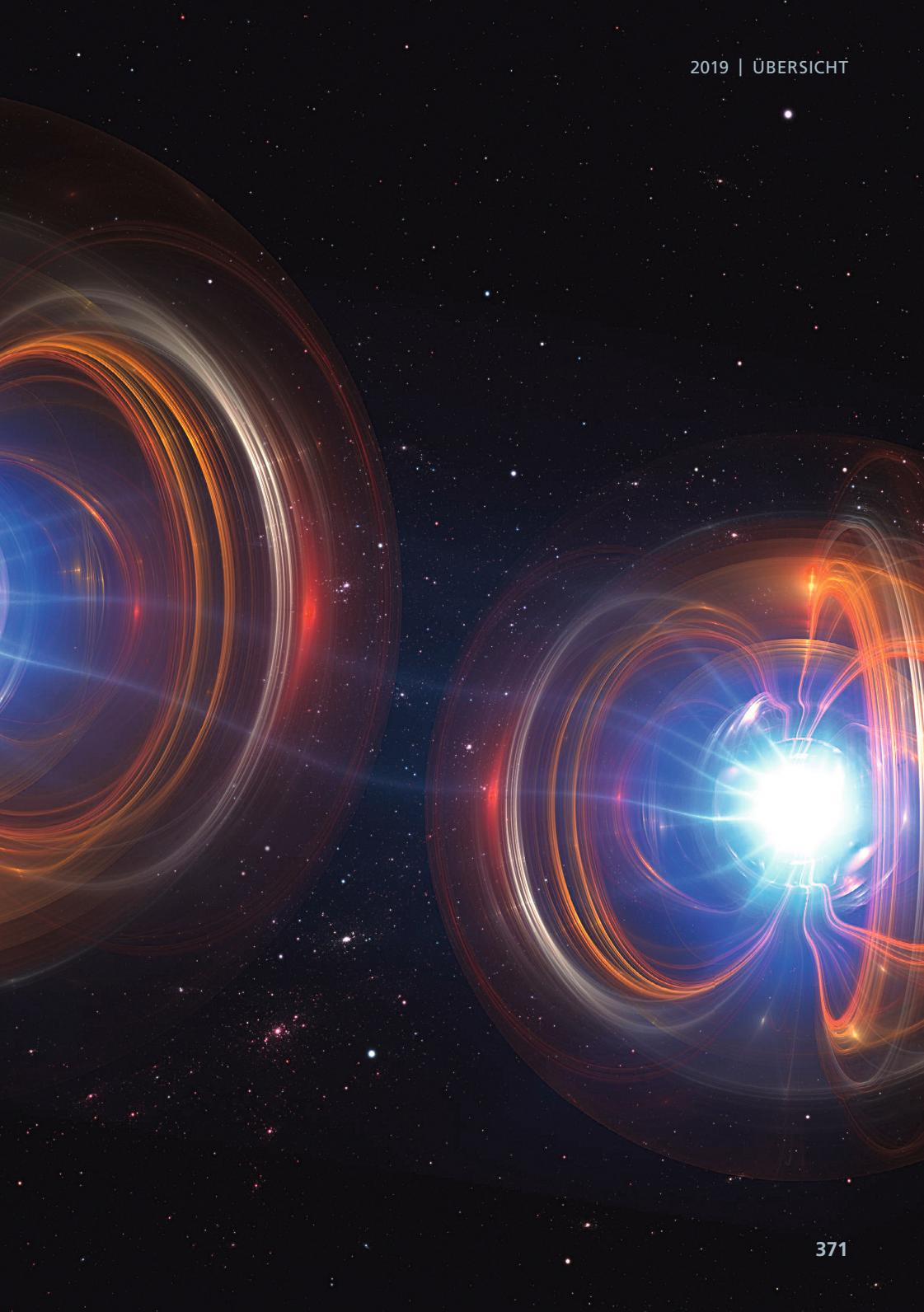
Der jeweilige Zeitpunkt der Verfügbarkeit von Bauteilen aus Gradientenwerkstoffen ist eng mit dem im Vergleich zu konventionellen Werkstoffen erreichbaren Kosten/Nutzen-Verhältnis verknüpft. Technisch machbar ist im Prinzip schon Einiges, allerdings verursacht eine Gradierung im Vergleich zu entsprechenden homogenen Werkstoffen relativ hohe Kosten, die durch Einsparungen aufgrund geringeren Wartungsaufwandes oder eingesparter teurer Bestandteile, wie z. B. von Seltenerdelementen, wettgemacht werden müssen. Auch die Qualitätskontrolle, die eine verlässliche Zuordnung von Ort, physikalischen Parametern und korrelierter Eigenschaft sicherstellen muss, erzeugt einen erhöhten Aufwand. Für eine Vielzahl neuer Konzepte im Bereich der Werkstoffentwicklung, die unter dem Materials-by-Design-Ansatz zusammengefasst werden, sind Gradienten in Werkstoffen jedoch von grundlegender Bedeutung. Dabei werden die strukturellen Merkmale eines Werkstoffs von einer gewünschten Funktionalität und Anwendung ausgehend gezielt entworfen, also genau umgekehrt wie bei der traditionellen Vorgehensweise der evolutionären Werkstoffentwicklung.

Dr. Heike Brandt, November 2018

Beiträge aus 2019

Synthetische Biologie	372
Non-Line-of-Sight Imaging	375
Biobrennstoffzellen	378
Natural Language Processing	381
High-Speed PVD-Schichtsysteme	384
Blockchains	387
Elektrochrome Energiespeicher	390
Neue Maße für die Welt	393
Personalisierte Medizin	396
Quantenverschränkung in der Technik	399
Wärmeleitende Kunststoffe	402





Synthetische Biologie

Im Sinne einer „Gentechnik 2.0“ könnten Organismen langfristig nicht mehr nur verändert, sondern gänzlich neu erschaffen werden. Ebenso wie die Fülle damit möglicher Anwendungen kaum zu überschauen ist, so sind auch die daraus erwachsenden Risiken nur schwer abschätzbar.

Im Grenzbereich der Lebens- und Ingenieurwissenschaften hat sich in den letzten Jahren ein neues, interdisziplinäres Forschungsgebiet etabliert: Die synthetische Biologie. Sie stützt sich auf Erkenntnisse und Methoden aus Fachrichtungen wie der Molekularbiologie, Systembiologie, Biochemie, Informatik, Elektrotechnik u.a., um am Computer und im Labor biologische Systeme mit nützlichen Eigenschaften zu entwerfen und zu erzeugen. Im Sinne einer „Gentechnik 2.0“ sollen Organismen dabei langfristig nicht mehr nur verändert, sondern durch die gezielte Kombination von standardisierten Komponenten gänzlich neu erschaffen werden. Erste Erfolge der synthetischen Biologie, beispielsweise in der bio-basierten Herstellung von Kraftstoffen oder Arzneimitteln, beruhen jedoch bislang noch auf verhältnismäßig geringfügigen genetischen Modifikationen.

Von alters her hat der Mensch Kreuzungs- und Zuchtmaßnahmen eingesetzt, um Lebewesen mit nützlichen Eigenschaften hervorzubringen – beispielsweise Pflanzen mit höheren Fruchterträgen oder Tiere mit dichterem Fell. Etwa seit Beginn des letzten Jahrhunderts weiß man, dass die Ausprägung dieser sog. phänotypischen Merkmale (Fruchtertrag, Felldichte etc.) durch die genetischen Informationen im Erbgut der Lebewesen bestimmt wird. Die direkte Manipulation dieses biologischen Quellcodes eröffnet heute Wege zur kontrollierten Veränderung von Organismen, die weit über die Möglichkeiten der traditionellen Zuchtverfahren hinausgehen.

Wichtigste Grundlage dafür ist die Fähigkeit, die in Form der DNA gespeicherten Erbinformationen auszulesen. Nahm die erste vollständige Entschlüsselung einer menschlichen DNA noch mehr als 10 Jahre Zeit und mehrere hundert Millionen US-Dollar in Anspruch, ermöglichen

es moderne Hochdurchsatz-Sequenzierverfahren einem stetig wachsenden Nutzerkreis, das komplette Erbgut (Genom) eines Organismus innerhalb weniger Stunden zu bestimmen. Dadurch wird eine wahre Flut an genetischen Daten generiert, deren Auswertung besondere Herausforderungen birgt. Ihnen versucht man durch offene Datenrepositorien, bioinformatische Big Data Analyseverfahren und leistungsstarke Großrechner zu begegnen. Das immer breitere Wissen darüber, welche phänotypischen Merkmale durch welche Gene codiert werden, bildet wiederum die Basis für eine zielgerichtete Veränderung des Erbgutes. Hier steht mit der Genschere CRISPR/Cas seit kurzer Zeit ein revolutionär einfaches und effektives Werkzeug zur Verfügung, um Gene selektiv ein- oder auszuschalten oder von einem Organismus in einen anderen zu kopieren (Genome Editing).

Der Dreiklang von Lesen (= Sequenzierung), Verstehen (= Annotation) und Verändern (= Modifikation) ist charakteristisch für die Anwendungen der klassischen Biotechnologie, prägt aber auch die synthetische Biologie in entscheidendem Maße. Diese geht jedoch noch einen Schritt weiter und ergänzt das Methodenspektrum um das Schreiben von neuem biologischem Quellcode. Neben dem zweckgerichteten Design gänzlich neuer Sequenzen wird die künstliche DNA-Synthese dabei auch genutzt, um bereinigte und funktionsoptimierte Versionen von natürlichen Genvorlagen zu erstellen. Eine weitere Anwendung liegt in der Erschaffung künstlicher Minimalgenome, welche lediglich die nötigsten Anweisungen für essenzielle Lebensfunktionen wie Verdauung, Wachstum und Fortpflanzung enthalten. Durch die modulare Kombination von verschiedenen genetischen Bausteinen sollen Zellen zukünftig, so die Vision, zu speziellen Regulations- und Stoffwechselprozessen befähigt werden – beispielsweise um neuartige Biomaterialien zu produzieren oder um Umweltschadstoffe wie Öl und Plastik abzubauen. Dazu erhalten die genetischen Bausteine standardisierte Schnittstellen und werden als sogenannte BioBricks in öffentlich zugänglichen Datenbanken katalogisiert.

Komplett künstlich konzipierte und konstruierte Organismen sind bislang nur von akademischer Bedeutung; ihr praktischer Nutzen bleibt vorerst dahingestellt. Grundsätzlich aber bergen Innovationen wie die computergestützte Entwicklung von BioBricks oder das Genome Editing mittels CRISPR/Cas, welche einfachere, schnellere, kostengünstigere, präzisere und umfassendere genetische Veränderungen in Aussicht stellen, riesige Potenziale für eine Vielzahl unterschiedlichster Anwendungen. So zählt die Herstellung von biobasierten Kraftstoffen, Werkstoffen und Arzneimitteln durch „lebende Miniaturfabriken“ sowohl aus ziviler wie auch aus militärischer Sicht zu den interessantesten Anwendungsfeldern

der synthetischen Biologie. Weitere Einsatzmöglichkeiten stellen die Erkennung und Bekämpfung von Keimen und Erregern durch speziell programmierte Bakterien oder die Indikation und Dekontamination von Böden und Gewässern durch entsprechende Mikroorganismen dar.

Ebenso wie die Fülle der Anwendungen nur schwer zu überschauen ist, so sind auch die aus der synthetischen Biologie erwachsenden Risiken nur schwer abschätzbar. Im Diskurs zwischen Gesellschaft, Politik und Wissenschaft offenbaren sich erwartungsgemäß starke Bedenken hinsichtlich der ökologischen und medizinischen Unbedenklichkeit von synthetischen Organismen, die letztlich Sonderformen von GVOs (Gentechnisch veränderte Organismen) darstellen. Gleichzeitig schüren die breite Verfügbarkeit und vermeintliche Einfachheit der beschriebenen Verfahren Ängste vor einem möglichen Missbrauch von synthetisch erzeugten Organismen durch entsprechend motivierte Amateure. Obgleich diese Ängste von manchen Experten als überzogen bewertet werden, empfahl der wissenschaftliche Beraterstab des Präsidenten der Obama-Administration 2016 eine Modernisierung der amerikanischen Bioabwehr-Strategie, um potenziellen Bedrohungen (z. B. durch Pathogene mit erhöhter Infektiosität) besser zu antizipieren. In Deutschland haben Institutionen wie das Büro für Technikfolgenabschätzung (TAB) oder der Deutsche Ethikrat Analyse- und Strategiepapiere erarbeitet, in denen die Aspekte Biosafety und Biosecurity beleuchtet und mögliche Gegenmaßnahmen und Schutzkonzepte entwickelt werden. In Anbetracht der Unaufhaltsamkeit des technologischen Fortschrittes erscheint ein solcher proaktiver Umgang mit den Risiken der synthetischen Biologie essenziell.

Dr. Carsten M. Heuer, Januar 2019

Non-Line-of-Sight Imaging

Systeme zum Non-Line-of-Sight Imaging sollen quasi „um die Ecke sehen“ und Objekte aufnehmen können, die sich außerhalb ihres direkten Blickfeldes befinden. Sie befinden sich aktuell noch in einem sehr frühen Forschungsstadium.

Systeme zum Non-Line-of-Sight (NLOS) Imaging sollen quasi „um die Ecke sehen“ und Objekte aufnehmen können, die sich außerhalb ihres direkten Blickfeldes befinden. Ihre technische Realisierung könnte insbesondere auf der computergestützten Auswertung von Streulicht basieren. Sie werden erforscht, weil man sich von ihnen in vielen Anwendungsbereichen ganz neue Möglichkeiten erwartet, vom autonomen Fahren bis hin zur militärischen Aufklärung.

Die Besonderheit der hier betrachteten Ansätze des NLOS Imaging besteht darin, dass sie auf mehrfach diffus gestreutem Licht beruhen. Dabei wird das hinter einem Hindernis verborgene Objekt indirekt mit Lichtpulsen beleuchtet, die dazu auf eine Fläche (Wand, Boden, Zimmerdecke etc.) neben dem Objekt gerichtet werden. Ein Teil des Lichts wird von dieser Fläche in Richtung des Objekts gestreut, von dem es wiederum über die Fläche zurück durch weitere Streuungen zu einem speziellen Detektor neben der Lichtquelle gelangt. Mit einer konventionellen Abbildungsoptik kann aus diesem Streulicht kein Bild des Objekts erzeugt werden. Allerdings trägt auch diffus gestreutes Licht Informationen über die Form von mit ihm wechselwirkenden Objekten und die Geometrie ihrer Umgebung. Zudem ist der Informationsgehalt prinzipiell umso höher, je häufiger das Licht auf seinem Weg von der Lichtquelle bis zum Detektor gestreut worden ist.

Um diese Informationen extrahieren und daraus schließlich Bilder des verborgenen Objekts rekonstruieren zu können, muss der zeitliche Ablauf der Lichtausbreitung präzise analysiert werden. Zur Beleuchtung werden daher oft Ultrakurzpulsaser verwendet, die extrem kurze Lichtpulse mit einer Dauer im Bereich von Billiardsteln einer Sekunde (Femtosekunden)

liefern. Die nach Aussendung eines Lichtpulses nacheinander am Detektor über unterschiedliche Wege eintreffenden Lichtreflexe werden dann mit hoher Zeitauflösung detektiert, um ihre jeweiligen Laufzeiten zu messen. Die Detektoren müssen dabei nicht nur schnell, sondern auch sehr empfindlich sein, weil die Intensität der Lichtreflexe aufgrund der mehrfachen diffusen Streuung um mehrere Größenordnungen geringer ist als die des ursprünglich ausgesandten Lichtpulses. Aus den so gewonnenen Daten gilt es dann, mit geeigneten mathematischen Verfahren und entsprechenden Computeralgorithmen die benötigten räumlichen Informationen herauszufiltern. Die meisten bisher demonstrierten Ansätze basieren dabei auf Verfahren der sogenannten Rückprojektion, die in ähnlicher Form auch in der Computertomographie zum Einsatz kommen. Dabei wird jeder detektierte Lichtreflex u.a. anhand seiner Laufzeit zurückgeführt auf eine Gruppe von Raumpunkten, an denen die Lichtstreuungen potenziell stattgefunden haben könnten. Die Auswertung einer großen Anzahl an Lichtreflexen kann als eine Art Abstimmung unter diesen potenziellen Punkten aufgefasst werden, bei der die Punkte mit den meisten Zuordnungen schließlich als Oberfläche und somit Rekonstruktion der darzustellenden Objekte aufgefasst werden.

Zukünftige NLOS-Imaging-Systeme könnten in einer Vielzahl von Anwendungen zum Einsatz kommen, in denen eine Bildgebung mit direkter Sichtlinie unzureichend, technisch unmöglich oder gefährlich ist. Im Automobilbereich könnten sie in Fahrerassistenzsystemen zur Kollisionsvermeidung eingesetzt werden, indem sie z.B. vor Kreuzungen oder Ausfahrten für den Fahrer noch nicht sichtbare querende Verkehrsteilnehmer detektieren. Weitere Anwendungsmöglichkeiten fänden sich beispielsweise in der industriellen Qualitätssicherung in Hinblick auf eine optische Inspektion von Bauteilen mit verborgenen Oberflächen oder im Rahmen von sicherheitstechnischen Prüfungen wie der Inspektion von Flugzeugtriebwerken – hierbei wäre sogar eine Bildgebung im laufenden Betrieb vorstellbar. Ebenfalls vorstellbar wäre ein Einsatz bei Erkundungsmissionen, wie z.B. von Schiffswracks oder Meereshöhlen. In einem aktuellen Projekt der NASA wird NLOS Imaging als Möglichkeit zur Untersuchung von Höhlen auf dem Mond von einem Satelliten aus untersucht. Ein weiteres Anwendungsfeld für NLOS Imaging stellt die medizinische Bildgebung dar, wo endoskopische Anwendungen denkbar wären, bei denen im Körper um Hindernisse oder in schwer einsehbare Bereiche geschaut wird. Im militärischen Kontext könnten NLOS-Imaging-Systeme zu einer Erweiterung des Lagebewusstseins genutzt werden. Zweifelsfrei würde die Fähigkeit, um die Ecke sehen zu können, einen enormen taktischen Vorteil in vielen militärischen Einsatzszenarien darstellen. So könnten beispielsweise bei Einsätzen im urbanen Bereich mögliche Angreifer entdeckt werden, die sich

außerhalb der Sichtlinie hinter Häuserecken, Mauern, Fahrzeugen usw. verstecken. Denkbar wäre es auch, Personen in Innenräumen zu detektieren, z. B. von der Straße aus durch höherliegende Fensteröffnungen oder innerhalb von Gebäuden aus der Deckung neben geöffneten Türen.

NLOS Imaging befindet sich aktuell noch in einem sehr frühen Forschungsstadium, in dem die prinzipielle Machbarkeit experimentell demonstriert worden ist. Die Auflösung der Rekonstruktionen von Objekten außerhalb der Sichtlinie ist in der Regel sehr gering, ihre Darstellung oft eher schemenhaft. In vielen demonstrierten Fällen können Objekte zwar detektiert, anhand der Rekonstruktion aber nicht eindeutig identifiziert werden. Eine brauchbare Rekonstruktion gewöhnlicher Räume mit mehreren Objekten, bewegten Personen oder unterschiedlichen Oberflächen ist derzeit technisch völlig unmöglich und erscheint allenfalls sehr langfristig realisierbar. Was das tatsächlich mögliche Potenzial von NLOS Imaging betrifft, herrscht z. B. noch Unklarheit darüber, welcher Detailierungsgrad sich bei der Rekonstruktion verborgener Objekte maximal erreichen lässt oder ob Objekte auch über mehr als eine streuende Fläche (also um mehrere Ecken hinweg) brauchbar rekonstruiert werden könnten. Systeme zur Kollisionsvermeidung im Automobilbereich erscheinen dagegen mittelfristig realisierbar, weil hier eine bloße Detektion von verborgenen Objekten ausreicht. Gleiches gilt für Systeme, mit denen sich die Bewegung eines Objekts außerhalb der Sichtlinie verfolgen ließe.

Dr. David Offenberg, Februar 2019

Biobrennstoffzellen

Die Entwicklung von Brennstoffzellen, welche die chemische Energie eines vor Ort ohnehin vorhandenen natürlichen Substrats in direkt nutzbare elektrische Energie umwandeln, könnte in Zukunft auch zu Kleinstrobotern führen, die sich von natürlichen Ressourcen quasi „ernähren“.

Das übergeordnete Prinzip des Energy Harvesting umfasst alle Ansätze, technische Geräte allein durch Nutzbarmachung der in der jeweiligen Umgebung vorhandenen Energie autark zu betreiben. Eine mögliche Technologie in diesem Zusammenhang ist die der sog. Biobrennstoffzellen, welche die chemische Energie eines vor Ort ohnehin vorhandenen natürlichen Substrats in direkt nutzbare elektrische Energie umwandeln können und nicht auf die Zufuhr externer „Brennstoffe“ angewiesen sind. Je nach Typ des dazu verwendeten Katalysators sind verschiedene Varianten von Biobrennstoffzellen möglich, die sich in unterschiedlichen Forschungs- und Entwicklungsstadien befinden. Anwendungsmöglichkeiten werden z.B. bei der Energieversorgung medizinischer Implantate oder bei energieautarken verteilten Sensorsystemen gesehen.

Die Technologie der Brennstoffzellen ist bereits seit über 150 Jahren bekannt und inzwischen auch in verschiedenen Versionen für den praktischen Einsatz realisiert. Wie Batterien sind sie aus zwei Elektroden mit einem dazwischen liegenden Elektrolyten aufgebaut. 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 vorteilhafte Eigenschaften. So vermeidet die direkte Umwandlung von chemischer in elektrische Energie 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. Bei den Biobrennstoffzellen kommt als weiterer Vorteil die Unabhängigkeit von gesondert zuzuführenden externen Brennstoffen hinzu, weil sie in der Umgebung vorhandene Biobrennstoffe wie z.B. Glukose umsetzen. Je nach dem für die Aktivierung der benötigten chemischen Reaktionen eingesetzten Katalysatortyp unterscheidet man zwischen abiotischen, enzymatischen und mikrobiellen Biobrennstoffzellen.

In abiotischen Biobrennstoffzellen werden wie in den bekannten konventionellen Wasserstoff-Brennstoffzellen abiotische Katalysatoren wie Platin oder andere Edelmetalle verwendet. Ihre Lebensdauer ist theoretisch unbegrenzt, weil sie während des Betriebs oder der möglicherweise notwendigen Sterilisation tolerant sind gegenüber Bedingungen wie extremem pH-Werten oder hohen Temperaturen. Abiotische Biobrennstoffzellen sind aus technischer Sicht schon seit längerem realisierbar. Allerdings ist die Verwendung von Edelmetallen mit hohen Kosten verbunden. Außerdem können komplexere organische Stoffe wie z.B. Glukose bisher nur bei relativ geringen Reaktionsraten und somit niedrigen Leistungsdichten umgesetzt werden.

Höhere Leistungen der Biobrennstoffzellen sind durch Einsatz natürlicher Katalysatoren, also von Enzymen, möglich. Im Vergleich zu abiotischen Katalysatoren ermöglichen diese eine deutlich höhere Reaktionskinetik komplexer organischer Moleküle. Dann spricht man von enzymatischen Biobrennstoffzellen. Enzyme sind wesentlich leichter verfügbar als z.B. Platin und haben außerdem eine hohe katalytische Selektivität, fördern also sehr gezielt nur die genau gewünschten chemischen Reaktionen. Dies ist besonders wichtig, wenn der biologische Brennstoff nur in Verbindung mit Sauerstoff auftritt oder anderweitig verunreinigt ist. Allerdings denaturieren Enzyme mit der Zeit und verlieren dann ihre katalytische Aktivität. Die Verlängerung der Lebensdauer steht deshalb im Fokus der aktuellen Forschungsanstrengungen zur Nutzbarmachung enzymatischer Biobrennstoffzellen. Ansatzpunkte liegen bei der Stabilisierung der Enzyme durch Immobilisierung z.B. mit Polymeren, bei der gentechnischen Optimierung der Enzymstruktur und bei der kontinuierlichen Nachlieferung frischen Enzyms an die Elektrode. Signifikante Fortschritte hat es gerade in letzter Zeit beim Schutz der Enzyme durch Einbettung in bestimmte Polymere gegeben. Auch die Elektronenleitung zwischen Enzymen und Elektroden ist eine grundlegende Herausforderung bei enzymatischen bioelektrochemischen Systemen.

Bis zum prototypischen Einsatz zur Stromerzeugung aus organischem Material in Klärwerken haben es inzwischen die sog. mikrobiellen Biobrennstoffzellen gebracht. Diese nutzen das gesamte enzymatische System lebender Mikroorganismen als Katalysator. Sie umgehen so die geringe Lebensdauer der Enzyme, weil Mikroorganismen über Fähigkeiten zur Selbstregeneration verfügen. Der gleichzeitige Einsatz verschiedener Mikroorganismen ermöglicht zudem die Nutzbarmachung komplexer „Brennstoff“-Gemische, wie sie insbesondere in Abwassern auftreten. Ein Nachteil in Bezug auf die erzielbare Ausbeute ist die Tatsache, dass lebende Mikroorganismen naturgemäß den Teil des Brennstoffs, den sie für ihren eigenen Stoffwechsel benötigen, dem Stromerzeugungsprozess entziehen.

Wesentliche Triebfeder für die Erforschung und Entwicklung von Biobrennstoffzellen ist ihr großes Anwendungspotenzial. Besonders interessant wären z. B. implantierbare Glukosebrennstoffzellen auf abiotischer Basis. Für den klinischen Einsatz z. B. zur Stromversorgung von Herzschrittmachern muss allerdings insbesondere die Langzeit-Biokompatibilität erst noch sichergestellt werden. Umgekehrt könnte natürlich ein Gerät, dessen Stromerzeugungsrate von der vorhandenen Glukose-Konzentration abhängt, im Prinzip auch zur Messung dieser Konzentration eingesetzt werden. Ziel wäre hier die Realisierung eines energieautarken implantierbaren Systems zum kontinuierlichen Monitoring des Blutzuckerspiegels. Aber auch in nicht-medizinischen Anwendungen könnten Biobrennstoffzellen in Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Die Überlegungen hier reichen von der Stromversorgung z. B. unter Wasser verteilter Sensornetze bis hin zur Realisierung von Kleinstrobotern, die sich von natürlichen Ressourcen quasi „ernähren“ können.

Jürgen Kohlhoff, März 2019

Natural Language Processing

Die Nutzbarmachung auf natürlicher Sprache basierender Mensch-Maschine-Interaktion ist eine immer entscheidendere Voraussetzung für die weitere Verbreitung computerbasierter Unterstützungssysteme in den verschiedensten Bereichen unseres täglichen Lebens.

Natural Language Processing (NLP) beschreibt computergestützte Techniken zur maschinellen Erkennung und Verarbeitung von natürlicher Sprache. Das Ziel ist dabei, die direkte Kommunikation zwischen Mensch und Computer auf der Basis natürlicher Sprache zu ermöglichen, die zwischenmenschliche Kommunikation durch maschinelle Übersetzung zu erleichtern und auch die enorm zunehmenden Mengen an Texten in natürlicher Sprache maschinell analysieren zu können. NLP verwendet hierfür Ergebnisse der Sprachwissenschaften sowie Methoden und Techniken der Künstlichen Intelligenz, speziell aus dem Bereich maschinelles Lernen und dem Unterbereich Deep Learning. In Kombination mit den stark gestiegenen Computerleistungen lassen besonders die aktuellen Fortschritte in den zuletzt genannten Technologiegebieten erwarten, dass im bereits seit längerem etablierten Forschungsgebiet NLP in naher Zukunft mit entscheidenden Fortschritten zu rechnen ist.

Für die Verarbeitung von natürlichen Texten müssen moderne NLP-Algorithmen eine Reihe von Aufgaben erfüllen. In einem ersten Schritt müssen sie den Text in einzelne Sätze und anschließend in einzelne Wörter unterteilen. Falls wie im Deutschen oder Englischen Satz- und Leerzeichen zwischen einzelnen Wörtern verwendet werden, ist das relativ einfach. Etwas komplexer ist der nächste Schritt, in dem man den einzelnen Wörtern Wortarten (z. B. Nomen) zuordnet (part-of-speech tagging). Bei den heute verwendeten Verfahren unterscheidet man hierbei zwischen überwachtem und unüberwachtem maschinellen Lernen. Bei dem überwachten maschinellen Lernen „lernt“ der Computer mit Hilfe von zahlreichen verfügbaren annotierten Texten. Gerade für Sprachen, für die wenig annotiertes Textmaterial zur Verfügung steht, bietet sich die Methode des unüberwachten maschinellen Lernens an. Hierbei erkennt der Algorithmus die Muster im Sprachgebrauch selber und definiert eigene

Wortarten-Kategorien. Man konnte zeigen, dass diese Wortarten den manuell erstellten Wortarten erstaunlich ähnlich sind. Weitere wichtige Analyseschritte in dem Zusammenhang sind die Erkennung der Grundform des Wortes (z. B. sieht – sehen) sowie die Erkennung von Eigennamen.

Eine besonders komplexe Aufgabe für NLP-Systeme ist die Syntaxanalyse (parsing), um die grammatische Struktur der Sätze zu verstehen. Wichtige Analysemodelle sind hierbei das dependency parsing, bei dem man die Beziehung der Wörter untereinander beschreibt (z. B. das Subjekt des zugehörigen Verbs) und das constituency parsing, bei dem man den Satz als Baumdiagramm aus verschiedenen Satzteilen darstellt (z. B. die Nominalphrase „der weiße Hase“). Dieser Bereich wird immer noch aktiv erforscht, so wurden in den letzten Jahren auch deep-learning-Ansätze auf der Basis von künstlichen neuronalen Netzen entwickelt.

Ein Spezialbereich des NLP ist die Sentiment-Analyse, in der Texte automatisiert bezüglich der positiven oder negativen Einstellung und emotionalen Haltung des Autors analysiert werden. Die Analyse erfolgt entweder statistisch durch Definition von positiven oder negativen Signalwörtern oder mit Hilfe des maschinellen Lernens durch Trainieren der Software anhand von Beispieltexten mit bekannter emotionaler Haltung. Verwendet wird die Sentiment-Analyse z. B. zur Analyse von Produktbewertungen oder auch zur Analyse der Stimmung an der Börse.

Auch gesprochene Sprache kann von den NLP-Systemen analysiert werden. In dem Fall wird der gesprochene Text in Clips im Millisekunden-Bereich aufgeteilt und auf vorhandene Phoneme hin untersucht. Die Erkennung der gesprochenen Sprache ist eine wichtige Basis für die chatbots, die heute bereits im Kundenservice oder den Smart-Home-Geräten eingesetzt werden. Besonders in den asiatischen Ländern haben sich auch social chatbots schnell verbreitet, die in erster Linie ein virtueller Freund sein sollen, die zuhören, Emotionen erkennen und darauf eingehen können. Herausragende Bedeutung erlangt die Erkennung gesprochener Sprache zunehmend im Zusammenhang mit der Sprachsteuerung von technischen Systemen durch den Menschen.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit für NLP bietet sich für den Wissenschaftsbereich an. Hier wächst die Anzahl der Publikationen in vielen Bereichen exponentiell, so dass man hier auf NLP-Systeme hofft, die diese Informationen zusammenfassen, wichtige Fakten heraus-

stellen und erste Hypothesen aufstellen können. Ein anderer Bereich, in dem die Anzahl der vorhandenen Texte rasant wächst, sind die sozialen Medien. Hier nutzen NLP-Systeme die vorhandenen Daten, um Stimmungen in der Bevölkerung zu erkennen oder in Notfallsituationen den Einsatzkräften Informationen über die aktuelle Lage zur Verfügung zu stellen. Allerdings gibt es gerade im Bereich social media mining auch wachsende Bedenken z.B. bzgl. des Datenschutzes. Eine wichtige Anwendung von NLP Systemen sind auch die Übersetzungsprogramme, die in den letzten Jahren deutlich besser geworden sind.

NLP-Systeme gelten als einer der kompliziertesten Bereiche der Informatik, was daran liegt, dass die natürliche Sprache komplex und mehrdeutig ist und häufig Kontextinformationen notwendig sind, um einen Satz verstehen zu können. Eine besondere Herausforderung stellt dabei z.B. Ironie dar. Gleichzeitig ist die Nutzbarmachung auf natürlicher Sprache basierender Mensch-Maschine-Interaktion eine immer entscheidendere Voraussetzung für die weitere Verbreitung computerbasierter Unterstützungssysteme in den verschiedensten Bereichen unseres täglichen Lebens, weil alle anderen Steuerungsmechanismen als zu kompliziert erscheinen bzw. zu große Aufmerksamkeit verlangen würden. Auch das erklärt die enormen Forschungsanstrengungen, die auf diesem Gebiet inzwischen unternommen werden. Weitere Anwendungsbereiche, denen für die nächsten Jahre beschleunigte Zuwachsrate für NLP-Systeme voraussagt werden, sind z. B. maschinelle Übersetzung, Frage-Antwort-Systeme (wie chatbots), Sentiment-Analyse oder automatisierte Zusammenfassungen. Vielversprechend ist hierbei insbesondere die Kombination von NLP mit Technologien aus den Bereichen big data und machine learning.

Dr. Sonja Grigoleit, April 2019

High-Speed PVD-Schichtsysteme

Steigende Anforderungen an die Langlebigkeit von Arbeits- und Kraftmaschinen bringen klassische Beschichtungssysteme zum Erosionsschutz zunehmend an ihre Grenzen.

Physical Vapour Deposition (PVD)-Verfahren sind Dünnschichttechnologien, bei denen das Beschichtungsmaterial mittels physikalischer Verfahren (z. B. durch Beschuss mit Elektronen) in die Gasphase überführt und anschließend auf einem Substrat kondensiert wird. PVD-Schichten haben sich auf unterschiedlichsten Bauteilen z. B. in der Architektur, der Lebensmittelindustrie, der Mikroelektronik und auf Werkzeugen in der spanenden Bearbeitung bereits etabliert. Sie dienen insbesondere der Erhaltung wirkungsgradoptimaler Konturen und der Erhöhung der Lebensdauer zum Schutz vor Erosion im Bereich stationärer und rotierender Komponenten wie z. B. in Flugtriebwerken oder bei Pumpensystemen. Denn vor allem der Einfluss der Erosion von Komponenten und kompletten Maschinen in Form von Materialabtrag stellt einen hohen Kostenfaktor und einen erheblichen Ressourcenverbrauch dar. Allerdings stößt der Einsatz klassischer PVD-Schichtsysteme als Erosionsschutz heute an seine Grenzen. Erforscht wird deshalb die neue High-Speed PVD-Technologie (HS-PVD), charakterisiert durch eine essentiell höhere Abscheiderate verbunden mit der Realisierung dickerer und damit widerstandsfähigerer Schichten.

Die Erosion geht mit einem Materialabtrag einher. Dabei wird der Materialabtrag meistens durch abrasive Feststoffpartikel in einer Strömung hervorgerufen. Der Effekt des Materialabtrags führt am Bauteil zu einer ungewünschten Formveränderung, zu einem Profilverlust und einer heterogenen Oberflächenrauheit. Die Erosionsbeständigkeit kann abhängig von Randbedingungen durch unterschiedliche Maßnahmen wie alternative Werkstoffkonzepte, eine Erhöhung der Bauteildicke oder eine Implementierung eines Partikelabscheiders erhöht werden. Da diese Lösungen entweder dem Bestreben nach Gewichtsminimierung oder nach Erhöhung des Wirkungsgrads des technischen Gesamtsystems entgegenlaufen, besitzt

vor allem das High-Speed PVD-Schichtsystem ein vielversprechendes Potenzial zur Erhöhung der Erosionsbeständigkeit im Einsatz.

Das PVD-Verfahren ist charakterisiert durch seine drei Phasen bis zur Schichtbildung. Dabei wird das Beschichtungsmaterial (Target) vom festen in den gasförmigen Zustand transformiert, das zerstäubte Material in Richtung des Substrats transportiert, wobei schlussendlich das gasförmige Material am Substrat kondensiert mit dem Resultat einer Schicht. Die typischen Schichtdicken liegen zwischen wenigen Nanometern bis etwa 10 µm. Die Erhöhung dieser Schichtdicke ist aufgrund der entstehenden Eigenspannungen und Zugfestigkeiten nur begrenzt möglich. Zur Entwicklung belastungsgerechter Schutzschichten für einen hohen Erosionswiderstand ist es unabdingbar, dickere Schichten > 50 µm mit Schichtwachstumsraten von bis zu 100 µm/h und einer hohen Haftfestigkeit zum Bauteil zu gewährleisten. Das sollen HS-PVD-Verfahren leisten.

Eine typische HS-PVD-Anlage ist derart aufgebaut, dass die Materialzerstäubung vom Target im Feinvakuumbereich in einem räumlich getrennten Abschnitt der Anlage unter der Strömung des Arbeitsgases Argon erfolgt. Hierbei werden die benötigten Reaktivgase wie N₂, O₂ oder C₂H₂ in die Beschichtungskammer eingeleitet. Durch diese Prozessgestaltung wird sichergestellt, dass eine Kontamination des Targets bei reaktiven Gasen, wie sie von konventionellen PVD Prozessen bekannt ist, nicht auftreten kann. Durch die gleichzeitig gepulsten Kathodenleistungen von bis zu 50 kW können Schichtwachstumsraten auf dem Substrat von bis zu 100 µm/h erzeugt werden. Während der Beschichtung können die Substrate für Hinterschneidungen und Vertiefungen komplexer Bauteile rotiert und bei Bedarf auf 1000 °C aufgeheizt werden. Durch eine gepulste Biasversorgung (negative Spannung am Substrat) kann das Schichtwachstum zusätzlich gesteuert werden. HS-PVD bietet somit das Potenzial, Beschichtungen mit Eigenschaften von gesputterten Schichten unter ökonomisch reizvollen Randbedingungen wie bei thermisch gespritzten Schichten herzustellen. Neben der Abscheidung unterschiedlicher Schichtstrukturen (z. B. einlagig (Monolayer) oder mehrlagig (Multilayer)) ist die Wahl der Werkstoffkombination ebenfalls ein wesentlicher Einflussfaktor bei der Erhöhung des Erosionswiderstands.

Einsatzgebiete von HS-PVD-Schichten werden vor allem auf besonders beanspruchten Bauteilen gesehen. So sind Komponenten in Flugtriebwerken von Militärtransportern oder in Helikopter-Gasturbinen bei militärischen Operationen je nach Einsatzgebiet Partikeln bestehend aus Eis, Fremdkörpern, Feinstaub, Sand, Salzkristallen oder auch Vulkanasche

ausgesetzt. Dabei werden Komponenten wie die Fan-, Verdichter- und Turbinenschaufeln des Gesamtsystems erosiv stark beansprucht. Eine in der Luftfahrt als TOW (Time Of Wing) deklarierte Einsatzzeit bestimmt den kompletten Austausch einer unbeschichteten Schaufel bereits nach 80 – 150 h. Durch geeignete Beschichtungen sollen diese Zeiten erheblich verlängert und in den Bereich herkömmlicher Wartungs- und Instandsetzungintervalle (mehrere 100 h) gebracht werden.

Des Weiteren sind Bauteile in Pumpen, die im Offshore-Bereich oder zur Förderung von Kalksuspensionen in Rauchgasentschwefelungsanlagen eingesetzt werden, ebenfalls der Erosion ausgesetzt. Auch hier sollen HS-PVD-Schichten verlängerte Einsatzzeiten ermöglichen und finanzielle Verluste durch Unterbrechung einer gesamten Prozesskette vermeiden.

Die Herstellung von Schichtsystemen neuer Werkstoffkombinationen mit Dicken > 50 µm mittels HS-PVD Abscheidung ist bisher nicht Stand der Technik und bringt eine neue Herausforderung mit sich. Deshalb ist ein intensiver Forschungsbedarf vorhanden, indem die notwendigen Zusammenhänge für die Synthese der HS-PVD-Schichten und die beanspruchungsgerechte Abscheidung auf das Bauteil erarbeitet werden müssen. Durch die Schließung der Lücke in der verfügbaren Kompetenz zur gezielten Innovation derartiger Erosionsschichten mittels der HS-PVD-Technologie könnten langlebige und somit ökologischer operierende Arbeits- und Kraftmaschinen bereitgestellt werden, verbunden mit der Verringerung des Verbrauchs von Energie und damit auch der Reduktion der Treibhausgasemissionen.

Dr. Baycan Yildirim, Mai 2019

Blockchains

Generell könnte sich die Blockchain-Datenbanktechnologie zukünftig auch in anderen Anwendungsfeldern als ähnlich revolutionär erweisen wie im Bereich der digitalen Währungen.

Die Blockchain-Technologie hat in letzter Zeit viel Aufmerksamkeit erregt, da sie u. a. die technologische Basis für die digitale Währung (bzw. Kryptowährung) Bitcoin bildet. Derzeit gibt es intensive Bemühungen, ihre Vorteile auch für eine zunehmende Zahl anderer Anwendungsbereiche nutzbar zu machen.

Bei einer Blockchain handelt es sich um eine Art von verteilter Datenbank (ein sog. Distributed Ledger), d. h. eine Datenbank, die nicht nur an einem einzigen Ort zentral abgelegt, sondern dezentral auf mehreren Computern in einem Netzwerk vorhanden ist. Die Datenbankeinträge sind dabei kryptografisch gegen Manipulationen geschützt, so dass der Datenbank nur neue Einträge hinzugefügt werden können, sich aber keine Einträge nachträglich modifizieren oder löschen lassen. Die Daten in der Blockchain, wie z. B. die Daten von finanziellen Transaktionen bei Bitcoin, werden in ihrer zeitlichen Reihenfolge zu einzelnen Blöcken zusammengefasst, wobei jeder Block kryptografisch mit dem vorhergehenden Block verknüpft ist, so dass sich eine zusammenhängende Kette von Blöcken ergibt.

Normalerweise ist für die Abwicklung von Transaktionen zwischen zwei Parteien, die sich nicht vollständig gegenseitig vertrauen, eine vertrauenswürdige dritte Partei notwendig, z. B. eine Bank bei finanziellen Transaktionen. Ein wichtiger Grund für das große Interesse an Blockchains ist daher, dass bei solchen Transaktionen prinzipiell keine zentrale Kontrollinstanz mehr erforderlich ist und stattdessen eine Blockchain diese Aufgabe übernehmen kann. Weiterhin bietet der verteilte, dezentralisierte Ansatz von Blockchains eine potenziell hohe Ausfallsicherheit, da bei einem Ausfall eines Netzwerk-Knotens dessen Funktion

grundsätzlich durch einen anderen Netzwerk-Knoten übernommen werden kann (Peer-To-Peer-Netzwerk).

Blockchains können im Wesentlichen in Permissionless Blockchains und Permissioned Blockchains unterteilt werden. Bei einer Permissionless Blockchain (häufig auch Public Blockchain genannt) wie Bitcoin gelten keinerlei Einschränkungen für die Netzwerk-Teilnehmer, so dass z. B. prinzipiell jeder den Inhalt der Blockchain zur Kenntnis nehmen und die Blockchain um neue Einträge in Form eines zusätzlichen Blocks erweitern kann. Bei einer Permissioned Blockchain ist der Kreis der Netzwerk-Teilnehmer hingegen eingeschränkt. Dieser Teilnehmerkreis wird üblicherweise durch eine zentrale Instanz kontrolliert, weshalb es sich hierbei nicht um einen vollständig dezentralisierten Ansatz für eine Blockchain handelt.

Blockchains unterscheiden sich außerdem bezüglich des jeweils genutzten Konsensfindungsverfahrens. Dieses Verfahren gewährleistet, dass die Netzwerk-Teilnehmer darin übereinstimmen, in welcher zeitlichen Reihenfolge und um welche neuen Einträge die Blockchain erweitert wird. Ein neuer Block wird der Blockchain daher erst dann hinzugefügt, wenn die Teilnehmer einen Konsens darüber gefunden haben, dass die neuen Einträge unter Berücksichtigung der bereits in der Blockchain enthaltenen Daten auch korrekt sind. Das aktuell am häufigsten genutzte Konsensfindungsverfahren, das auch bei Bitcoin eingesetzt wird, ist Proof of Work. Hierbei konkurrieren die Netzwerk-Teilnehmer untereinander darum, wer einen neuen Block erstellen darf, der dann der Blockchain hinzugefügt wird. Dabei gewinnt derjenige, der als erster nachgewiesen hat, eine bestimmte Menge an Computerressourcen, z. B. Rechenkapazität, für die Lösung einer gewissen Problemstellung aufgewandt zu haben. Permissioned Blockchains besitzen den Vorteil, dass sie nicht unbedingt ein so aufwändiges Konsensfindungsverfahren wie Proof of Work implementieren müssen, weil die Identitäten der Teilnehmer z. B. einer zentralen Instanz bekannt sind und sie deshalb für möglicherweise missbräuchliche Handlungen verantwortlich gemacht werden können.

Praktische Anwendungen von Blockchains sind augenblicklich im Finanzbereich am weitesten fortgeschritten. Beispielsweise sind nach dem Aufkommen von Bitcoin einige weitere Kryptowährungen entstanden. Daneben liegen weitere mögliche Einsatzgebiete für Blockchains im öffentlichen Sektor, wo sie z. B. für notarielle Dienstleistungen oder den Nachweis der Echtheit von Dokumenten Verwendung finden könnten. Außerdem bieten

sie die Chance für effizientere Lösungen auf dem Gebiet des Supply Chain Management oder in der Logistik für die Nachverfolgbarkeit des Lagerungszustandes von sensiblen Gütern. Im Energiesektor könnten es Blockchains u. a. erlauben, dass private Haushalte ihren mit Solarzellen erzeugten Strom direkt an andere Haushalte verkaufen und im Gesundheitsbereich könnten sie beispielsweise als Grundlage für eine elektronische Patientenakte genutzt werden. Von Interesse sind auch Online-Dienste auf der Basis von Blockchains, z. B. für soziale Netzwerke wie Facebook. Hierdurch könnte beispielsweise eine Zensur von Informationen überflüssig gemacht werden. Im Bereich der IT-Sicherheit sind Blockchains u. a. zur Erkennung von Angriffen auf Computer bzw. Netzwerke geeignet.

Die Blockchain-Technologie befindet sich insgesamt noch in einem relativ frühen Entwicklungsstadium. So existieren augenblicklich deutlich mehr Visionen und Konzepte für den Einsatz von Blockchains als real existierende, funktionierende Anwendungsbeispiele. Eine wichtige aktuelle Herausforderung stellt der hohe Energieverbrauch des bei Permissionless Blockchains wie Bitcoin häufig eingesetzten Proof-of-Work-Verfahrens dar, der durch den hierfür erforderlichen Rechenaufwand verursacht wird. Eine weitere Herausforderung ist die Skalierbarkeit der Blockchain-Technologie, d. h. in welchem Maße die Technologie bei steigenden Anforderungen, z. B. einer steigenden Anzahl von Transaktionen, mitwachsen kann. Generell könnte sich die Blockchain-Technologie zukünftig auch in anderen Anwendungsfeldern als ähnlich revolutionär erweisen wie im Bereich der digitalen Währungen. Allerdings ist in einigen Anwendungsfällen wahrscheinlich gar keine Blockchain erforderlich, sondern ein Einsatz von herkömmlichen Datenbank-Technologien sinnvoller.

Dr. Klaus Ruhlig, Juni 2019

Elektrochrome Energiespeicher

Die gleichzeitige Speicherung elektrischer Energie in elektrochromen Bauteilen ist noch ein sehr junges Konzept und befindet sich überwiegend im Forschungsstadium.

Elektrochrome Bauteile wie zum Beispiel Fenster mit elektrisch einstellbarer Transparenz bzw. Abdunkelung sind wieder aufladbaren Batterien und elektrochemischen Kondensatoren (sog. Superkondensatoren) in Bezug auf Konstruktions- und Funktionsprinzip, Reaktionskinetik und Werkstoffeigenschaften der Bauteile sehr ähnlich. Diese prinzipiellen Ähnlichkeiten haben in den letzten Jahren zu Überlegungen geführt, ob und wie man elektrochrome Bauteile zusätzlich als Energiespeicher nutzen kann. Die sog. elektrochrome Energiespeicherung ist damit noch ein sehr junges Konzept und befindet sich überwiegend im Forschungsstadium.

Wieder aufladbare Batterien und Superkondensatoren gehören zu den vielversprechendsten Speichertechnologien sowohl im Bereich Elektromobilität als auch in der stationären Zwischenspeicherung elektrischer Energie aus alternativen Energiequellen. Sie unterscheiden sich allerdings derzeit noch erheblich in Bezug auf Ladezeiten und speicherbare Energiedichten pro Volumen. Batterien können sehr hohe Energiedichten erreichen, aber aktuell nur mäßige Stromdichten und damit Ladezeiten, bei Superkondensatoren verhält es sich genau anders herum.

Elektrochrome Bauteile sind mehrlagige Konstruktionen. Sie bestehen aus einer aktiven elektrochromen Elektrode, einer Elektrolytlage, einer Gegenelektrode, zwei flächigen transparenten Leiterbahnen jeweils außen auf den Elektroden sowie der mechanischen Trägerstruktur aus Glas oder Kunststoff. Dieser Aufbau entspricht im Prinzip dem einer wieder aufladbaren Dünnschicht-Batterie, hier allerdings mit dem Zusatznutzen, dass sich deren jeweiliger Ladezustand durch die Farbgebung ausdrücken würde. Beim klassischen

elektrochromen Bauteil wird die Wahl des Elektrodenmaterials jedoch natürlich nicht von den Energiespeichereigenschaften, sondern von dessen Fähigkeit zur reversiblen Farbänderung geleitet.

Superkondensatoren nutzen derzeit zwei unterschiedliche Speicherprinzipien für elektrische Energie. Das eine Prinzip, die statische Speicherung in einer Doppelschichtkapazität, nutzt den Aufbau von Nanometer-dünnen Doppelschichten durch Ladungstrennung direkt im Bereich der Oberfläche der Elektroden. Durch Bauweisen im Nanometerbereich, z.B. unter Nutzung von Aerogel-, Nanoröhrchen- oder Graphen-Elektroden, kann die nutzbare Elektrodenoberfläche in Bezug auf das Gesamtvolumen so stark erhöht werden, dass anwendungstechnisch interessante Energiedichten resultieren.

Das zweite Prinzip ist die elektrochemische Speicherung in einer sog. Pseudokapazität. Kombiniert man die beiden Speicherprinzipien Doppelschicht- und Pseudokapazität geschickt, kann diese Eigenschaftskombination vermutlich weiter optimiert werden.

Vorstehend beschriebene Ähnlichkeiten waren der Ausgangspunkt für Untersuchungen, elektrochrome Verglasungen – beispielsweise solche moderner energieeffizienter Bürogebäude („Intelligente Fenster“, „Smart Privacy Glas“) – oder andere elektrochrome Bauteile wie z.B. neuartige Flachbildschirme zusätzlich als Energiespeicher auszulegen. Genauso wird umgekehrt untersucht, ob und wo elektrische Speichermedien mit dem Zusatznutzen elektrisch induzierter Farbänderung sinnvoll sein können – beispielsweise bei der Visualisierung des Ladezustandes bzw. der verfügbaren Restenergie. Um die beiden Aspekte Elektrochromie und elektrische Energiespeicherung künftig sinnvoll in einem Bauteil zu integrieren, werden derzeit drei Werkstoffgruppen als Elektrodenmaterial untersucht: Metalloxide, leitfähige Polymere und anorganische Nichtoxide.

Bei den Metalloxiden unterscheidet man zwischen „kathodischer“ und „anodischer“ Elektrochromie. Bei ersterer führt die Einlagerung von Ionen, bei letzterer die Abgabe von Ionen zu Farbänderungen. Das bekannteste Metalloxid in Bezug auf kathodische Elektrochromie ist Wolframoxid (WO_3). Kürzlich konnte gezeigt werden, dass sehr dünne Wolframoxid-Schichten auch als pseudokapazitiver Superkondensator funktionieren. Seither wird intensiv an der Entwicklung elektrochromer Energiespeicher auf Basis von WO_3 gearbeitet.

Anodische Elektrochromie zeigen die relativ kostengünstigen Werkstoffe Nickeloxid (NiO) und Manganoxid (MnO_2). Bei beiden können sowohl elektrochrome als auch superkapazitive Eigenschaften massiv verbessert werden, wenn sie in sehr dünnen Schichten auf ein Trägermaterial aufgebracht werden. Zusätzlich kann die Elektrochromie bei NiO durch Sauerstoffüberschuss in der Verbindung verstärkt werden. Einen Sonderfall stellt Vanadium-pentoxid (V_2O_5) dar, denn es kombiniert kathodische und anodische Elektrochromie. In dünnen nanostrukturierten Schichten kann es außerdem äußerst schnell Li-Ionen einlagern, was es zusätzlich als ideales Elektrodenmaterial für Superkondensatoren erscheinen lässt. Erste Laborversuche verliefen sehr erfolgreich.

Leitfähige Polymere können sowohl in Richtung Elektrochromie als auch in Richtung Energiespeicherung maßgeschneidert werden. Gute kombinierte Eigenschaften zeigen verschiedene Polyaniline und Polypyrole. Vor wenigen Jahren wurde über geordnete Arrays aus Polyanilin-Nanodrähten als Elektrodenmaterial berichtet, die im Labormaßstab erfolgreich als elektrochrome Energiespeicher in Fenstern getestet wurden. Bei bestimmten Polypyrolen wurden in Kombination mit Gold und WO_3 erstmals elektrochrome Energiespeicher mit nennenswerten Eigenschaften realisiert.

Bei den anorganischen Nichtoxiden stechen derzeit der Farbstoff Preußischblau und die Kohlenstoffmodifikation Graphen hervor. Beide Substanzen befinden sich in Bezug auf elektrochrome Energiespeicherung im frühen Forschungsstadium. Da Graphen seit einigen Jahren mit immensem Forschungsaufwand bzgl. unterschiedlichster Fragestellungen untersucht wird, könnten sich hier in absehbarer Zeit interessante Möglichkeiten für die Kombination von Elektrochromie und elektrischer Energiespeicherung eröffnen.

Stefan Reschke, Juli 2019

Neue Maße für die Welt

Die jüngst erfolgte, wesentliche Überarbeitung des Internationalen Systems der sog. SI-Einheiten wird auch Auswirkungen auf die Entwicklung neuer Technologien haben, selbst wenn diese im Einzelnen derzeit gar nicht absehbar sind.

Im Mai diesen Jahres wurde eine wesentliche Überarbeitung des Internationalen Einheitenystems (SI: Système International d'unités) in Kraft gesetzt. Ab jetzt werden alle Einheiten letztlich auf Naturkonstanten zurückgeführt und damit von der technischen Realisierung gramm als international anerkanntes Grundmaß für die Masse quasi „in Rente geschickt“. Diese Reform des SI wird sich auch auf zukünftige Entwicklungen neuer Technologien auswirken.

Messen ist ein Alltagsprozess, den man oft als nahezu selbstverständlich wahrnimmt. Auf der anderen Seite ist er von grundlegender Bedeutung für den Handel, das Ingenieurswesen, praktisch alle Industriezweige, die Medizin und natürlich auch die Wissenschaften selbst. In einer stark vernetzten Welt ist es unabdingbar, dass überall und zu jedem Zeitpunkt Klarheit darüber herrscht, wie und in welchen Einheiten man etwas misst. Andernfalls können sich Ereignisse wie der Absturz des Mars Climate Orbiters beim Anflug auf die Marsoberfläche wiederholen. Dieser kam zustande, weil ein Teil des Systems das internationale Einheitensystem SI nutzte, während ein anderer, unabhängig davon entwickelter, angloamerikanische Maßeinheiten benutzte.

Das Internationale Einheitensystem SI definiert insgesamt 7 sogenannte Basiseinheiten, namentlich die Sekunde, das Meter, das Kilogramm, das Kelvin (als Maß für die Temperatur), das Ampere (als Maß für die Stromstärke), das Mol (als Maß für die Stoffmenge) sowie das Candela (als Maß für die Lichtstärke). Am 20. Mai diesen Jahres wurden einige Maßeinheiten – Mol, Kelvin, Ampere und Kilogramm – neu definiert, was erst auf Grund der wissenschaftlichen und technologischen Fortschritte der letzten Jahrzehnte möglich war.

Mit dieser Neudefinition sind nun sämtliche Basiseinheiten über die Werte fundamentaler Naturkonstanten definiert. Die Verknüpfung mit makroskopischen Objekten, wie bis zum Schluss das Urkilogramm, oder die Bezugnahme auf spezifische Materialeigenschaften (Triple-Punkt des Wassers) für die Definition der Temperaturskala, sind damit endgültig obsolet geworden. Man kann sagen, dass die Metrologie, die Wissenschaft des Messens, sich damit vom direkten Bezug auf den Menschen und seine Wahrnehmung emanzipiert.

Die Neudefinition des Kilogramms wurde nötig, weil man festgestellt hatte, dass sich die exakte Masse des Urkilogramms sowie seiner Kopien im Laufe der Zeit immer stärker unterschieden. Erschwerend kommt hinzu, dass man nicht feststellen kann, ob die Kopien an Gewicht zugelegt haben oder ob das Original leichter geworden ist. Die neue Definition verknüpft das Kilogramm von nun an mit dem Planckschen Wirkungsquantum, einer fundamentalen Naturkonstanten, welche für die Beschreibung quantenmechanischer Prozesse benötigt wird. Deren Wert wird durch die Neudefinition fest vorgegeben und erlaubt zusammen mit der Definition der Einheiten für Zeit und Länge die Bestimmung von Massen. Hierfür können zwei verschiedene Ansätze gewählt werden.

Das ist zum einen die sogenannte Watt- oder Kibble-Waage. Diese beruht auf zwei unterschiedlichen Messungen. Zunächst wird eine Masse mittels des Magnetfeldes einer stromdurchflossenen Spule im Gleichgewicht gehalten. Anschließend bewegt sich diese Spule mit konstanter Geschwindigkeit durch ein Magnetfeld und induziert dadurch eine Spannung, die ebenfalls gemessen werden kann. Mittels dieser beiden Messungen lässt sich die Masse bestimmen, da die benötigten Naturkonstanten, einschließlich der Planck-Konstante, alle bekannt sind. Ein alternativer Ansatz nutzt neben der Planck- noch die Avogadro-Konstante, welche die Anzahl der Atome in einer bestimmten Stoffmenge angibt. Kennt man diese und bestimmt über eine Kristallstrukturanalyse mittels Röntgenstrahlen und Laserinterferometrie die Anzahl der Atome in einer (nahezu) perfekten Kugel aus hochreinem Silizium, so kann man daraus deren Masse berechnen.

Insgesamt führt die Reform des SI also dazu, dass die Definitionen von Messgrößen nun exakt und mit keinem Fehler mehr behaftet sind. Ein weiterer Vorteil der Definition der Basiseinheiten über Naturkonstanten ist, dass diese allgemein verfügbar sind und man sich nicht mehr auf ein Artefakt beziehen muss, welches weder stabil noch leicht zu reproduzieren ist. Ein zentraler Vorteil der Neudefinition schließlich ist, dass man damit künftig auch andere Messmethoden und -verfahren entwickeln kann. Dies ist vor allem

dann von Interesse, wenn man besonders kleine Massen im Bereich von einigen Milligramm messen möchte. Mittels der alten Definition war zunächst ein sehr aufwändiges und fehlerbehaftetes Vorgehen nötig, um ausgehend vom Urkilogramm kleinere Massen messbar zu machen. Nun ist dies einfach über miniaturisierte Versionen der Kibble-Waage möglich. An diesen wird bereits gearbeitet, beispielsweise bei der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Braunschweig, welche das nationale Metrologieinstitut in Deutschland ist. Auf diese Weise wird es künftig möglich sein, auch kleinste Massen mit sehr großer Genauigkeit zu messen. Dies wird sich beispielsweise auf den pharmazeutischen Bereich auswirken, wo es um die Messung kleiner Massen mit möglichst großer Genauigkeit geht. So ist die zu erwartende Präzision der Massebestimmung für den Bereich der sogenannten personalisierten Medizin von Interesse. Hier werden Medikamente gezielt an Hand des genetischen Profils eines Patienten dosiert, wofür es extrem genauer Messungen bedarf.

Schließlich wird man Kibble Waagen künftig auch für die Messung anderer physikalischer Größen einsetzen können. Insbesondere die exakte Messung auch sehr kleiner Kräfte wird hiermit möglich sein. Diese und ähnliche aus der Reform des SI resultierenden erweiterten technischen Möglichkeiten werden Auswirkungen auf die Entwicklung neuer Technologien haben, auch wenn diese im Einzelnen derzeit gar nicht absehbar sind.

Dr. Marcus John, September 2019

Personalisierte Medizin

Methodisch grenzen sich auf den einzelnen Patienten maßgeschneiderte bzw. optimal angepasste medizinische Therapien deutlich von dem bisher verfolgten Ansatz einer „One-size-fits-all“-Gesundheitsversorgung ab.

Besonders weit reichende Innovationen entstehen oft an den Schnittstellen verschiedener, sich auch einzeln besonders dynamisch entwickelnder Technologiegebiete. Ein aktuelles Beispiel ist das Zusammenwirken von Fortschritten auf Gebieten wie Gentechnik, molekulare Diagnostik bzw. Sensorik, Big Data und Künstliche Intelligenz, das verbunden mit dem wachsenden Verständnis der Entstehung von Krankheiten zunehmend auf den einzelnen Patienten maßgeschneiderte bzw. optimal angepasste medizinische Therapien ermöglicht. Solche Behandlungskonzepte der sog. personalisierten Medizin (auch individualisierte Medizin oder Präzisionsmedizin) tragen dem in den letzten Jahren entstandenen Bewusstsein Rechnung, dass unsere Gesundheit und der Verlauf möglicher Krankheiten stark von individuellen Faktoren beeinflusst werden. Insbesondere genetisch bedingte Prädispositionen, aber auch Aspekte der Lebensführung (z. B. Sport, Ernährung, Genussmittelkonsum), Umwelteinflüsse, Geschlecht und Alter spielen dabei eine wichtige Rolle.

Eine zentrale Voraussetzung für den Einsatz individualisierter Therapien ist die Erfassung und Auswertung von sogenannten Biomarkern. Biomarker sind objektiv messbare biologische Merkmale wie etwa Blutdruck, Blutzuckerspiegel, Cholesterinwert, der Body-Mass-Index oder Daten aus bildgebenden Verfahren. Durch den technologischen Fortschritt in den molekulargenetischen und bioinformatischen Analysemethoden wurden in den letzten Jahrzehnten viele neue Biomarker (z. B. bestimmte Genvarianten, Proteinmodifikationen oder Stoffwechselprodukte) beschrieben, die für die personalisierte Medizin von besonderer Bedeutung sind. Die detaillierte Auswertung verschiedener Biomarker-Daten ermöglicht es, die Patienten unter therapeutischen Kriterien verschiedenen Gruppen mit gemeinsamen biologischen Merkmalen zuzuordnen. Methodisch grenzt sich die personalisierte Medizin

damit deutlich von dem bisher verfolgten Ansatz einer „One-size-fits-all“-Gesundheitsversorgung ab.

Eine wichtige Grundlage für die personalisierte Medizin bilden fundierte Kenntnisse über Gene bzw. Genmutationen, die einzeln oder in Kombination für die Entstehung von Krankheiten verantwortlich sind. Indem sie individuelle Erbinformationen zur frühzeitigen Identifikation von genetischen Risikofaktoren nutzt, geht die personalisierte Medizin über die reine Diagnose von Krankheiten hinaus und macht es möglich, noch vor einer Erkrankung gezielte Maßnahmen zur Prävention zu ergreifen.

Auf der anderen Seite haben Gene nach bereits erfolgter Erkrankung auch einen Einfluss darauf, ob und wie ein Medikament bei einem Patienten wirkt – diese Zusammenhänge stehen im Fokus des Forschungsgebietes der Pharmakogenomik. So kommt z.B. das Gen für ein bestimmtes Cytochrom – ein Protein, das eine Schlüsselrolle beim Abbau und der Ausscheidung zahlreicher Arzneimittel-Wirkstoffe spielt – in der Bevölkerung in verschiedenen Varianten vor. Einige dieser Varianten führen dazu, dass das Protein nicht oder nicht funktionsfähig gebildet wird. Bei Patienten, die Träger einer solchen Variante sind, bleiben die Wirkstoffe lange im Körper, bevor sie wieder ausgeschieden werden. Dadurch summieren sich die Wirkstoffmengen aus mehreren Medikamenteneinnahmen im Körper, was zu gravierenden Nebenwirkungen führen kann. Auf der anderen Seite gibt es Patienten, die besonders viele Cytochrom-Proteine bilden, wodurch der Wirkstoff besonders schnell abgebaut wird und eine normale Medikamentendosis nur geringe bis gar keine Wirkung erzielen kann. Patienten, die über entsprechende Gen-Varianten verfügen, würden ein anderes Medikament verschrieben bekommen. So nutzt die personalisierte Medizin Erkenntnisse aus der Pharmakogenomik, um effektive Behandlungspläne zu erstellen und um unerwünschte Nebenwirkungen zu vermeiden bzw. zu vermindern.

Am weitesten fortgeschritten sind die Anwendungen der personalisierten Medizin bislang in der Krebstherapie. Typischerweise sind bei verschiedenen Patienten mit der gleichen Krebsart im Tumorgewebe unterschiedliche Mutationen zu finden, wobei die spezifische Art der Mutation entscheidend dafür ist, ob ein bestimmtes Therapeutikum wirksam ist oder nicht. So ist z.B. bei ca. 20 % der Brustkrebspatientinnen die Anzahl der Wachstumsfaktorrezeptoren HER2 auf der Oberfläche der Brustkrebszellen signifikant erhöht, was dazu führt, dass die Zellen mit Wachstumssignalen überflutet werden und sich unkontrolliert teilen. Nur diese Patientinnen werden mit dem Antikörper Herceptin behandelt, der an

den Rezeptor bindet und ihn dadurch blockiert. So können die Wachstumsfaktoren nicht mehr an den Rezeptor andocken und das Wachstum der Tumorzellen wird gehemmt. Mit Hilfe eines Gentests an einer Gewebeprobe des Tumors kann ermittelt werden, ob eine Veränderung der HER2-Rezeptoren vorliegt.

Auch in anderen Bereichen, z. B. in der Behandlung von Autoimmunerkrankungen wie Rheuma oder Multipler Sklerose oder bei der Behandlung von HIV-Patienten, kommt die personalisierte Medizin bereits heute zur Anwendung. Dabei ist stets die Voraussetzung, dass man das genetische Profil einer Krankheit, also die für die Krankheit und die Therapie relevanten Gene, kennt.

Neben den angesprochenen therapeutischen Fortschritten stellt die personalisierte Medizin auch eine Steigerung der Kosteneffizienz des Gesundheitswesens in Aussicht, indem sie Therapien zum einen wirksamer und schonender macht und zum anderen vorbeugende Maßnahmen ermöglicht, die oftmals weniger aufwendig sind als die Behandlung bereits erkrankter Menschen.

Allerdings werden auch nichtmedizinische und nichtökonomische Aspekte entscheidend für die weitere Entwicklung von Methoden der personalisierten Medizin sein, denn diese werfen auch grundlegende ethische, rechtliche und soziale Fragen auf. Sie reichen von der Anonymisierung von Gesundheitsdaten, dem Recht auf Nichtwissen, ob man die Veranlagung für eine bestimmte Krankheit hat, bis hin zu den Verantwortlichkeiten bei der Datenbearbeitung. Hier gibt es einen zunehmenden Regelungsbedarf, der mit der technologischen Entwicklung Hand in Hand gehen muss.

Dr. Britta Pinzger, Oktober 2019

Quantenverschränkung in der Technik

Quantenverschränkung als zentraler und gleichzeitig „geheimnisvollster“ Aspekt der Quantenmechanik gehört zu den wesentlichen Phänomenen, die bei sog. Quantentechnologien ausgenutzt werden und ist damit eine wichtige Grundlage vieler neuer Technologie-Konzepte und -Entwicklungen.

Die Quantenmechanik beschreibt unsere Welt auf den kleinsten Skalen und bei den niedrigsten Energien, d. h. auf der Ebene von Atomen und Teilchen. Die Quantenverschränkung ist ihr zentraler und gleichzeitig „geheimnisvollster“ Aspekt. Sie gehört zu den wesentlichen Phänomenen, die bei sog. Quantentechnologien ausgenutzt werden und ist damit eine wichtige Grundlage vieler neuer Technologie-Konzepte und -Entwicklungen, welche in ihrer Gesamtheit oft unter dem Begriff Quantenrevolution 2.0 zusammengefasst werden. Bereits in absehbarer Zeit ist hier mit einer zunehmenden Zahl praktischer Anwendungen zu rechnen.

Bei Quantenverschränkung handelt es sich um eine fundamentale und vor allem instantane „Verbindung“ zwischen Quantenobjekten, die u. a. dann auftritt, wenn zwei Teilchen miteinander wechselwirken: Diese tragen dann das „Wissen“ um Ihre „Begegnung“ bis zur nächsten Wechselwirkung quasi weiterhin in sich.

Untereinander verschränkte Teilchen können somit prinzipiell nicht mehr einzeln, sondern nur als Gesamtsystem beschrieben werden, auch wenn sie sehr weit voneinander entfernt sind.

Auf der Quantenverschränkung aufbauende Anwendungen lassen sich in zwei große Gruppen einteilen, die Quanteninformationstechnologien (z. B. Quantencomputer, Quantenkryptographie, Quantennetzwerke) und die Quantensensoren (z. B. Quantenbildgebung).

Die gegenwärtig weltweit erforschten, aber noch nicht praktikablen **Quantencomputer** nutzen gerade die Quantenverschränkung, um bei bestimmten Berechnungen (für die ein entsprechender Quantenalgorithmus existieren muss) gegenüber klassischen Computern eine zum Teil exponentiell größere Leistungsfähigkeit zu erreichen. Diese entsteht insbesondere daraus, dass sie ihre Quantenbits (Qubits) miteinander verschränken, bevor Rechenoperationen darauf ausgeführt werden, wodurch die Anzahl der Zustände, die solche sog. Quantenregister annehmen können, exponentiell steigt. Mit Quantencomputern können andere Quantensysteme wie Atome, Moleküle und Festkörper effizient simuliert werden, was zu ganz neuen Möglichkeiten in der Entwicklung neuer Materialien führen könnte. Außerdem könnten sie Big-Data- und insbesondere KI-Anwendungen erheblich beschleunigen. Andererseits kann ein universeller Quantencomputer jedoch bestimmte gebräuchliche Verschlüsselungssysteme brechen, wie die im Internet verwendeten Public-Key-Verfahren, die u. a. auf dem Aufwand zur Faktorisierung großer Primzahlen beruhen, was jedoch mit Quantencomputern effizient möglich wird.

Für einen nützlichen universellen Quantencomputer braucht man je nach auszuführendem Quantenalgorithmus mindestens einige 1000 perfekte Qubits. Quantenverschränkung ist jedoch eine extrem flüchtige und kurzlebige Eigenschaft, gegen deren raschen Zerfall schon bei kleinsten Störungen aus der Umgebung aufwendige Quantenfehlerkorrekturverfahren angewendet werden müssen, die wiederum viele zusätzliche Hilfs-Qubits benötigen, um Fehler bei den zur Berechnung benutzen Qubits zu erkennen und rückgängig zu machen. Daher nimmt man an, dass mindestens etwa eine Million solcher imperfekten, physikalischen Qubits nötig sind. Mit nutzbaren universellen Quantencomputern ist somit wohl erst mittel- bis langfristig, d. h. frühestens in etwa 15 Jahren zu rechnen.

Die **Quantenkryptographie** nutzt quantenmechanische Effekte für neuartige Verschlüsselungssysteme, die aus physikalischen Gründen zumindest in der Theorie „unknackbar“ sind. Als Grundlage dienen sog. Einmalschlüssel. Bei deren Anwendung ergibt sich jedoch das Problem, dass sie erst einmal sicher zwischen den Kommunikationspartnern ausgetauscht werden müssen. Hier kommt die Quantenverschränkung ins Spiel: Beim sog. Quantenschlüsselaustausch wird ausgenutzt, dass man mit einem geeigneten Verfahren beim Übertragen von verschränkten Quantenzuständen prinzipiell erkennen kann, wie viele Qubits auf ihrem Weg zum Empfänger von Dritten mitgelesen wurden. Ist diese Menge nicht zu groß, so kann anschließend die Information, die der Angreifer potenziell über den ausgetauschten

Schlüssel hat, beliebig klein gemacht werden. Während kleinere Netzwerke zum optischen Quantenschlüsselaustausch über Glasfaserkabel in einigen Ländern schon im Betrieb sind, ist ein echtes **Quantennetzwerk**, das z. B. Quantencomputer an verschiedenen Orten miteinander verschränken und damit verbinden kann, noch Zukunftsmusik. In ca. fünf Jahren könnte immerhin mit einer ersten Demonstration des Prinzips mit mindestens drei Knoten über 50 – 100 km Entfernung gerechnet werden.

Bei den verschiedenen Verfahren der Quantenbildgebung wird ganz allgemein die Quantenverschränkung zwischen Photonen als zusätzliche „Ressource“ genutzt, um verschiedene Eigenschaften klassischer optischer Abbildungen zu verbessern. So soll es z. B. mit sog. quantenlithographischen Verfahren möglich werden, Halbleiterstrukturen für Computerchips zu fertigen, die viel kleiner sind als die Wellenlänge des zur Belichtung verwendeten Lichts. Bei Verfahren wie der Quantenbeleuchtung werden typischerweise durch nichtlineare optische Prozesse erzeugte verschrankte Photonenpaare genutzt, wobei die einzelnen Photonen eines Paares sehr unterschiedliche Wellenlängen haben können. So kann die Beleuchtung des Objekts durch Photonen einer Wellenlänge (z. B. im Ferninfraroten) und die Bildaufnahme durch die mit ihnen verschrankten Photonen einer anderen Wellenlänge (z. B. im Sichtbaren) erfolgen, wenn für letztere bessere Detektoren bzw. Bildsensoren existieren. Objekte können so auch vor starkem Hintergrundrauschen und vor allem mit sehr geringer Beleuchtungsstärke abgebildet werden, weil selektiv nur solche Photonen detektiert werden, die tatsächlich vom Objekt zurückgestreut wurden. Militärisch ist dieses Prinzip vor allem beim Konzept des sog. Quantenradars angedacht.

Zurzeit werden verschiedene Verfahren der Quantenbildgebung weiterentwickelt. Gleichzeitig wird intensiv nach praktischen Einsatzmöglichkeiten gesucht. Mit ersten Anwendungen, z. B. in der Medizintechnik, ist kurz- bis mittelfristig zu rechnen.

Dr. Oliver Gabel, November 2019

Wärmeleitende Kunststoffe

Obgleich in den letzten Jahren bereits große Fortschritte im Bereich wärmeleitfähiger Kunststoffe gemacht wurden, besteht immer noch ein großer Forschungsbedarf bis zur breiten Einsatzbereitschaft der Materialien.

Kunststoffe besitzen im Allgemeinen Eigenschaften, die sie zu einer sehr vielseitigen und interessanten Werkstoffklasse machen, wie ein geringes Gewicht, günstige Herstellungs- und Verarbeitungsmöglichkeiten, gute Chemikalienbeständigkeit und ein breites Einsatzspektrum. Darüber hinaus sind Kunststoffe klassischerweise gute thermische Isolatoren, wovon im Alltag auch immer wieder Gebrauch gemacht wird – von Styroporkaffeebechern bis hin zu Leistungspolymeren für das Bauwesen oder den Automobilbau. Gerade vor dem Hintergrund der weiteren Miniaturisierung elektrischer Systeme wäre es aber von Vorteil, wenn bestimmte, z.B. für Elektronikbauteile eingesetzte Kunststoffe auch wärmeleitende Eigenschaften aufweisen würden. Das erklärt die seit einigen Jahren beständig zunehmende Forschung auf diesem Gebiet, wobei sowohl mit geeigneten Füllstoffen versehene als auch intrinsisch wärmeleitfähige Kunststoffe, die ohne Füllstoffe auskommen, von Interesse sind.

Inzwischen konnte das Verständnis für die der Wärmeleitung zu Grunde liegenden Mechanismen bereits deutlich verbessert werden. Die isolierenden Eigenschaften werden vor allem durch den Aufbau, die räumliche Anordnung und die Orientierung der sogenannten amorphen Bereiche in einem Polymer bestimmt. Sehr vereinfacht dargestellt sind das Bereiche, in denen viele der einzelnen Polymerketten als zufällige Knäule vorliegen – ähnlich gekochten Spaghetti. Diese verhindern, dass Wärme innerhalb der Kunststoffe frei fließen kann. Gleichzeitig liegen einige Polymerketten auch immer in kristalliner Form vor, also in geordneten, linearen Strukturabschnitten. Form und Orientierung der kristallinen Bereiche innerhalb der Polymere sowie etwaige zusätzlich eingebrachte Füllstoffe bestimmen die Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffs. Bei Kunststoffen ohne Füllstoffe steigt die Wärmeleitfähigkeit mit der Anzahl an kristallinen Polymerbereichen. Zur Steigerung dieses kristallinen

Anteils gibt es verschiedene Möglichkeiten. Beispielsweise können amorphe Polymerketten durch bestimmte Produktionsverfahren relativ gleichmäßig parallel ausgerichtet werden, was zu deutlichen Verbesserungen des Wärmetransports führen kann. Allerdings sind die genauen Zusammenhänge zwischen dieser Streckung der Polymerketten und der Wärmeleitfähigkeit immer noch nicht gut verstanden, weshalb hier auch weiterhin Forschungsbedarf besteht. Hilfreich sind dabei beispielsweise Computersimulationen, welche die Abhängigkeit der makroskopischen Eigenschaften vom inneren geometrischen Aufbau der Kunststoffe darstellen können.

Solche Simulationen sind insbesondere auch dann von Interesse, wenn Kunststoffe mit Füllstoffen, wie Metall-, Keramik- oder Kohlenstoffnanopartikeln, betrachtet werden. Wichtige Parameter, die die Eigenschaften des Kompositmaterials bestimmen, sind neben der oben beschriebenen Anordnung der Polymere insbesondere die Menge an eingebrachten Partikeln, ihre Form, Größe, Zusammensetzung und Oberfläche sowie ihre Fähigkeit, untereinander ein wärmeleitendes Netzwerk ausbilden zu können. Je mehr Partikel in den Kunststoff eingebracht werden, desto eher kann sich ein solches Netzwerk ausbilden. Allerdings wird die Produktions- und Formbarkeit des Materials mit steigender Füllstoffmenge erschwert. Zudem bestimmt die Oberfläche der Partikel auch mit, wie groß der Widerstand der Wärmeleitung zwischen einem Polymer und den darin enthaltenen Füllstoffpartikeln ist. Mit den Füllstoffen kann neben der Wärmeleitfähigkeit auch eine elektrische Leitfähigkeit eingestellt werden. Füllstoffe wie Graphit, Metallpartikel, Kohlenstoffnarröhrchen oder Graphen können eingesetzt werden, wenn das Material auch elektrisch leitend sein darf oder sein soll, während Füllstoffe wie Aluminiumoxid, Bor- oder Aluminiumnitrid die Wärmeleitung unterstützen, aber elektrisch isolierend wirken. Auch Kombinationen von verschiedenen Füllstoffen, wie z. B. Glaskügelchen mit Nitrid- oder Kohlenstoffpartikeln, konnten bereits umgesetzt werden. Hierbei diente das Glas der Verstärkung des Materials, während der andere Füllstoff die Wärmeleitfähigkeit verbesserte. Es wurden auch erste Kombinationen unterschiedlicher wärmeleitender Füllstoffe untersucht, wobei synergistische Effekte beobachtet werden konnten.

Neben den bereits angesprochenen Anwendungen zur Wärmeabfuhr in Elektronikbausteinen können wärmeleitende Kunststoffe beispielsweise auch allgemein als Wärmetauscher oder im Bereich der Energieindustrie eingesetzt werden. Aus militärischer Sicht kommen sie zudem für thermoregulierende Textilien und zur Verbesserung von mit Explosivstoffen gefüllten Polymerkompositen in Frage. Für die genannten Einsatzbereiche sind dabei sowohl

Kunststoffe von Interesse, die gleichzeitig elektrischen Strom und Wärme leiten können, als auch solche, die bei gleichzeitiger elektrischer Isolation nur zur Wärmeleitung in der Lage sind.

Obgleich in den letzten Jahren bereits große Fortschritte im Bereich wärmeleitfähiger Kunststoffe gemacht wurden, besteht immer noch ein großer Forschungsbedarf bis zur breiten Einsatzbereitschaft der Materialien. Beispielsweise konnte die Verbesserung der Leitfähigkeit von ungefüllten Kunststoffen durch die Streckung von Polymerketten bisher nur im Laborexperiment gezeigt werden. Für partikelgefüllte Kunststoffe besteht zudem noch großer Forschungsbedarf in Bezug auf die Herstellung, so dass die Füllstoffe gleichmäßig im Kunststoff verteilt sind und effektive Netzwerke ausbilden können. Des Weiteren besteht auch noch Forschungspotenzial darin, die genannten Ansätze der intrinsischen und der durch Füllstoffe bedingten Wärmeleitfähigkeit effektiv miteinander zu verbinden. Auch beim Einsatz von gemischten Füllstoffen besteht noch großer Forschungsbedarf im Hinblick auf die Effektivität und weitere synergistische Kombinationen. Wärmeleitende Kunststoffe besitzen damit sowohl ein großes Forschungspotenzial als auch einen weiten potenziellen Anwendungsbereich, weshalb bereits in absehbarer Zukunft mit weiteren Fortschritten auf diesem Gebiet zu rechnen ist.

Dr. Diana Freudendahl, Dezember 2019

Beiträge aus 2020

On-Orbit Servicing	408
Multi-Domain UxS	411
DNA-Datenspeicher	414
Predictive Maintenance	417
Lidar-on-a-Chip	420
Bioinspirierte Sensoren	423
Living Sensors	426
Adversarial Machine Learning	429
Künstliche Muskeln	432
Metalinsen	435
Maschinelles Lernen in der Werkstoffentwicklung	438

On-Orbit Servicing

Während bemannte Missionen zur Inspektion, Wartung und Nachrüstung von Raumfahrtsystemen im Orbit Stand der Technik sind, steht heute unbemanntes und hier insbesondere autonomes On-Orbit Servicing im Fokus von Forschungs- und Entwicklungsbemühungen.

Mit dem Begriff On-Orbit Servicing (OOS) werden in der Raumfahrt verschiedene Tätigkeiten bezeichnet, die im Orbit zur Inspektion, Wartung und Nachrüstung von Raumfahrtsystemen eingesetzt werden. Gerade im Hinblick auf die zunehmende Abhängigkeit verschiedenster Funktionalitäten auf der Erde von funktionierenden Satellitensystemen steigt die Bedeutung des OOS heute an. Dabei können bemannte Servicemissionen als Stand der Technik angesehen werden. Sie sind allerdings gefährlich, kostenintensiv und ihre Reichweite ist in der Praxis auf Bereiche weit unterhalb des geostationären Orbits (GEO) begrenzt. Im Fokus aktueller Forschungs- und Entwicklungsbemühungen steht daher unbemanntes und hier insbesondere autonomes (also ohne Fernsteuerung auskommendes) On-Orbit Servicing.

Während sogenannte passive Anwendungskonzepte Inspektions- und Kontrollaufgaben von Satelliten oder Raumfahrzeugen enthalten, umfassen aktive Anwendungskonzepte die Reparatur, Montage, Betankung, Nachrüstung oder Umlaufbahnanpassung dieser Raumfahrtsysteme. Das Grundprinzip des aktiven OOS besteht darin, einen Wartungssatelliten (Chaser) ausgerüstet mit robotischen Manipulatoren, die einen sogenannten Endeffektor tragen, für den Service an einem Zielobjekt/Target im Orbit einzusetzen. Um den Chaser für den Service in Arbeitsposition zu bringen, ist eine Abfolge von Flugmanövern nötig, welche als Rendezvous- und Docking-Prozess (RvD) bezeichnet werden. Die Manipulatoren werden heute so entwickelt, dass Endeffektoren ausgetauscht, mit verschiedenen Werkzeugen kombiniert und dadurch weitere Spezialaufgaben bewältigt werden können. Solche neuen Manipulatorkonzepte ermöglichen effizientere Abläufe, eine schnellere Durchführung von Einsätzen und verursachen, durch geringere Massen des Gesamtmanipulators, geringere Missionskosten. Der am Armabschluss installierte Endeffektor bestimmt die Funktion des

Manipulators. Endeffektoren können beispielsweise Steckschlüssel oder Multi-Finger-Greifer sein.

Als Zielobjekte bzw. Targets können kooperative und unkooperative Raumfahrzeuge unterschieden werden. Ein aktives kooperatives Zielobjekt kommuniziert Flugort und -lage via Kommunikationsverfahren selbstständig an den Chaser. Ein passives kooperatives Zielobjekt besitzt keine selbstständigen Kommunikationseinheiten, dafür jedoch optische Marker, anhand derer der Chaser die Flugsituation (Pose) des Zielobjektes analysieren kann.

Die hier eingesetzten Methoden eignen sich grundsätzlich auch, um die Flugsituation unkooperativer Targets zu analysieren. Diese besitzen keine Kommunikationsverbindungen bzw. keine leicht erkennbaren optischen Marker und können aufgrund physischer Schäden außerdem veränderte bzw. nicht vorhersehbare Geometrien aufweisen. Zugleich können sie sich in einer instabilen und unkontrollierten Fluglage befinden, was eine Erfassung der Flug- bzw. -Lagedaten durch den Chaser zusätzlich erschwert.

Die steigende Bedeutung des OOS ist einerseits dadurch begründet, dass bereits geringfügige Ausfälle bei Raumfahrtsystemen zu Leistungseinbußen oder sogar zu einem vollständigen Verlust der Funktionstüchtigkeit führen. Im äußersten Fall müssen diese Systeme kostenintensiv durch neue Systeme ersetzt werden. Existierende Raumfahrtsysteme verfügen zwar grundsätzlich über eine sehr hohe Zuverlässigkeit, jedoch steigt zukünftig das Risiko für Beschädigungen und damit der Bedarf für Reparaturen, insbesondere durch die zunehmende Menge an Weltraumschrott (Space Debris), weiter an. Gleichzeitig verliert eine Vielzahl dieser Systeme ihre Einsatzfähigkeit durch ihre begrenzten Treibstoffreserven. OOS soll den Austausch einzelner defekter Komponenten und die Auffüllung der Treibstoffreserven ermöglichen, um so die Einsatzdauern der Systeme zu verlängern bzw. die Notwendigkeit eines kompletten Systemaustausches zu verhindern. Darüber hinaus soll OOS die Möglichkeit bieten, Raumfahrtsysteme mit neuen Komponenten bzw. Nutzlasten nachzurüsten und dadurch eine Nutzwertsteigerung im laufenden Betrieb zu erreichen.

Andererseits sind unbemannte und autonome Servicemissionen insbesondere deshalb attraktiv, weil bemannte Missionen, trotz erfolgreich durchgeführter Einzelmissionen, weiterhin sehr gefährlich und kostenintensiv im Vergleich zu unbemannten Missionen sind. Darüber hinaus sind bemannte Missionen in ihrer Reichweite begrenzt und für Kommunikationssatelliten im GEO (35.786 km Höhe) nicht realisierbar. Zudem ist bemanntes OOS auch

aufgrund der physischen Beanspruchungen und Belastungen der Astronauten im Orbit nicht dauerhaft möglich.

OOS mit Hilfe von Manipulatoren wird grundsätzlich schon heute durchgeführt. Die Steuerung der Systeme erfolgt dabei über Teleoperation (Fernsteuerung). Autonome Systeme hingegen befinden sich derzeit noch in der Grundlagenforschung. Hier wird insbesondere an der Beherrschung von RvD-Manövern gearbeitet, die die Basis für unbemanntes und autonomes OOS stellen. Besondere Herausforderungen gibt es dabei im Hinblick auf die Kopplung des jeweiligen Manipulators mit der spezifischen Flugbewegung und -lage des Chasers, also die kinematischen und dynamischen Interdependenzen des Systems. Daher bedarf es spezifischer Komponenten (z. B. Sensoren und Algorithmen), die solche Interdependenzen sowohl erfassen und auswerten als auch in geeignete Steuerungsbefehle umsetzen. Weitere Forschungsaktivitäten betreffen beispielweise die Entwicklung von robotischen Manipulatoren oder orbitalen Betankungstechnologien. Die Forschungen umfassen insbesondere die Prüfung der Funktionstüchtigkeit einzelner OOS-Komponenten in Laborumgebungen, aber auch die Untersuchung der Funktionstüchtigkeit der OOS-Systeme in ihrer zukünftigen Betriebsumgebung, vorrangig dem GEO. Konkrete Demonstrationen von einzelnen Komponenten oder Funktionen erfolgten bislang lediglich an kooperativen Targets im Low-Earth-Orbit (LEO). Eine Realisierung des OOS im GEO wird grundsätzlich als realistisch eingeschätzt, da die für OOS erforderlichen Teiltechnologien (z. B. in den Bereichen Satellitentechnologien, Robotik, Sensorik) bereits einen hohen technologischen Reifegrade aufweisen.

Peter Sturm, Januar 2020

Multi-Domain UXs

Langfristig könnte sich die Mobilität robotischer Systeme an die vergleichbarer biologischer Systeme annähern und damit z. B. deren Fähigkeiten zum Umgang mit wechselnden Umgebungsbedingungen bzw. zur Fortbewegung in mehreren Medien adaptieren.

Systeme mit unbemannten mobilen Plattformen werden je nach Art durch Akronyme wie z.B. UGS (Unmanned Ground System) oder UAS (Unmanned Aerial System) bezeichnet oder in allgemeiner Form als UXs adressiert. Üblicherweise ist die Fortbewegung des Fahrzeugs dabei auf ein einzelnes Medium – Wasser, Land oder Luft – beschränkt. Daneben gibt es zunehmend auch Konzepte für unbemannte Fahrzeuge, die die Fähigkeit zur Fortbewegung in mehreren Medien vereinen. Von ihrer Entwicklung verspricht man sich Vorteile im Hinblick auf die Erweiterung des Einsatzbereichs und höhere Energieeffizienz. Beispiele sind UAS, deren Plattformen auch unter Wasser operieren können, oder amphibische Fahrzeuge.

Auch wenn es in der Vergangenheit bereits Ansätze gab, zum Beispiel tauchfähige Flugzeuge oder fliegende Autos zu bauen, sind aus solchen Ideen aufgrund technischer Hürden oder finanzieller Aspekte bislang keine marktfähigen Produkte entstanden, abgesehen von einzelnen Amphibienfahrzeugen oder Schreitbaggern. Unbemannte Systeme erlauben dagegen das einfache Experimentieren mit neuen Ansätzen und innerhalb der letzten Jahre sind einige Prototypen entstanden, die in mehreren Medien operieren können (hybride Konzepte). Dazu besitzen sie entweder separate Antriebselemente für jedes Medium oder einen einheitlichen Antrieb mit unterschiedlichen Betriebsweisen (multimodale Fortbewegung).

Auch können robotische Effektoren (Greifer, Arme) die Fortbewegung unterstützen. Der Übergang zwischen den Betriebsweisen kann dabei fließend sein, etwa wenn ein Bodenfahrzeug ein Gewässer durchwatet, ein Luftfahrzeug am Boden rollt, ein zweibeiniger Roboter in schwierigem Gelände zur Abstützung mitunter die Hände nutzt oder ein Micro Air Vehicle (MAV) sich mittels krallenartiger Greifer an einem Baum festklammert oder

kriechend fortbewegt. Diese verschiedenen Aspekte einer erweiterten Mobilität werden mit der Bezeichnung Multi-Domain UXs adressiert.

Man kann Multi-Domain UXs im Wesentlichen in drei Kategorien von hybriden Konzepten einteilen (Luft-Wasser, Boden-Wasser und Luft-Boden). Luft-Wasser-Konzepte profitieren von der Tatsache, dass ein Propellerantrieb sowohl in Luft als auch unter Wasser funktioniert. Hier sind bislang ausschließlich fliegende Konzepte zu finden, die durch zusätzliche Maßnahmen ertüchtigt werden, auch im Wasser zu operieren. Das beinhaltet eine druckstabile Zelle, die Kapselung elektrischer Bauteile und hydrophobe Oberflächen, um nach dem Flugstart kein Ballastgewicht durch aufgenommenes Wasser mitzuführen. Bei Boden-Wasser-Konzepten gibt es sowohl primär wasser- als auch primär landbasierte Konzepte. Das spezifische Problem dieser amphibischen Plattformen ist die Übergangszone zwischen Gewässern und Land, welche von flachen Sandstränden über dichten Pflanzenbewuchs oder Schlamm bis hin zu Steilufern und festen Wänden reicht. Die Luft-Boden-Konzepte folgen zwei unterschiedlichen Ansätzen: zum einen gibt es fahrende Transportsysteme, die durch Flugmanöver kurze Strecken oder Bodenhindernisse überwinden sollen. Zum anderen sollen fliegende Sensorsysteme durch Landung an Einsatzorten Energie für die Missionsausführung sparen bei gleichzeitigem Erhalt eines Mindestmaßes an Mobilität, etwa um schwer zugängliche bzw. schwer einsehbare Orte am Boden oder in Bauwerken kriechend zu erreichen. Zur ersten Kategorie zählen beispielweise Konzepte zu Flugautos, zur zweiten Kategorie verschiedene Konzepte von UAS mit kleineren Plattformen.

Zusätzlich zu den sonstigen Problemstellungen bei der Realisierung eines UXs im Allgemeinen bedeutet die Umsetzung zweier Fortbewegungskonzepte in einer Plattform zunächst einen konstruktiven Mehraufwand, der mit Effizienzeinbußen oder Einschränkungen einhergeht. Die spezifischen Herausforderungen liegen dementsprechend darin, den Betrieb unterschiedlicher Fortbewegungsarten unter Minimierung des Gesamtaufwands und Maximierung des Gesamtnutzens zu realisieren. Das bedeutet hinsichtlich des grundlegenden Konzepts, dass die Plattform möglichst adaptiv für mehrere Fortbewegungsarten nutzbar sein sollte, unter weitgehender Vermeidung der Dopplung funktionaler Systeme oder Strukturen. Das betrifft insbesondere die eigentliche Antriebslösung, aber auch die duale Nutzung von Komponenten für Missionsausführung und Fortbewegung. Darüber hinaus setzen sowohl der multimodale Betrieb als auch lange Standzeiten sowie missionsspezifische Kommunikationseinschränkungen für hybride Plattformen einen hohen Grad an Automatisierung voraus. Der konstruktive Mehraufwand eines Multi-Domain UXs zahlt sich dann aus, wenn

z. B. dafür der Einsatz einer zweiten Plattform entfallen kann, oder z. B. durch Wassern, Tauchen oder Anhaften die Einsatzdauern fliegender Plattformen deutlich erweitert werden oder aber z. B. der Wechsel zwischen rollender und gehender Bewegung den Einsatzbereich im gemischten Gelände erweitert.

Die derzeit am weitesten fortgeschrittenen Multi-Domain UXs sind tauchfähige MAV, welche bislang allerdings nur geringe Unterwasser-Geschwindigkeiten erreichen. Ihr kommerzieller Einsatz entwickelt sich gerade, z. B. vermarktet das Startup SubUAS den Octocopter Naviator als „first multi domain air/water drone“ für Freizeit, Industrie und Verteidigung. Der Fokus liegt zunächst auf kleinen Systemen, die als Plattformen für Sensoranwendungen dienen. Eine Grundlage dafür ist die anhaltende Entwicklung zu immer kompakteren und leistungsfähigeren mobilen IT-Geräten. Parallel dazu setzt durch das aufkommende Wissenschaftsgebiet der Biorobotik eine systematischere Forschung an Multi-Domain-spezifischen Problemstellungen ein. Die Entwicklung effizienter Bewegungsmuster profitiert dabei von Fortschritten im Bereich künstlicher Intelligenz und maschineller Lernverfahren. Langfristig könnte sich dadurch die Mobilität robotischer Systeme an die vergleichbarer biologischer Systeme annähern und damit z. B. deren Fähigkeiten zum Umgang mit wechselnden Umgebungsbedingungen adaptieren.

Dr. Guido Huppertz, Februar 2020

DNA-Datenspeicher

Technische Datenspeicher auf Basis der DNA sind vor allem für die stationäre Archivierung größer Datenmengen über lange Zeiträume hinweg geeignet. Hier sollten sie bereits mittelfristig praktikabel einsetzbar sein.

Nachdem das 20. Jahrhundert als das der Festkörperphysik mit ihren revolutionären Auswirkungen auf die Hardware von Informations- und Kommunikationssystemen galt, spricht man im Fall des 21. Jahrhunderts auch vom Jahrhundert der Lebenswissenschaften bzw. der Biologie. Auch dieser werden weitestreichende Auswirkungen auf unser tägliches Leben vorausgesagt, vom biotechnologisch erzeugten Kraftstoff über gentechnisch basierte Fortschritte z. B. in der Medizin bis hin zu neuartigen Systemen der Informations- und Kommunikationstechnik. In letzteren Bereich gehören die Bemühungen um die Realisierung von technischen Datenspeichern auf Basis der Desoxyribonukleinsäure (DNS bzw. englisch DNA), die in allen Lebewesen der Träger der Erbinformationen ist. Hier hat es in letzter Zeit bemerkenswerte Entwicklungsfortschritte gegeben. Vielleicht schon mittelfristig verspricht man sich davon die Nutzbarmachung von Informationsträgern mit höchsten Speicherdichten und besonders großen Alterungsbeständigkeiten.

Konventionelle Datenspeicher basieren typischerweise auf der Änderung physikalischer Eigenschaften von Werkstoffen. In Magnetbändern oder Festplattenlaufwerken sind dies magnetische, in DVDs oder Blu-Ray Disks optische und in normalerweise auf sog. flash-memorys basierenden USB-Sticks oder Festkörperspeichern (Solid-State-Drive, SSD) elektrische Eigenschaften.

Im Fall der DNA sind die Informationen in der Molekülstruktur gespeichert und hier in der Abfolge der vier organischen Basen Adenin, Thymin, Guanin und Cytosin (oft abgekürzt mit A, T, G und C). Die wesentlichen Forschungs- und Entwicklungsbemühungen der allgemeinen Gentechnik richten sich auf die Schaffung technischer Möglichkeiten zur

Entschlüsselung und schließlich Manipulation der hier abgelegten Codes. Sowohl bei der DNA-Sequenzierung, also quasi beim Auslesen der Informationen, als auch beim sog. Genome Editing, also dem zielgerichteten Verändern der DNA, konnten inzwischen enorme Fortschritte gemacht werden. Zur Nutzung der DNA als technischer Datenspeicher geht es nun „lediglich“ darum, einen binären Code aus Nullen und Einsen, wie er in jedem konventionellen Speichermedium abgelegt würde, umzusetzen in eine geeignete Abfolge der Nukleotide A, C, G und T und aus dieser Vorlage künstliche DNA herzustellen. Der so geschaffene Datenspeicher kann dann mit Standard-Gensequenziermaschinen wieder entzifert und schließlich mit dem eingangs genutzten Kodierungsverfahren wieder in die binären Ausgangsdaten zurückübersetzt werden. Außerdem ist es möglich, relativ schnell große Mengen von Kopien des Datenspeichers DNA herzustellen, z.B. mit Verfahren der sog. Polymerase-Kettenreaktion (polymerase chain reaction, PCR). Die DNA-Speichertechnik profitiert damit direkt von den Entwicklungen der allgemeinen Gentechnik.

Wichtige Kenngrößen von digitalen Speichermedien sind die Speicherdichte (gemessen z.B. in bytes pro Volumeneinheit), die Zeitspanne der fehlerfreien Datenhaltung (Retention bzw. Alterungsbeständigkeit), die Zugriffsgeschwindigkeit (ergibt sich aus interner Zugriffszeit und der Datenübertragungsrate) sowie der Energieverbrauch (sowohl während des Zugriffs als auch im „Ruhezustand“). Bezüglich jeder dieser Kenngrößen haben die konventionellen Speichertypen teilweise rasante Entwicklungsfortschritte hinter sich, können aber in absehbarer Zeit nicht mehr mit dem Bedarf mithalten, wenn es um die Archivierung größer Datenmengen über lange Zeiträume hinweg geht. Vor allem ihre Alterungsbeständigkeit macht hier Probleme.

Gegenwärtige Speichermedien haben allenfalls Alterungsbeständigkeiten von wenigen Jahrzehnten, und auch das nur, wenn die sich weiterentwickelnde Informationstechnik dauerhaft Schnittstellen (und die nötige Software) für ihre Nutzung bereitstellt. Bis heute werden für die Archivierung häufig Magnetbänder eingesetzt, die allerdings regelmäßig aufgefrischt werden müssen. Der molekulare Speicher DNA dagegen ist bei geeigneter Lagerung (kühl und lichtgeschützt) nahezu beliebig lange haltbar, wie z.B. die erfolgreiche Untersuchung der DNA in Neandertalerknochen gezeigt hat. Außerdem ist nicht damit zu rechnen, dass die Menschheit irgendwann das Interesse an das Erbgut betreffenden Fragen verliert. So ist gewährleistet, dass es immer passende Lesegeräte für DNA-Datenspeicher geben wird.

Auch bezüglich der Speicherdichte sind DNA-Datenspeicher ihren konventionellen Konkurrenten weit überlegen. So ist es im Prinzip möglich, in einem Kubikmillimeter DNA 1018 Bytes an Daten zu speichern (1 Million Terabyte (TB)). Damit werden die besten konventionellen Speicher um mindestens den Faktor 106 übertrffen.

Dem großtechnischen Einsatz von DNA-Datenspeichern stehen allerdings auch einige mehr oder weniger entscheidende Probleme entgegen. So müssen Korrekturmechanismen für die Fehler entworfen bzw. verbessert werden, die bei der Synthesierung und Sequenzierung von DNA immer wieder auftreten. Auch müssten die hierbei möglichen Geschwindigkeiten gegenüber heutigen Verfahren um mehrere Größenordnungen steigen, um mit konventionellen Datenspeichern konkurrenzfähige Zugriffsgeschwindigkeiten beim Ein- und Auslesen zu erreichen. Nicht zuletzt müssten die Kosten stark sinken und je nach gedachtem Einsatzprofil die Schaffung geeigneter Aufbewahrungsbedingungen für DNA praktikabel dargestellt werden.

So sind im Prinzip also alle Technologien zur Nutzbarmachung von DNA als Datenspeicher bereits vorhanden und werden schon im Rahmen der allgemeinen Gentechnik ständig weiterentwickelt und verbessert. Ihren weiteren Vorteilen (insbesondere extreme Alterungsbeständigkeit und höchste Speicherdichten) stehen aber auch Nachteile gegenüber. Im Vergleich mit konventionellen Speichermedien sind die Verfahrensschritte aufwendig bzw. teuer sowie relativ schwierig zu automatisieren und in praktikabel nutzbare mobile Systeme einzubinden. Deshalb sind sie vor allem für die stationäre Archivierung größerer Datenmengen über lange Zeiträume hinweg geeignet. Aus technischer Sicht sollten sie hier bereits mittelfristig praktikabel einsetzbar sein.

Jürgen Kohlhoff, März 2020

Predictive Maintenance

Die vorausschauende Wartung abhängig vom tatsächlichen Bedarf ist einer der wichtigsten aktuellen Trends im Betrieb von Maschinen und Anlagen.

Die klassische Instandhaltungsmethode von Anlagen und Maschinen ist präventiv und erfolgt unabhängig vom tatsächlichen Belastungszustand nach vorher festgelegten intervall- und zeitbasierten Instandsetzungs- und Wartungsplänen. Für eine Nachverfolgung werden die durchgeföhrten Arbeiten dokumentiert und nach Möglichkeit wird eine Optimierung des Wartungsplans vorgenommen. Solch ein routinemäßiger Prozess führt zu unerwünschten Stillstandzeiten von Anlagen und Maschinen. Somit erhöhen sich sowohl Kosten für den operativen Bereich als auch Wartungskosten. Der Austausch von Komponenten gemäß Serviceplan führt ggf. auch dazu, dass Bauteile instandgesetzt werden, die möglicherweise noch einwandfrei sind und ihre Funktion ausfüllen würden. Zur Vermeidung derartiger Nachteile ist in den letzten Jahren der Ansatz der vorausschauenden Instandhaltung als neue weitsichtige Strategie der Instandsetzung und Wartung in den Vordergrund gerückt, im Englischen Predictive Maintenance.

Predictive Maintenance basiert auf der Gewinnung und Auswertung möglichst vieler Daten über Betriebszustände und der daraus folgenden Risikobewertung den weiteren Betrieb betreffend. Sie bietet gegenüber den klassischen Verfahren das Potenzial einer Minimierung oder mindestens Reduktion von zeit- und kostenintensiven Ausfallzeiten der Anlagen und Maschinen und einer effizienteren Leistung, da Wartungsarbeiten (Austausch oder Reparatur von Bauteilen) nur abhängig vom tatsächlichen Bedarf ausgeführt werden. Neben der Anlagenverfügbarkeit erhöht sich auch die Lebensdauer des Systems mit seinen integrierten Komponenten. Allerdings ist zu beachten, dass störungsbedingte Ausfälle auch durch Predictive Maintenance nicht ganz vermieden werden können, da Bauteile während des Betriebs oder nach Einbau zufällig nicht funktionieren könnten. Somit ist

eine vollkommene Vision eines störungsfreien Ablaufs zwar nicht realistisch, aber mit der Methode der Predictive Maintenance kommt man dieser sehr nahe.

Mit Hilfe der Predictive Maintenance-Methode werden Messwerte und Daten des Ist-Zustands der Anlagen und Maschinen dauerhaft durch smarte Sensoren (wie z. B. Infrarot- oder Schallpegelmessung) modernster diagnostischer Geräte in Echtzeit überwacht, erfasst, digitalisiert und zur Speicherung an eine Datenbank übermittelt. Typischerweise sind die Daten Informationen z. B. der Leistungsveränderung, der Schwingung, des Temperaturanstiegs oder der Vibration abhängig von der jeweiligen Anlage oder Maschine. Dabei können weitere Daten zusätzlich über Peripheriegeräte gewonnenen werden, z. B. Umgebungsinformationen wie Druck oder Luftfeuchtigkeit. Durch eine darauffolgende Analyse mittels eines mathematischen Algorithmus werden die Zustandsdaten bewertet und interpretiert, die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Störung errechnet und ein potentieller Zeitpunkt einer Instandhaltungsmaßnahme präzise vorhergesagt. Somit können Wartungspläne abhängig von Notwendigkeit und Priorisierung erstellt werden. Nichtsdestotrotz ist für eine Vorhersage eine vehemente Menge an Daten notwendig, für deren Verarbeitung zur Prognose wiederum eine digitale Infrastruktur mit Datenbanken wie in einem Big Data-Umfeld unerlässlich ist. Solche großen Datenbanken mit großen Kapazitäten z. B. von Mess- und Produktionsdaten ermöglichen erst die verlässliche Vorhersage eines potentiellen Ausfalls oder eines Trends. Die Prognose der Ausfallwahrscheinlichkeit wird umso genauer, je mehr Informationen über die Anlagen und Maschinen gewonnen werden können und je höher die Leistungsfähigkeit des mathematischen Algorithmus ist.

Predictive Maintenance hilft also dabei, einen außerplanmäßigen Ausfall oder eine Unterbrechung zu vermeiden und die Lebensdauer sowie die Effizienz der Anlage und Maschine nach zeitabhängigem Leistungsverlust zu erhöhen. Des Weiteren wird die Betriebssicherheit erhalten und durch gezielte Optimierungseingriffe verbessert. Die Predictive Maintenance-Methode ist daher geeignet für Industriebranchen wie Automotive, Luftfahrt, Fertigungs- und Produktionstechnik oder auch den Windradeinsatz. Die Einsatzmöglichkeit in der Automobilbranche ergibt sich durch die Datenerfassung z. B. der Drehzahl, der Geräuschentwicklung oder der Temperatur durch Sensoren im Fahrwerk und Motor. Auffälligkeiten wie Unwucht, Vibrationen oder Verschleißeffekte könnten durch ein Lager hervorgerufen sein und wären ein Indiz für einen zeithohen Austausch. Eine permanente Überwachung der Betriebsdaten und somit des Lebenszyklus der Komponenten kann unnötige Reparaturen und potentielle Ausfälle unterbinden. Wenn das Fahrzeug mit dem Hersteller, der Werkstatt oder dem

Zulieferer online verbunden wäre, könnten die Ersatzteile des PKWs schon zu einem errechneten Zeitpunkt bestellt und vom Logistikzentrum geliefert werden, so dass eine Instandsetzung erst dann erfolgen kann, wenn sie notwendig ist. Somit wäre ein Serviceintervall besser planbar. Derzeit wird die Wartung eines PKWs immer noch im Wesentlichen nach Reichweite oder Zeitpunkt seit der letzten Inspektion festgelegt. Demgegenüber wird die Instandhaltung ziviler Flugtriebwerke bereits durch die Predictive Maintenance-Methode unterstützt. Hierdurch werden jetzt schon optimale Wartungspläne für eine Instandsetzung erstellt, Mitarbeiterressourcen besser geplant und Kosten eingespart.

Insgesamt kann man sagen, dass mit dem Terminus Predictive Maintenance einer der wichtigsten aktuellen Trends im Betrieb von Maschinen und Anlagen bezeichnet wird, untrennbar verbunden mit Begriffen wie Industrie 4.0, Internet der Dinge oder Big Data. Ein zunehmender Einsatz entsprechender Technologien wird dazu beitragen, die Risiken des Ausfalls von Maschinen zu minimieren und Anlagen nachhaltig zu betreiben. Allerdings darf der damit verbundene Aufwand zur Gewinnung, Speicherung und vor allem Auswertung der nötigen Daten nicht unterschätzt werden.

Dr. Baycan Yildirim, April 2020

Lidar-on-a-Chip

Auf Basis sog. optischer Phased-Arrays erscheinen in Zukunft ultrakompakte, kostengünstig massenfertigungstaugliche und mechanisch extrem robuste Lidar-Systeme realisierbar.

Im Bereich des autonomen Fahrens und der mobilen Robotik ist Lidar (Light Detection and Ranging) eine wichtige Methode zur räumlichen Erfassung der Umgebung zwecks Wegplanung und Kollisionsvermeidung. Hierfür werden heute üblicherweise Lidar-Systeme in Form von Laserscannern verwendet, die auf einer mechanischen Strahlschwenkung mit beweglichen optischen Komponenten beruhen, wie z. B. rotierenden Spiegeln oder in Chips integrierten kippbaren Mikrospiegeln. Aktuell gibt es jedoch auch starke Entwicklungsbemühungen um Lidar-Systeme mit nicht-mechanischer Strahlschwenkung, bei denen sämtliche Komponenten in einem einzelnen Chip integriert sind, einem sogenannten photoni schen Schaltkreis. Analog zu den schon lange etablierten Phased-Array-Antennen im RadARBereich werden dazu seit einigen Jahren vor allem verschiedene Ansätze basierend auf sogenannten optischen Phased-Arrays (OPA) untersucht. Mit diesen erscheinen in Zukunft ultrakompakte, kostengünstig massenfertigungstaugliche und mechanisch extrem robuste Lidar-Systeme realisierbar.

Das Grundprinzip der Umfelderfassung mittels Lidar besteht darin, einen Laserstrahl in eine bestimmte Richtung auszusenden und die Zeit zu messen, bis das Laserlicht nach der Reflexion an einem Objekt wieder zurückgekehrt ist. Aus der Laufzeit des Lichts wird die Entfernung des Objekts berechnet. Dieser Vorgang wird zehntausende Male pro Sekunde wiederholt, während mit dem Laserstrahl der gewünschte Raumbereich abgetastet wird. Das Ergebnis ist eine Punktfolge, die kontinuierlich aktualisiert wird und gewissermaßen eine dreidimensionale Karte der Umgebung darstellt – oft detailliert genug, um Objekte nicht nur als Hindernis erkennen, sondern auch identifizieren zu können.

Die Methode der Strahlschwenkung spielt hierbei eine besonders wichtige Rolle, da sie maßgeblich mitentscheidend für die Größe, das Gewicht, den Stromverbrauch, die Robustheit, die Scangeschwindigkeit und den abgedeckten Winkelbereich des Lidar-Systems ist. Bei einem Phased-Array nutzt man eine Anordnung einzelner Strahlungsemitter, deren Phasen relativ zueinander eingestellt werden können, um einen Strahl zu formen und seine Richtung zu verändern. Elektronische Phased-Arrays werden schon seit Jahrzehnten im Radar-Bereich zur nicht-mechanischen Schwenkung von Radar-Strahlen eingesetzt. Die Entwicklung von Phased-Arrays für optische Strahlung (Licht) ist jedoch ungleich anspruchsvoller. Dies ist u. a. darauf zurückzuführen, dass die einzelnen Emitter eines Phased-Arrays idealerweise in Abständen geringer als die halbe Wellenlänge der verwendeten Strahlung angeordnet sein sollten. Somit müssen bei optischen Phased-Arrays komplexe Strukturen im Submikrometerbereich erzeugt werden, während bei elektronischen Phased-Arrays im Radar-Bereich einfacher herstellbare Strukturen im Zentimeterbereich genügen. Zwar enthalten bisher demonstrierte optische Phased-Arrays bereits tausende von Komponenten, wie Laser, Wellenleiter, Strahlteiler, Beugungsgitter, Phasenschieber, Amplitudenregler etc. und können mit gängigen Chipfertigungsverfahren hergestellt werden. Es bestehen jedoch noch einige technische Herausforderungen im Hinblick auf die Herstellung praktisch nutzbarer Lidar-Systeme basierend auf optischen Phased-Arrays.

So wird beispielsweise das Erreichen derart geringer Emitter-Abstände dadurch erschwert, dass in einem dichtgepackten hochintegrierten photonischen Schaltkreis Licht aus einem Wellenleiter in benachbarte Wellenleiter einkoppeln und sich dadurch störend auswirken kann (optisches Übersprechen). Ähnliches gilt für die verbreitet eingesetzten thermooptischen Phasenschieber in Form mikroskopischer elektrischer Heizelemente an den Wellenleitern, mit denen man den Brechungsindex der Wellenleiter verändern und somit Phasenverschiebungen zwischen unterschiedlichen Emittoren bewirken kann. Hier kann es in den dichtgepackten photonischen Schaltkreisen zusätzlich zu einem thermischen Übersprechen kommen.

Um auch in größerer Entfernung eine ausreichende Auflösung erzielen zu können, muss der Hauptstrahl eines OPA-basierten Lidar-Chips entsprechend gebündelt sein. Dies kann prinzipiell durch eine ausreichend große Anzahl an Emittoren erreicht werden. So sollte beispielsweise für eine Anwendung im Bereich des autonomen Fahrens die Strahldivergenz weniger als 0,1 Grad betragen, um Objekte noch in 200 m Entfernung identifizieren zu können, wofür Arrays mit mehr als 700 Emittoren benötigt werden. Eine Skalierung der demonstrierten Ansätze hin zu derart großen Arrays wird durch unterschiedliche Aspekte

erschwert. So steigt mit der Anzahl an Emittoren entsprechend auch die Anzahl an Phasenschiebern und weiteren Komponenten, die wiederum mit elektrischen Leiterbahnen kontaktiert werden müssen und komplexere Steuerungselektroniken benötigen.

Im Gegensatz zu den heute verbreitet eingesetzten Lidar-Systemen basierend auf rotierenden Laserscannern ist mit einem OPA-basierten Lidar-System keine 360-Grad-Erfassung der Umgebung mit einem einzelnen Gerät möglich. Denn mit einem ebenen Chip kann man allein aus geometrischen Gründen nicht mehr als 180 Grad erfassen, technisch bedingt sogar deutlich weniger. Zur Erstellung eines Rundumblicks, z. B. im Rahmen des autonomen Fahrens, müssen die Daten einer ausreichenden Anzahl an Lidar-Chips, die an Front, Heck und Seiten des Fahrzeugs montiert sind, computerbasiert fusioniert werden. Die Gesamtkosten sollten dennoch deutlich geringer ausfallen als für einen auf dem Fahrzeugdach montierten herkömmlichen Laserscanner, da langfristig massengefertigte Lidar-Chips zu Preisen im Bereich von 10 EUR für realistisch gehalten werden.

Prinzipiell erscheinen die Herausforderungen bei der Entwicklung von OPA-basierten Lidar-Chips Fachleuten als lösbar. Bis zu einem marktreifen entsprechenden Lidar-System, das die Anforderungen für autonome Fahrzeuge voll erfüllt, sind jedoch noch Entwicklungsarbeiten in größerem Umfang erforderlich, die schätzungsweise noch 5 bis 15 Jahre in Anspruch nehmen könnten.

Dr. David Offenberg, Mai 2020

Bioinspirierte Sensoren

Das Potenzial von der Natur inspirierter Sensorsysteme ist längst noch nicht ausgeschöpft, so dass im Laufe der nächsten Jahre mit einer weiter zunehmenden Verbreitung diesbezüglicher Technologien zu rechnen ist.

Schon seit Jahrzehnten ist die Bionik, also das Lernen von der Natur und die Umsetzung der dabei gewonnenen Erkenntnisse in der Technik, ein immer stärker werdender Trend. In den letzten 10 bis 15 Jahren nehmen hier insbesondere die Bemühungen um die technische Nachahmung der Sensorik aus dem Tier- und Pflanzenreich zu. Wesentliche Triebfeder dafür sind die teilweise überragenden Detektionsleistungen natürlicher Systeme. Trotz enormer Fortschritte in Forschung und Technologie sind diese ihren technischen Pendants in den meisten Bereichen heute immer noch weit überlegen.

Neben den klassischen, vom Menschen bekannten Sinnessystemen wie Hören, Sehen, Riechen, Tasten und Schmecken finden sich im Tierreich viele weitere sensorische Systeme wie beispielsweise die Echoortung, Elektroortung, Infrarot- und UV-Wahrnehmung, Sonar und Mechanosensorik. Jedes dieser Systeme ist auf einen bestimmten Aufgabenbereich spezialisiert. Tiere nutzen diese Sensoren, um sich zu orientieren, Beute zu jagen oder auch zur Kommunikation. Allgemein kann man biologische Sensorsysteme in akustische, chemische, elektrische, optische, mechanische und thermische unterteilen. Die vermutlich bekannteste Art von biologischen Sensoren sind sogenannte Exterorezeptoren. Dies sind sensorische Zellen, welche Signale von außen, also aus der Umgebung, aufnehmen und dann weiterverarbeiten. Für diesen Zweck sind diese Sinneszellen auch an der Grenze zwischen Organismus und Umwelt, also zum Beispiel auf der Haut oder im Auge, zu finden.

Eine biomimetische Nachbildung von Sinnessystemen kann auf unterschiedliche Art und Weise geschehen. Neben der Nachbildung der morphologischen oder inneren Struktur eines Sinnessystems kann beispielsweise auch ohne strukturelle Ähnlichkeiten nur dessen Funk-

tionsmechanismus übernommen werden. Ein Beispiel für die strukturelle Nachbildung eines Sinnessystems sind 3D-gedruckte Hundenasen, welche die äußereren aerodynamischen Eigenschaften des Riechorgans imitieren und somit ein wesentlich feineres Detektieren (16 – 18fach) von Stoffen ermöglichen als Sensoren, die ohne diese Technik auskommen. Ein weiteres Beispiel ist ein Miniatur-Ohr auf einem Mikrochip, welches in seinem Aufbau dem des menschlichen Innenohres entspricht und in dem Schallwellen über einen mit Flüssigkeit gefüllten Kanal weitergeleitet werden.

Die ausschließliche Übernahme eines Funktionsmechanismus von einem sensorischen System, ohne dessen Form und Struktur zu kopieren, findet man bei einem Roboter, der am Vorbild der Fledermaus entwickelt wurde. Der Roboter kann zwar nicht fliegen, nutzt aber, an der Echoortung von Fledermäusen orientiert, Ultraschall-Lautsprecher und Ultraschall-Mikrophone und wertet die dadurch gewonnen Echoinformationen mittels eines Algorithmus aus, um Umgebungsinformationen zu gewinnen.

Anwendungsmöglichkeiten für bioinspirierte Sensoren gibt es in den verschiedensten Bereichen. Ein Einsatz in der Robotik, wo teilweise bioinspirierte Sensoren mit „klassischer“ Robotik verbunden werden, oder auch das Einbringen solcher Sensoren in ohnehin schon bioinspirierte Roboter ist verbreitet. Eine Neuentwicklung nimmt sich die Schnurrhaare von semi-aquatischen Lebewesen wie Seehunden oder Walrossen als Vorbild. Aus Materialien wie Polyurethan und Graphen können mittels eines 3D-Druckers künstliche Schnurrhaare gedruckt werden, welche der Strömungserkennung dienen und somit Unterwasserrobotern eine bessere Positionssteuerung und Navigation ermöglichen sollen. Entwickelt wurden auch künstliche mechanosensorische Nerven, in welche neben künstlichen Neuronen und Synapsen auch künstliche Mechanorezeptoren (resistive Drucksensoren) eingebunden werden. Mit einer solchen Kombination aus bioinspirierten Sensoren und Nachbildungen von neuronalen Netzwerkbestandteilen erhofft man sich Vorteile in den Bereichen Stromverbrauch, Flexibilität und Sensitivität. Bei der Sprengstoffdetektion kommen mittlerweile Sensoren zum Einsatz, die sich an den Strukturen von Mottenantennen orientieren und eine um den Faktor 1000 höhere Sensitivität aufweisen als klassische Sensoren und damit der Empfindlichkeit von Drogenspürhunden entsprechen.

Aber auch Systeme oder Funktionen aus dem Tierreich, welche im ersten Moment nicht wie Sensoren wirken, können technisch umgesetzt beeindruckende sensorische Funktionalitäten aufweisen. Es können also auch andere Eigenschaften oder Fähigkeiten von Lebewesen,

z. B. deren Aufbau oder Struktur, als Inspiration genutzt werden, um technisch umgesetzt dann für andere Zwecke eingesetzt zu werden. Der Truthahn beispielsweise hat die Fähigkeit seine Hautfarbe im Kopfbereich von blau über rot und weiß zu variieren, je nach Gemütszustand. Dies geschieht durch Kollagenfaserbündel, welche mit vielen verzweigten Blutgefäßen durchzogen sind und somit durch veränderten Blutfluss ihren Abstand zueinander verändern können. So kommt es durch die unterschiedlichen Lichtbrechungseigenschaften zur Farbveränderung der Haut. Anhand dieses Vorbildes wurde ein Sensor für Smartphones entwickelt, der verschiedene Giftstoffe erkennen und farblich kodiert darstellen kann. Weitere „versteckte“ Sensoren finden sich in speziellen Kristallstrukturen in den Flügeln von Schmetterlingen, die diesen lediglich der Farbgebung dienen. Mit der Art, in der diese photonischen Kristalle das Licht reflektieren, lassen sich in der technischen Umsetzung verschiedene Chemikalien detektieren.

Insgesamt kann man also sagen, dass das Feld der bioinspirierten Sensorik sehr breit aufgestellt ist und sowohl im zivilen als auch im militärischen Bereich jetzt schon weitreichende Einsatzmöglichkeiten und Chancen bietet. Allerdings ist ihr Potenzial längst noch nicht ausgeschöpft, so dass im Laufe der nächsten Jahre mit einer weiter zunehmenden Verbreitung solcher bioinspirierter Systeme zu rechnen ist.

Dr. Vanessa Hollmann, Juni 2020

Living Sensors

Die Nutzbarmachung der natürlichen Sinnesleistungen von Tieren bzw. der natürlichen Reiz-Reaktions-Mechanismen von Pflanzen und Bakterien für Sensoranwendungen bleibt schwierig, wenn sie auf deren Integration in technische Systeme basieren soll.

In den letzten Jahren haben zwei Programme der US-amerikanischen Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) für Aufsehen gesorgt, in denen technische Sensorsysteme durch natürliche ergänzt oder ersetzt werden sollen. Ganz allgemein zielt das diesen Überlegungen zugrunde liegende Konzept der Living Sensors darauf ab, die natürlichen Sinnesleistungen von Tieren bzw. die natürlichen Reiz-Reaktions-Mechanismen von Pflanzen und Bakterien zu nutzen, um neuartige Sensorsysteme zu entwickeln. Wie groß die damit erzielbaren Fortschritte allerdings im praktischen Einsatz tatsächlich sein können, muss in jedem Einzelfall kritisch geprüft werden.

Grundsätzlich können bei den Living Sensors drei Ansätze unterschieden werden. Die ersten beiden nutzen die natürlichen Sinnesleistungen von Tieren. Zum einen wird deren natürliches Verhalten beobachtet und analysiert, um dann mit Hilfe von Sensoren Abweichungen vom normalen Verhalten zu detektieren, was Aufschluss über mögliche Gefahren, wie z. B. Naturkatastrophen, liefert. Zum anderen wird der extrem leistungsstarke Geruchssinn der Tiere so trainiert, dass sie auf die Detektion von Gefahrstoffen, Suchtmitteln oder Krankheiten konditioniert werden. Im dritten Ansatz werden Bakterien und Pflanzen zielgerichtet so programmiert, dass sie in der Lage sind, bestimmte Schadstoffe, wie Explosivstoffe oder biologische und chemische Agenzien, zu detektieren. Dies erfolgt über gentechnische Modifikationen. Eine andere Möglichkeit stellt das Einbringen von Nanopartikeln bzw. Nanostrukturen in das Pflanzengewebe dar, wobei Pflanzen mit neuen Funktionalitäten (nanobionische Pflanzen), z. B. mit der Fähigkeit zur Detektion von Gefahrstoffen, entwickelt werden.

Ein neuer Ansatz in der Verhaltensanalyse ist es, das natürliche Verhalten von Meereslebewesen als Warnsystem vor Unterwasserfahrzeugen zu nutzen. Dabei sollen mit Hilfe von Hydrophonen, akustischen Überträgern, Sonar, Kameras und anderen Sensoren die Geräusche in einem Riff sowie die Bewegungen der Meereslebewesen kontinuierlich überwacht und analysiert werden. Auch die Reaktionen von marinen Mikroorganismen auf magnetische Signaturen sollen erfasst werden. Abweichungen vom normalen Verhalten sollen Hinweise auf U-Boote oder unbemannte Unterwasserfahrzeuge geben.

Der Einsatz des außerordentlichen Geruchssinns von Spürhunden zur Detektion von Explosivstoffen oder Suchtmitteln ist schon lange Alltag und Studien belegen, dass Hunde sogar in der Lage sind, Krankheiten wie Krebs oder Malaria zu erschnüffeln. Derzeit wird sogar untersucht, ob medizinische Detektionshunde für den Nachweis von COVID-19-Erkrankten ausgebildet werden können. Ebenso werden Ratten schon seit vielen Jahren für die Detektion von Landminen oder bei der Untersuchung von Spuckproben auf Tuberkulosebakterien eingesetzt. Aber auch Insekten, insbesondere Bienen, wurden bereits erfolgreich auf die Detektion von Explosivstoffen, Suchtmitteln oder Krankheiten trainiert. Die Bienen werden dabei dem Geruch einer bestimmten Substanz ausgesetzt und anschließend mit Zuckerr Wasser belohnt. Erfolgreich trainierte Bienen strecken nun in Anwesenheit der Zielsubstanz ihren Rüssel aus, was mit Hilfe von Kameras überwacht werden kann.

Bakterien gentechnisch so umzuprogrammieren, dass sie als Sensor fungieren, ist heute relativ einfach. Die größte Herausforderung ist es, ihr Überleben und ihre Funktionalität auch außerhalb des Labors sicherzustellen. Außerdem müssen die Zellen innerhalb des Materials verbleiben, damit die Biosicherheit bezüglich der Freisetzung gentechnisch modifizierter Organismen sichergestellt ist. Hierbei konnte bereits ein dehnbares, reißfestes Hydrogel-Elastomer-Hybrid realisiert werden, in das lebende E.-coli-Bakterien injiziert wurden, die genetisch so modifiziert waren, dass sie ein grün fluoreszierendes Protein produzierten, wenn sie in Kontakt mit bestimmten Chemikalien gerieten.

Aus diesem lebenden Material wurden z. B. Gummihandschuhe und Bandagen entwickelt, die für forensische Untersuchungen oder in der medizinischen Diagnostik zum Nachweis von Viren auf der Haut eingesetzt werden könnten.

Um eine Pflanze als Gefahrendetektor nutzen zu können, sind umfangreiche Eingriffe in das Genmaterial der Pflanze erforderlich. Die Modellpflanze *Arabidopsis thaliana* wurde

z.B. genetisch so verändert, dass sie nun in Anwesenheit von TNT den Blattfarbstoff Chlorophyll abbaut und entgrünt.

Ein ganz neuer Ansatz ist die Pflanzennanobionik. In das Blattgewebe von Spinatpflanzen wurden Kohlenstoffnanoröhrchen-Peptid-Komplexe eingeschleust, die auf nitroaromatische Verbindungen reagieren, welche von Landminen an den Boden abgegeben und von den Pflanzen mit dem Wasser aufgenommen werden. Das Vorhandensein dieser Verbindungen wird durch Lichtemission im nahen Infrarot-Bereich angezeigt, wenn die Pflanzen mit einem Laser angestrahlt werden.

Living Sensors werden oftmals als schneller und sensitiver als die entsprechenden herkömmlichen Technologien angepriesen. Sie sind allgegenwärtig, reproduzieren sich selbst und erhalten sich selbst am Leben, wodurch sie kostengünstiger und energieunabhängig seien. Dabei wird jedoch die in vielen Fällen vorhandene Notwendigkeit nachgeschalteter Technologien, wie Sensoren oder Kameras, Datenübertragung, Bildverarbeitung und Auswertungsalgorithmen, um die Signale der Living Sensors überhaupt wahrnehmen und interpretieren zu können, außer Acht gelassen. Und wie diese Überwachung und Auswertung realisiert werden kann, ist teilweise noch unklar. Weitere Hürden bei der Übertragung der im Labor oder Feldversuch gewonnenen Ergebnisse auf Realbedingungen sind die teilweise zu geringe Lebensdauer der Living Sensors (Bakterien überleben in dem genannten Hydrogel-Elastomer nur wenige Tage), die teilweise zu lange Reaktionszeit (der Prozess des Entgrünens der Pflanzen dauert zwei Stunden), die starke Wetterabhängigkeit der Organismen sowie der Umgang mit gentechnisch veränderten Organismen, der nach heutiger Rechtslage üblicherweise nur im Labor erlaubt ist.

Dr. Britta Pinzger, August 2020

Adversarial Machine Learning

Letztlich werden sich Systeme der Künstlichen Intelligenz vor bedrohenden Schädigungsmechanismen wohl nur schützen lassen, wenn sie über ein grundlegendes, gegenüber dem heutigen Zustand umfassenderes Verständnis der Welt verfügen.

Adversarial Machine Learning (AML) beschäftigt sich mit dem Auffinden von potenziellen Sicherheitslücken in Verfahren des maschinellen Lernens (ML) und auch mit der Entwicklung von geeigneten Gegenmaßnahmen diesbezüglich. Da Methoden des ML und hier insbesondere das sog Deep Learning wesentlich für die aktuellen Erfolge im Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) verantwortlich sind, stellen die gegenwärtigen Entwicklungen auf dem Gebiet des AML potenziell eine erhebliche Bedrohung für viele aktuelle KI-Systeme dar. Das erklärt die zunehmenden diesbezüglichen Aktivitäten (auch) auf der Seite der ML-Entwickler, um das Wissen über potenzielle Schädigungsmechanismen wenn möglich zum Schutz der Systeme zu nutzen.

Generell umfasst ML Verfahren, die es Computern erlauben, selbständig anhand von Beispieldaten bestimmte Sachverhalte zu erlernen, z. B. ob auf einem Bild ein gewisses Objekt abgebildet ist. Im Rahmen von AML werden dabei Eingabedaten untersucht, sog. Adversarial Examples, die von einem Angreifer speziell mit der Absicht entworfen worden sind, Fehler bei dem entsprechenden ML-Verfahren hervorzurufen. So können manche ML-Verfahren durch subtile Veränderungen der Bildpunkte eines Bildes dazu veranlasst werden, anstatt des eigentlich dargestellten Objekts ein ganz anderes Objekt zu erkennen, obwohl das veränderte Bild für einen Menschen vom ursprünglichen Bild nicht zu unterscheiden ist.

Beispielsweise wären derartige Angriffe eine mögliche Gefahr für autonome Fahrzeuge, wenn dadurch z. B. ein Stoppschild als Geschwindigkeitsbegrenzungsschild erkannt und daraufhin von dem Fahrzeug ein Unfall verursacht werden würde. Ähnliche Überlegungen

gelten auch für andere Systeme aus dem Bereich der Robotik. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Umgehung von Sicherheitskontrollen. So könnte eine Person auf der Basis von AML u. a. versuchen, ein automatisiertes System zur Gesichtserkennung zu täuschen, um dadurch unerkannt zu bleiben. Im Bereich der IT-Sicherheit könnte AML beispielsweise dazu eingesetzt werden, Systeme zur Detektion von Schadsoftware oder Spam-E-Mails zu täuschen.

Außerdem könnten Angriffe auf sprachbasierte digitale Assistenten, die inzwischen z. B. häufig in Lautsprechern zur Wiedergabe von Musik im Heimbereich integriert sind, erfolgen. Hier könnten u. a. harmlos erscheinende Ton-Aufnahmen, beispielsweise in Form von Fernsehwerbung, genutzt werden, um unautorisierte Käufe zu veranlassen. Darüber hinaus könnte die automatisierte Erkennung von betrügerischen Transaktionen im Finanzwesen oder im E-Commerce-Bereich mit Hilfe von AML getäuscht werden. Hierzu zählt u. a. Betrug im Rahmen der Vergabe von Darlehen. Weitere Angriffe dieser Art sind z. B. auf ML-Verfahren zur Erkennung von illegal verbreiteten kopiergeschützten Inhalten oder anstößigen Inhalten in sozialen Medien denkbar.

Als Grundlage für ML dient generell ein mathematisches Modell mit einstellbaren Parametern, wobei die jeweiligen Parameter in der Lernphase im Hinblick auf die Beispieldaten optimiert werden. Dabei können unterschiedliche ML-Modelle zum Einsatz kommen. Die unterschiedlichen Arten von Angriffen im Rahmen von AML können u. a. anhand des Wissens kategorisiert werden, das der Angreifer über das jeweils anvisierte ML-Modell besitzt. Bei White-Box Attacks kennt der Angreifer beispielsweise sämtliche Details des ML-Modells, z. B. welches konkrete Modell verwendet wird und welche Beispieldaten für die Lernphase genutzt wurden. Im Gegensatz dazu sind bei Black-Box Attacks diese Details dem Angreifer nicht bekannt. Hier ist der Angreifer lediglich in der Lage, die Ausgabedaten des betreffenden ML-Modells zu von ihm gewählten Eingabedaten abzufragen, allerdings möglicherweise nur in einem begrenzten Umfang. Eine mögliche Angriffsstrategie besteht in diesem Fall darin, die durch den Angreifer so gewonnenen Ein- und Ausgabedaten zu benutzen, um ein anderes ML-Modell damit zu trainieren. Dabei kann es sich auch um ganz unterschiedliche ML-Modelle handeln. Wenn beide ML-Modelle in einer ähnlichen Weise funktionieren, dann werden Adversarial Examples, die für das eine Modell entworfen wurden, wahrscheinlich auch bei dem anderen Modell entsprechende Fehler hervorrufen. Bei Gray-Box Attacks liegt das Wissen des Angreifers zwischen dem bei White-Box Attacks und Black-Box Attacks. Typischerweise ist in diesem Fall nur

das genutzte ML-Modell bekannt, aber nicht die genauen Parameter des Modells und die Beispieldaten für die Lernphase.

Angriffe auf ein ML-Verfahren können nicht nur auf ein bereits trainiertes System erfolgen, sondern auch während dessen Lernphase. Solche sog. Poisoning Attacks verwenden geeignet modifizierte Beispieldaten, um beispielsweise eine fehlerhafte Klassifikationen eines Objektes hervorzurufen.

Bisher konnten bereits einige effektive Angriffe auf unterschiedliche Arten von maschinellen Lernverfahren demonstriert werden. Dagegen konnten viele bislang in dieser Hinsicht vorgeschlagene Gegenmaßnahmen schon verhältnismäßig schnell nach ihrer Veröffentlichung durch neue Angriffsstrategien wieder gebrochen werden. Viele gegenwärtige Forschungsarbeiten im Bereich AML konzentrieren sich auf Adversarial Examples im Zusammenhang mit der Klassifikation von Bildern auf der Grundlage von Deep Learning. Zukünftig ist zu erwarten, dass auch andere Anwendungsbereiche noch eingehender untersucht werden, wie z. B. das Gebiet der IT-Sicherheit.

Möglicherweise zeigt die Angreifbarkeit aktueller ML-Verfahren durch Adversarial Examples, wie weit derzeitige KI-Systeme trotz ihrer teilweise beeindruckenden Erfolge noch von wirklicher Intelligenz entfernt sind, weil ihnen noch ein grundlegendes, umfassenderes Verständnis der Welt fehlt. Dementsprechend ist zu erwarten, dass KI-Systeme, die über ein verbessertes Verständnis dieser Art verfügen, auch eine höhere Robustheit gegenüber Adversarial Examples aufweisen werden.

Dr. Klaus Ruhlig, September 2020

Künstliche Muskeln

Die Realisierbarkeit von technischen Systemen, die biologischen Muskeln in Gänze, d.h. in allen relevanten Eigenschaften gleichzeitig entsprechen, ist allenfalls mittel- bis langfristig zu erwarten.

Künstliche Muskeln sind technische Komponenten, die auf externe Reize hin reversible Formveränderungen durchlaufen können und auf diese Weise Eigenschaften und Funktionen von natürlichen Muskeln imitieren. Hinter dem Begriff verbirgt sich ein ganzer Komplex von Technologien mit unterschiedlichen Reifegraden, vom Stand der Technik bis hin zum Forschungs- und Entwicklungsstadium. Die Realisierbarkeit von technischen Systemen, die biologischen Muskeln in Gänze, d.h. in allen relevanten Eigenschaften gleichzeitig entsprechen, ist jedoch allenfalls mittel- bis langfristig zu erwarten.

Als etablierte Beispiele für Künstliche Muskeln können einfache pneumatische oder hydraulische Aktoren angesehen werden, die eine Druckerhöhung im Inneren aufgrund geeigneter Hüllstrukturen in eine Längenänderung umwandeln können. Diese Systeme werden fortlaufend weiterentwickelt und verbessert. Technologisch anspruchsvoller sind Aktoren aus Funktionswerkstoffen, deren Formänderung durch spezifische physikalische oder chemische Steuerimpulse (z.B. elektrische Spannung, Wärme, Licht, pH-Wert) ausgelöst wird. Hierzu zählen Piezoelektrische Aktoren (elastische Verformung in Abhängigkeit von elektrischer Spannung) oder solche aus Formgedächtniswerkstoffen (temperaturinduzierte reversible Verformung). Diese haben ebenfalls bereits viele Anwendungen gefunden, von der Medizintechnik bis hin zur Luft- und Raumfahrt.

Äußerst attraktive Eigenschaften für einen zukünftig weiter verbreiteten Einsatz als Künstliche Muskeln versprechen sog. Elektroaktive Polymere (EAP). Das sind leichte, nachgiebige Kunststoffe, deren Form durch das Anlegen einer elektrischen Spannung reversibel verändert werden kann. Aufgrund unterschiedlicher Wirkprinzipien werden sie in zwei Klassen

unterteilt. Bei ionischen EAP beruht die elastische Verformung auf der Wanderung von Anionen und Kationen und einer damit einhergehenden Massenverschiebung, bei elektronischen EAP hingegen auf der Wanderung von Elektronen und daraus resultierenden elektrostatischen Wechselwirkungen. Zu den elektronischen EAP gehören dielektrische Elastomeraktoren (Dielectric Elastomer Actuators = DEA). Deren Funktionsweise basiert auf der elektrostatischen Anziehung zwischen zwei Elektroden, die durch einen reversibel verformbaren, passiven Elastomerfilm voneinander getrennt sind. DEA zeichnen sich durch hohe Schaltfrequenzen, große Dehnbarkeit und gute Wirkungsgrade aus, benötigen aber bisher noch Steuerspannungen im Kilovolt-Bereich, was manche Anwendungen erschwert oder gar ausschließt (z. B. im medizinischen Bereich).

Darüber hinaus gibt es vielfältige weitere Bemühungen um die Nutzbarmachung neuer Wirkprinzipien, Fertigungsprozesse und Materialkombinationen zur Realisierung von Künstlichen Muskeln. Vielversprechende Kandidaten sind sog. Smarte Hydrogele. Dabei handelt es sich um hydrophile Polymernetzwerke, die in Abhängigkeit von äußeren Einflussfaktoren spezifische Quellungs- und Entquellungsprozesse durchlaufen und dabei mechanische Arbeit verrichten können. Typische Stimuli sind Änderungen der Temperatur oder des pH-Wertes. Einsatzmöglichkeiten gibt es insbesondere in der Mikrosystemtechnik (z. B. Drug-Delivery-Systeme). Als besonders bedeutsam für die Entwicklung von Künstlichen Muskeln könnte sich die Entdeckung erweisen, dass sich durch die Verdrillung von Fasern aus Kohlenstoffnanoröhren, Polymeren oder anderen volumenveränderlichen Materialien Aktorikelemente mit außergewöhnlichen mechanischen Eigenschaften erzeugen lassen. Für Schlagzeilen sorgte vor allem die Herstellung von leistungsfähigen und langlebigen künstlichen Muskeln aus herkömmlicher Angelschnur (Nylon), die sich um bis zu 50 % verkürzen und dabei etwa hundertmal schwerere Lasten als natürliche Muskeln gleicher Dicke heben können.

Im Vergleich zu konventionellen Aktoren wie Elektromotoren oder komplizierteren Hydrauliksystemen haben Künstliche Muskeln eine ganze Reihe von Vorteilen. Dazu zählen insbesondere eine je nach Typ mehr oder weniger weiche bzw. nachgiebige Struktur, eine einfache Bauweise, ein nahezu geräuschloser Betrieb, eine hohe Leistungsfähigkeit bei geringem Gewicht sowie eine hohe Energieeffizienz. Dazu kommen eine präzise Ansteuer- und gute Miniaturisierbarkeit sowie niedrige Herstellungskosten. Als in Form und Funktion dem natürlichen Vorbild ähnelnde Systeme könnten sie damit in verschiedenen Anwendungen zum Einsatz kommen. Naheliegende Anwendungsgebiete sind in der Prothetik

und der Robotik zu sehen. Das Einsatzspektrum reicht dabei von künstlichen Ersatzgliedmaßen über kraftverstärkende Exoskelette bis hin zu biomimetischen Schwimm- oder Laufmaschinen und humanoiden Robotern. Von besonderer Bedeutung sind Künstliche Muskeln für die Entwicklung von sog. Soft Robots, also weitgehend weichen bzw. nachgiebigen Robotern, die beispielsweise eine sichere Mensch-Roboter-Interaktion in der industriellen Fertigung ermöglichen sollen. Ihre im Vergleich zu konventionellen Motoren und Aktoren potenziell höhere Leistungsdichte macht künstliche Muskeln gleichzeitig interessant für Anwendungsbereiche, in denen Gewichtsreduktion und Platzersparnis im Vordergrund stehen (z. B. Luft- und Raumfahrt). Ihre hervorragende Skalierbarkeit birgt außerdem Potenzial für die Entwicklung von neuen mikroelektromechanischen und mikrofluidischen Systemen. Auch in selbstregulierenden Systemen z. B. zur adaptiven Anpassung von Triebwerkskomponenten könnten Künstliche Muskeln eine zunehmende Rolle spielen.

Allerdings ist die strukturelle Organisation und funktionelle Bandbreite natürlicher Muskeln bislang unerreicht. Zwar werden isolierte Funktionen des natürlichen Vorbilds, wie z. B. Stellpräzision oder Ansprechverhalten, bereits erfolgreich durch die technischen Systeme imitiert bzw. sogar übertroffen, insgesamt erweist es sich in der Praxis aber als erhebliche Herausforderung, das volle Potenzial künstlicher Muskeln in einem einzigen, universell einsetzbaren Produkt zu vereinen. Die vielfältigen Vorteile, die man sich von ihnen verspricht, werden Künstliche Muskeln somit erst mittel- bis langfristig ausspielen können.

Dr. Carsten M. Heuer, Jürgen Kohlhoff, Oktober 2020

Metalinsen

Die Technologie der sog. Metaoberflächen wird vermutlich zukünftig dazu beitragen, optische Systeme kompakter, kostengünstiger und leistungsfähiger zu machen.

Metalinsen sind neuartige optische Bauteile, die Licht nicht wie herkömmliche Linsen fokussieren, sondern auf sogenannten Metaoberflächen beruhen. Dadurch können sie bis zu 1000-mal flacher ausfallen und zukünftig bisher unerreicht kompakte und leichte optische Systeme ermöglichen – möglicherweise sogar mit Auflösungen unterhalb der Wellenlänge. Heute befinden sie sich noch in einem frühen Stadium der Forschung, die kürzlich durch bedeutende Fortschritte bei der computerbasierten Berechnung komplexer nanostrukturierter Oberflächen eine neue Dynamik gewonnen hat.

Metalinsen bestehen aus einem flachen lichtdurchlässigen Trägermaterial, auf dem unterschiedlich dimensionierte nanoskalige Elemente in ausgeklügelter Anordnung erzeugt wurden. Schickt man Licht durch eine solche Metaoberfläche, werden die einzelnen Lichtwellen an diesen wie optische Resonatoren wirkenden Elementen unterschiedlich stark verzögert. Hinter der Metaoberfläche überlagern sich die Lichtwellen dann zu neuen Wellenfronten mit geänderten Ausbreitungsrichtungen. Bei Metalinsen sind diese Elemente so konzipiert und verteilt, dass das Licht dahinter in einem Brennpunkt zusammenläuft – wie bei einer herkömmlichen Linse. Generell lassen sich Metaoberflächen aber auch so gestalten, dass sie die Funktionalitäten von anderen optischen Komponenten nachahmen, wie beispielsweise von Strahlteilern, Polarisatoren oder Beugungsgittern.

Um störende Beugungseffekte zu vermeiden, müssen die einzelnen nanoskaligen Elemente im Durchmesser deutlich kleiner sein als die Wellenlänge des Lichts. Zur Herstellung von Metaoberflächen kommen daher lithografische Verfahren zum Einsatz. Die bisher demonstrierten Metalinsen sind oft noch mittels Elektronenstrahlolithographie erzeugt worden,

wobei die gewünschten Strukturen nacheinander mit einem Elektronenstrahl zunächst in eine entsprechende Lackschicht geschrieben werden müssen. Da dieser Prozess sehr zeitaufwändig ist und die Zahl der benötigten Elemente zudem mit dem Quadrat des Linsendurchmessers wächst, sind die demonstrierten Metalinsen bisher noch sehr klein – mit unter 100 Mikrometern Durchmesser zu klein für die meisten praxisrelevanten Anwendungen. In Zukunft sollen sie jedoch mit den existierenden fotolithografischen Verfahren der Chipherstellung mit größeren Durchmessern und in Massen gefertigt werden können – dann zu einem Bruchteil der Kosten herkömmlicher Linsen.

Beim Design größerer Metalinsen stößt man allerdings auf eine weitere Herausforderung. So müssen Lichtwellen vom Rand der Metalinse einen weiteren Weg zurücklegen als solche, die durch die Mitte der Metalinse zum Fokuspunkt laufen, so dass sie dort nicht gleichzeitig ankommen. Um diesen Effekt zu kompensieren, müssen die Strukturen der Metaoberfläche zusätzlich zur fokussierenden Wirkung die Lichtwellen aus den mittleren Bereichen passend verzögern. Eine Lösung hierfür wäre, die Metalinsen entsprechend dicker zu machen, wobei jedoch die benötigte Höhe der Nanostrukturen technisch heute noch längst nicht realisierbar wäre. Womöglich gibt es hierfür alternative Lösungen. So könnte man mehrere Metalinsen übereinanderstapeln, um wie bei herkömmlichen Linsensystemen die optischen Abbildungsfehler der einzelnen Linsen gegenseitig zu korrigieren, oder entsprechende Fehler ließen sich im Nachhinein herausrechnen, wie dies in ähnlicher Weise bei heutigen Smartphone-Kameras mit ihren einfachen Optiken zunehmend gehabt wird.

In den letzten beiden Jahrzehnten konnte zwar immer wieder demonstriert werden, wie sich mit nanostrukturierten Metamaterialien Licht auf diese neuartige Weise manipulieren lässt. Allerdings funktionierten die vorgestellten optischen Bauteile bisher immer nur mit Licht einer bestimmten Wellenlänge oder Polarisation. 2019 gelang diesbezüglich ein entscheidender Durchbruch. Auf der Grundlage von Computerberechnungen konnte eine komplexe strukturierte Metalinse hergestellt werden, die Licht unabhängig von dessen Polarisation und über fast den gesamten Bereich des sichtbaren Spektrums fokussieren kann – und dies sogar in einen einzigen Brennpunkt. Letzteres gelingt mit einer herkömmlichen Linse nicht, da unterschiedliche Wellenlängen unterschiedlich stark gebrochen werden.

Zur Korrektur dieser sogenannten chromatischen Aberration müssen in Objektiven von Mikroskopen und Kameras daher zusätzliche Korrekturlinsen eingesetzt werden, um scharfe

Bilder erzeugen zu können. Auch weil diese Art der Korrektur bei den achromatischen Metalinsen entfällt, werden damit äußerst flache Objektive vorstellbar.

Besonders interessant sind Metalinsen also perspektivisch für bildgebende Anwendungen, bei denen möglichst flache und kompakte Optiken benötigt werden, wie z.B. für Kameras in Smartphones, Tablets und Mini-Drohnen oder für medizinische Endoskope. Ihr geringes Gewicht wäre außerdem im Zusammenhang mit tragbaren optischen Systemen wie Virtual- oder Augmented-Reality-Brillen vorteilhaft. Darüber hinaus könnte ihr Einsatz zu Verbesserungen in der Mikroskopie, der Fotolithografie und der optischen Kommunikation führen.

Welche konkrete Rolle Metalinsen in Zukunft tatsächlich spielen werden, lässt sich bei ihrem derzeitigen Entwicklungsstand noch kaum vorhersagen. Außerdem werden aktuell auch andere Konzepte für ultraflache Linsen entwickelt, z. B. sogenannte diffraktive optische Elemente, die sich möglicherweise einfacher herstellen lassen als aktuell konzipierte Metalinsen. Metaoberflächen im Allgemeinen wären allerdings sehr vielseitig einsetzbar und werden vermutlich zukünftig dazu beitragen, optische Systeme kompakter, kostengünstiger und leistungsfähiger zu machen – möglicherweise eher in Kombination mit herkömmlichen optischen Bauteilen. Ihr Erfolg wird davon abhängen, ob es gelingen wird, ihren Durchmesser massenfertigungstauglich aus dem Mikrometer- in den Millimeterbereich zu bringen.

Dr. David Offenberg, November 2020

Maschinelles Lernen in der Werkstoffentwicklung

Die Nutzung des Maschinellen Lernens wird der Werkstoffentwicklung völlig neue Möglichkeiten eröffnen.

Im Gegensatz zur empirisch geprägten Werkstofftechnik vorindustrieller Epochen befasst sich die moderne Werkstoffwissenschaft mit der systematischen Beeinflussung und Vorher sage der Eigenschaften neu entwickelter Materialien. Die diesbezüglichen Prozesse sind jedoch häufig zugleich langwierig und kosten aufwändig, sodass es zehn oder mehr Jahre dauern kann, bis ein vielversprechender Kandidat in die Anwendung überführt werden kann. Nach den herausragenden Erfolgen der Technologie des sog. Maschinellen Lernens (ML) in Bereichen wie der Bilderkennung oder der Verarbeitung natürlicher Sprache (Natural Language Processing) werden nun große Hoffnungen darin gesetzt, die Entwicklung neuer oder verbesserter Werkstoffe mit Hilfe von ML deutlich zu beschleunigen können.

Beim Maschinellen Lernen handelt es sich um ein Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz, bei dem Computer anhand von Beispieldaten bestimmte Aufgaben erlernen, z.B. ein Objekt auf einem Bild zu erkennen. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei, dass das System aber nicht nur aus gegebenen Daten lernen, sondern später auch verallgemeinern, also im Anwendungsfall auch bisher unbekannte Daten bewerten können soll. Im Hinblick auf die Werkstoffentwicklung liegt das große Potenzial des ML in seiner Fähigkeit, auch mit unvollständigem Hintergrundwissen bisher unerkannte Zusammenhänge in einer großen Menge untersuchter Daten identifizieren zu können. So lassen sich z.B. auch unerwartete Auswirkungen des strukturellen Aufbaus eines zu entwickelnden Werkstoffes auf seine makroskopischen Eigenschaften erkennen.

Mit Hilfe von ML neu gefundene oder verbesserte Werkstoffe sind grundsätzlich für eine Vielzahl von Anwendungsfeldern interessant. Beispiele sind Energietechnik (z. B. neue

Hochtemperatursupraleiter, verbesserte Batterien oder Brennstoffzellen), Mobilität (z. B. neue Ultrahochtemperaturwerkstoffe für effizientere Triebwerke, verbesserte Kompositwerkstoffe) sowie Sensorikanwendungen (z. B. neuartige 2D-Materialien).

Aber auch für spezifische wehrtechnische Fragestellungen bietet der Einsatz von ML ein großes Potenzial, auch wenn es bisher nur sehr wenige Forschungsarbeiten dazu gibt. ML-Systeme eignen sich besonders dazu, in einer unüberschaubaren Menge an Daten eine geringe Zahl an Treffern ausfindig machen zu können, sodass sich das Auffinden völlig neuer Werkstoffe enorm vereinfachen ließe. Dies könnte genutzt werden, um gezielt nach neuen energetischen Materialien mit einer für bestimmte militärische Fähigkeiten optimalen Eigenschaftskombination zu suchen. Darüber hinaus könnten diese Systeme genutzt werden, um die Eigenschaften möglicher neuer Materialien vorherzusagen. Sogenannte künstliche neuronale Netze wurden etwa bereits erfolgreich eingesetzt, um für gegebene chemische Zusammensetzungen die Detonationsgeschwindigkeit oder die Schlagempfindlichkeit abzuschätzen und so geeignete Kandidaten für weitere Experimente zu bestimmen. Ebenso kann ML auch neue Möglichkeiten eröffnen, verbesserte Materialien für Aufklärung und ABC-Schutz zu entwickeln, etwa Materialien, die Sprengstoffe noch besser detektieren können.

Ein weiteres großes, wehrtechnisch relevantes Anwendungsfeld besteht in der Entwicklung noch schadenstoleranterer Werkstoffe für den Schutz oder für Leichtbaustrukturen verschiedener Arten von luft-, land- und seegestützten Plattformen. Insbesondere erhofft man sich hier, den Übertritt vielversprechender Werkstoffe bzw. Strukturen in die Nutzung durch eine Senkung der häufig noch sehr großen Zahl an aufwändigen experimentellen Untersuchungen verkürzen zu können. Beispiele dafür sind die schnellere Bestimmung der mechanischen Eigenschaften einer großen Zahl neuer Werkstoffe oder des Verhaltens von Bauteilen unter Last bzw. Schadenseintrag sowie die Nutzung von ML-Systemen, die für die Bilderkennung entwickelt wurden, um Auffälligkeiten in mikroskopischen Aufnahmen von Materialgefügen zu erkennen oder sicherheitsrelevante Fehler in Röntgenbildern von Turbinenschaufeln von Flugzeugtriebwerken zu erfassen und zu kategorisieren. Im Bereich der Fertigung könnte der Einsatz von ML große Vorteile bringen, indem z.B. automatisiert die optimalen Prozessparameter bestimmt werden, um eine spezifische Mikrostruktur zu erhalten, die dem Werkstoff erst die gewünschten Eigenschaften verleiht. Hierzu erhofft man sich vor allem neue Impulse für die additive Fertigung metallischer Werkstücke, die unter anderem ebenfalls in effizienteren Flugzeugturbinen zum Einsatz kommen könnten.

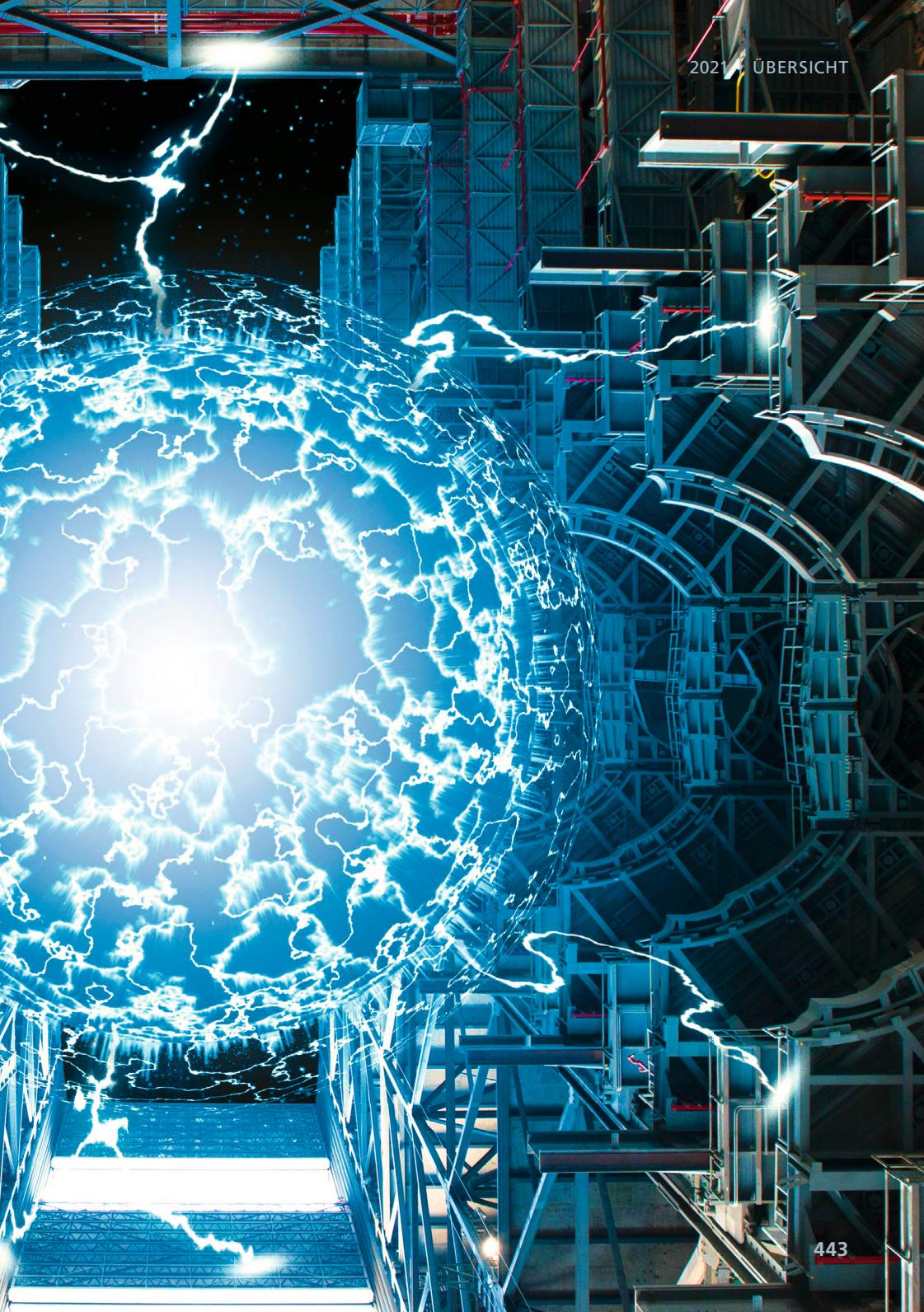
Zwar wurde bereits eine Zahl sehr unterschiedlicher Materialsysteme mittels ML untersucht, doch ist die Technologiereife noch als eher gering einzuschätzen. Durch die dynamische Entwicklung im Bereich maschinellen Lernens selbst steht eine Vielzahl von einsatzfähigen Systemen zur Verfügung, die auf spezielle Fragestellungen angepasst werden können. Diese Anpassung ist jedoch derzeit häufig noch komplex und erfordert umfangreiches Expertenwissen. Zudem muss zumeist für jeden Anwendungsfall ein neues System entwickelt bzw. angepasst werden, da sich die Systeme selbst bei verwandten Werkstoffen kaum übertragen lassen.

Dennoch haben die ersten Forschungsarbeiten bereits das enorme Potenzial dieser Technologie gezeigt. Dabei wird ML nicht nur als Ergänzung zu den bisherigen Pfeilern der Werkstoffentwicklung – quantenmechanischen Berechnungen sowie experimentellem und theoretischem Hochdurchsatzscreening – gesehen, sondern es eröffnet völlig neue Möglichkeiten. So können Berechnungen, die sonst Stunden oder Tage an Hochleistungsrechnern in Anspruch genommen hätten, innerhalb von wenigen Millisekunden durchgeführt werden und es wurden bereits tatsächlich neue Werkstoffe mit unerwarteten Eigenschaftskombinationen gefunden. Aber auch die Kombination von ML-Systemen mit konventionellen Verfahren verspricht eine deutliche Beschleunigung derselben. Bei der Nutzung des Maschinellen Lernens in der Werkstoffentwicklung handelt sich also um ein neues Paradigma, welches sich entsprechend breitgefächert auswirken wird.

Dr. Ramona Langner, Dezember 2020

Beiträge aus 2021

Architected Materials	444
Biomimetische UAVs	447
Small Modular Reactors	450
Raumtemperatursupraleiter	453
Lifelong Machine Learning	456
Explainable Artificial Intelligence	459
Bioinspirierte Unterwasserklebstoffe	462
Mikroroboter	465
Living Materials	468
Augmented Sensing	471
Biomimetische Riechsysteme	474
Hochentropie-Keramiken	477



Architected Materials

In Zukunft könnte die Einbeziehung architektonischer Merkmale wie die Anordnung von Baueinheiten im dreidimensionalen Raum – neben z. B. chemischer Zusammensetzung und Korngröße – zu einer eigenständigen Stellschraube bei der Entwicklung neuer Werkstoffe gemacht werden.

Die Optimierung von Werkstoffen begleitet uns seit Menschengedenken. Auch heute noch werden zumeist überschaubare Variationen der chemischen Zusammensetzung oder bei den Prozessparametern dazu genutzt, um etablierte Werkstoffe Schritt für Schritt zu verbessern. Allerdings geht man zunehmend den umgekehrten Weg top-down von einer gewünschten Funktionalität bzw. einem spezifischen Anwendungszweck als Ausgangspunkt aus. Der Werkstoff bzw. das Werkstück werden anschließend computerbasiert mit aufwendigen numerischen Verfahren von Grund auf neu generiert. Zu den auf diese Weise entwickelten „Materials of Design“ gehören auch die Architected Materials, welche sich gegenwärtig im Wesentlichen noch im Stadium der Grundlagenforschung befinden.

Auch eine exakte definitorische Abgrenzung dieser neuen Materialklasse muss sich erst noch ausbilden. Auf jeden Fall geht es um die Einbeziehung architektonischer Merkmale in die Werkstoffentwicklung. So soll die Anordnung von Baueinheiten im dreidimensionalen Raum – neben z. B. chemischer Zusammensetzung und Korngröße – zu einer eigenständigen Stellschraube bei der Entwicklung neuer Werkstoffe gemacht werden. Ziel ist es, die Grenzen der derzeit verfügbaren Kombinationen an Materialeigenschaften auszuweiten. Architected Materials kombinieren dafür gezielt unterschiedliche Materialien oder aber Material und freien Raum. Das Resultat sind Komposite und Gitter mit einem hochkomplexen hierarchischen Aufbau, der über viele Größenordnungen reicht und zunehmend als Architektur des Werkstoffs bezeichnet wird.

Multifunktionalität ist integraler Bestandteil des Konzepts der Architected Materials, ein Großteil der Forschungsarbeiten zielt auf die Erweiterung eines Werkstoffs um eine

gewünschte Funktionalität ab. Beispiele hierfür sind selbstheilende Fähigkeiten, elektromagnetische Absorption, optimaler Wärmeaustausch, Selbstüberwachung, optische Eigenschaften oder ein negativer thermischer Ausdehnungskoeffizient. Darüber hinaus werden Architected Materials entwickelt, die über ausgezeichnete mechanische Eigenschaften verfügen, insbesondere eine hohe Schadenstoleranz. Mit diesem Ansatz könnte ein sehr leichtes Material entwickelt werden, das aber gleichzeitig über ein hohes Energieabsorptionsvermögen zur Dämpfung von Druckwellen verfügt, wie sie z.B. bei Explosionen auftreten. In der Luftfahrt könnten Entwicklungen dieser Art zum wirkungsvollen Schutz von Strukturen vor Schall oder Vibrationen eingesetzt werden, auch der Erdbebenschutz soll Anwendungsgebiet solcher Architected Materials werden. Einen weiteren Aspekt im Bereich der Luftfahrt und auch der Automobilindustrie stellt das Crash-Verhalten unter Berücksichtigung des Leichtbaus dar. Im Bereich der Energieerzeugung könnten Architected Materials darüber hinaus auch als Trägermaterial für Solarzellen und elektrochemische Generatoren eingesetzt werden. Grundsätzlich ist die Entwicklung von Architected Materials interessant für Anwendungsbereiche, bei denen konträre Anforderungen von einem einzigen Material erfüllt werden sollen.

Gelingen soll eine solche Multifunktionalisierung eines Werkstoffs durch den Einbau von Design-Elementen wie unterschiedlichsten zellularen, faser-, schicht-, röhren- oder spiralförmigen Strukturelementen, aber auch wiederkehrenden strukturellen Überlagerungen, ineinandergreifenden Nahtstrukturen oder Gradienten in Form eines kontinuierlichen räumlichen Verlaufs. Entscheidend ist die Kombination unterschiedlicher Strukturebenen, meist von makroskopischer Strukturierung bis hinab zur Nanostrukturierung (Multiskalen). So kann eine Eigenschaft des Werkstoffs durch Strukturierung auf z. B. mikroskopischer Ebene erreicht werden, während eine weitere Eigenschaft durch die Kombination von mehreren Design-Elementen auf nanoskopischer Ebene realisiert wird.

Die Verwendung des Begriffs Architected Material befindet sich noch in einer frühen Phase und ist vor allem in zwei großen und dynamischen Forschungsrichtungen zu beobachten, den periodischen Gitterstrukturen und den Biokompositen. Zu den prominentesten Beispielen zählen Nachbildungen, die sich an natürlichen, extrem widerstandsfähigen Materialien wie Perlmutt oder Knochen orientieren. Sie weisen im Gegensatz zu Gitterstrukturen sehr unterschiedliche Design-Elemente auf, was den Simulationsaufwand deutlich erhöht. Diese Komplexität über mehrere Größenordnungen erfordert sehr spezifische Fertigungsmethoden. Speziell bei Strukturdetails im sub- μm -Bereich stellt die erforderliche

Präzision der Baueinheiten einerseits und die Größe des Gesamtobjektes andererseits eine Hürde dar. Die einzigartige Designfreiheit additiver Fertigungsverfahren sowie deren rasante Entwicklung und auch Verbreitung prädestiniert sie zur Herstellung solcher Materialien. Eine gleichzeitige Verarbeitung unterschiedlicher Materialien steht jedoch noch am Anfang der Entwicklung. Mit dieser Komplexität stellt auch die Charakterisierung der Architektur und speziell die Überprüfung integrierter Funktionalitäten eine Herausforderung dar.

Hinter den Architected Materials steht ein Gesamtkonzept, das die Kernkompetenzen Design der Strukturmerkmale, Fertigungstechnik und Charakterisierung umfasst. Für die Realisierung solcher Strukturen muss daher von hohen Entwicklungskosten ausgegangen werden. Gegenwärtig sind nur wenige Ansätze auf dem Weg in die Kommerzialisierung, allen voran komplexe Gitterstrukturen, die mittelfristig kommerziell verfügbar sein könnten. Deutlich langfristiger ist die Entwicklung praktisch einsatzfähiger, multifunktionaler Multikomponentenmaterialien, wie sie in sehr wenigen Forschungsarbeiten angedacht werden, einzuschätzen, da erst eine stärkere Bündelung der Forschungsbemühungen in den drei benötigten Kernkompetenzen (also Design, Fertigungstechnik, Charakterisierung) gelingen müsste.

Dr. Heike Brandt, Januar 2021

Biomimetische UAVs

Viele Probleme beim Betrieb insbesondere kleiner Drohnen werden sich durch eine zunehmende Orientierung der Entwicklungsbemühungen an aus der Natur gegriffenen Vorbildern lösen lassen.

Unbemannte Luftfahrzeuge (Unmanned Aerial Vehicles, UAVs), mittlerweile auch oft als Drohnen bezeichnet, lassen sich entweder per Fernsteuerung oder durch vorherige Programmierung steuern oder können autonom fliegen. Der Markt für UAVs ist in den letzten Jahren stetig gewachsen und wie in vielen anderen Bereichen geht auch dieser Trend mit einer zunehmenden Orientierung an aus der Natur gegriffenen Vorbildern einher. In der aktuellen Entwicklung dominieren Systeme mit Abmessungen im unteren Dezimeterbereich (Micro Aerial Vehicles, MAVs). Gerade wenn es um die Stabilität dieser kleinen Systeme bei ungünstigen Windverhältnissen geht, aber auch bei der Optimierung von Bewegungsabläufen, Wendigkeit, Robustheit, Energieeffizienz und Geräuschreduktion, steht bei der Entwicklung der dann als Biomimetic Micro Aerial Vehicles (BMAVs) bezeichneten Drohnen oftmals ein Tier Pate.

Das Anwendungsgebiet solcher bioinspirierter UAVs ist breit. Nicht nur für professionelle Aufgaben wie die Auslieferung von Päckchen, Filmaufnahmen oder die Überwachung von schwer zugänglichen oder gefährlichen Gebieten, sondern auch vermehrt für den privaten Gebrauch werden immer bessere, schnellere und leistungsfähigere Drohnen entwickelt. Als Vorbilder solcher bioinspirierter Luftfahrzeuge dienen oft Vögel, die mit speziell angepassten Flügelformen bestens auf die unterschiedlichen Bedingungen vorbereitet sind. Die Entwickler lassen sich sowohl von der Flügelform, dem Schlagmechanismus als auch der Bewegung des Flügels selber inspirieren. Bei Drohnen, die beispielsweise für eine Anwendung in der Landwirtschaft entwickelt werden, wird neben den aerodynamischen Fähigkeiten auch oft gleichzeitig die äußere Erscheinung des Vogels und das Verhalten von Raubvögeln nachgestellt, um Fressfeinde wie Möwen, Spatzen oder andere Tiere von

Anbaufeldern oder auch Fischfarmen fernzuhalten, ohne andere umwelt- oder tierschädliche Verfahren anwenden zu müssen. Auch Spielzeug-Drohnen werden natürlichen Vorbildern immer ähnlicher. Vogel- und libellenartige Drohnen für den privaten Gebrauch, gesteuert durch ein Smartphone, können schnell und wendig fliegen, und aus einiger Entfernung ist auf den ersten Blick nicht zu erkennen, dass es sich nicht um ein echtes Tier handelt.

Aber nicht nur in Vögeln sehen die Forscher Vorbilder für Flugkörper, auch Insekten, Fledermäuse oder „schwebende“ Fische wie Rochen dienen als Inspiration in der Drohnenentwicklung. Neben dem Vogelflug wird mittlerweile auch der teils sehr gut erforschte Flugmechanismus verschiedenster Insekten in unterschiedlichsten Modellen in der Technik umgesetzt. Die Universität Harvard hat beispielsweise einen kleinen Flugkörper entwickelt und ihn auf den Namen „RoboBee“ getauft. Diese winzige Drohne ist nur zwei cm groß und wiegt gerade einmal 100 Milligramm. An eine Biene jedoch erinnert lediglich die Form der vier Flügel. Mit diesen kann der kleine Roboter bis zu 170 Mal pro Sekunde schlagen, womit er dem natürlichen Vorbild (200 Mal) nur wenig nachsteht. Wie echte Insekten kann die Drohne in der Luft verharren, blitzschnell ausweichen oder sich auf Blättern niederlassen. Mittlerweile wird daran gearbeitet, dass sich RoboBee ohne Kabel und autonom fortbewegen kann.

In der Regel bewegen sich solche biomimetischen Flugkörper, wie ihre natürlichen Vorbilder, mit langsamem Geschwindigkeiten fort. Gerade bei kleinen Luftfahrzeugen treten dabei öfter Probleme mit der Bewältigung von Turbulenzen und Windstößen auf. Da kleine UAV gerne in Städten oder anderen Gegenden mit Hindernissen eingesetzt werden, kann dies zu Problemen und Beschädigungen führen. Ein weiterer ebenfalls kritischer Punkt bei den kleinen Mini-Drohnen ist die Einsatzzeit, in der sie sich in der Luft bewegen können. Meist ist der Akku bereits nach relativ kurzer Zeit leer. Auch hier werden immer wieder neue bioinspirierte Lösungen entwickelt, wie beispielsweise sogenannte getrennte Strömungsflügel, mit denen die Mini-UAVs gleichzeitig stabiler und länger fliegen können als andere Geräte mit ähnlicher Größe und Gewicht. Die von Vögeln und Insekten inspirierte, nicht glatte Form der Flügelseite erzeugt eine Ablösung der Luftströmung, welche bei großen Luftfahrzeugen Effizienzprobleme erzeugen würde, allerdings bei den Tieren und auch bei Mini-UAVs für mehr Stabilität und eine höhere Effizienz sorgt. Auch andere kleine Anpassungen der Flügel können einen großen positiven Einfluss auf die Auftriebsfunktion nach Flugmanövern haben.

Weitere spezielle Herausforderungen dieser unbemannten Luftfahrzeuge sind ein ausreichender Auf- und Antrieb, die Steuerung der autonomen Flugfähigkeit sowie die Bewältigung von komplexen Flugmanövern und Windböen. In der Natur findet man hier ein ausgereiftes Zusammenspiel aus aerodynamischer Form, Muskelaktivität und der zentralen neuronalen Steuerung. Neben der Nachahmung von Flügeln oder einzelnen speziellen Strukturen wird sich daher seit einigen Jahren in der technischen Umsetzung auch an verschiedenen Steuermechanismen aus dem (fliegenden) Tierreich orientiert. Künstliche neuronale Netze oder bio-inspirierte Algorithmen nutzen beispielsweise das optomotorische Prinzip von Insekten für Navigationsmodelle, ermöglichen autonomes Landen von UAVs oder verbessern, inspiriert von Stubenfliegen, das Höhensteuerungs- und Ausweichverhalten der Drohnen. Aus der Werkstoffentwicklung kommen neben dem Verbau von leichten Materialien auch weitere wichtige Impulse, beispielsweise künstliche Aktuatoren aus ionischem Polymer-Metall-Verbundwerkstoff, mit denen man Flügel muskelähnlich ansteuern kann.

Trotz aller Fortschritte sind die spezifischen Leistungsdaten der natürlichen Vorbilder heute im Einzelnen meist noch besser als die der entsprechenden technischen Umsetzungen, jedoch tragen die aktuellen Entwicklungen dazu bei, dass der Markt für biomimetische UAVs auch in Zukunft weiter wachsen wird.

Dr. Vanessa Hollmann, Februar 2021

Small Modular Reactors

Wegen ihrer Eignung zur CO₂-freien Grundlastversorgung mit elektrischer Energie gibt es international ein gesteigertes Interesse an technologischen Fortschritten in der Kernenergie. Eine wichtige Rolle spielen hier kleine modulare Reaktoren (SMRs).

Um die Ziele des Pariser Abkommens zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen zu erreichen, muss auch die CO₂-Emission in der Energieversorgung sinken. Kernkraft ist neben Wasserkraft aktuell die einzige CO₂-freie Energiequelle, die fossile Brennstoffe wie Kohle und Gas in der Grundlastversorgung ersetzen kann. Daher ist international das Interesse an technologischen Fortschritten in der Kernenergie wieder gestiegen. Eine wichtige Rolle spielen hier kleine modulare Reaktoren (SMRs), bei denen es spezifische Möglichkeiten zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs gibt. SMRs sind per Definition Kernreaktoren mit elektrischen Leistungen bis zu 300 MWe. Daneben wird auch an Mikromodular-Reaktoren (MMRs) mit einer Leistung von bis zu 10 MWe gearbeitet. Sowohl SMRs als auch MMRs befinden sich derzeit in verschiedenen Entwicklungsstadien.

Bereits seit den 1950er Jahren wurden kleine Kernreaktoren entwickelt, in der ehemaligen UdSSR sowie den USA beispielsweise für nukleare Schiffsantriebe in U-Booten und Eisbrechern. Trotzdem sind in der Vergangenheit darüber hinaus kaum SMRs zum Einsatz gekommen. In das Zentrum der medialen Aufmerksamkeit kamen sie erst wieder, als Russland das schwimmende Kraftwerk „Akademik Lomonosov“ vorstellte. Die „Akademik Lomonosov“ besteht aus zwei Reaktoren mit einer Nennleistung von je 35 MWe, welche im Mai 2020 den Regelbetrieb aufgenommen haben. Es liefert sowohl Wärme als auch Strom.

Die neuesten Entwicklungen im Bereich von SMRs werden hinsichtlich Konstruktion und Einsatzmöglichkeiten vielfach als „Game changer of Nuclear Industry“ bezeichnet. Ihre Leistungskapazität ist im Vergleich zu konventionellen Kernkraftwerken (KKW) relativ gering. SMRs sind für Anwendungsgebiete vorgesehen, in denen beispielsweise große Reaktoren

nicht lukrativ eingesetzt werden können. Das Spektrum der Möglichkeiten reicht von klassischer Stromversorgung an abgelegenen Standorten bis hin zu spezifischen Anwendungen, wie dem Betrieb von Meerwasser-Entsalzungsanlagen oder der Wärme- und Wasserstoffproduktion.

Das Design von SMRs ist wie bei konventionellen KKW sehr breit gefächert. Die meisten SMRs sind Leichtwasserreaktoren (LWR), die in ihrer grundlegenden Konstruktion aktuell bestehenden KKW ähneln, jedoch in verkleinertem Maßstab. Andere aktuelle Konzepte sind flüssigmetallgekühlten Reaktoren (LMR), Schwerwasserreaktoren, gasgekühlte Reaktoren und Salzschnmelzreaktoren.

SMRs sind kleiner als herkömmliche KKW und besitzen eine Modulbauweise, wodurch sie in Fabriken vorgefertigt werden können. Diese Module werden dann zum Einsatzort transportiert und können am Ende der Betriebszeit einfach zurückgebaut werden. Die meisten SMR-Entwürfe verwenden fortgeschrittene passive oder hybride Sicherheitstechnologien. Zusätzlich haben SMRs im Vergleich zu KKW ein deutlich geringeres nukleares Inventar.

Das Hauptmerkmal vieler SMRs ist das integrale Design. Das bedeutet, dass neben dem Kern auch die Druckhalter, Dampferzeuger sowie Steuerstabantriebe im Reaktordruckbehälter eine Einheit bilden. Eine andere Kategorie von SMRs, z.B. mobile Reaktoren wie die „Akademik Lomonosov“ (ein LWR), bestehen aus nur einer einzelnen Einheit, was eine unproblematische Verlegung an andere Standorte ermöglicht. In 2023 soll in den USA mit der Herstellung des SMR „NuScale“ (60 MWe, LWR), welcher auf einem LKW installiert werden kann, begonnen werden.

Aktuell sind mehr als 70 SMR-Designs für verschiedene Anwendungen bekannt, wobei den einzelnen Entwürfen aus Russland, China, Südkorea, Kanada, den USA und Argentinien die höchsten Einsatzaussichten zugeschrieben werden. In einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium befinden sich zwei industrielle Demonstrations-SMRs in Argentinien („CAREM“, ein integraler LWR mit 25 MWe) und China („HTR-PM“, ein gasgekühlter Hochtemperurreaktor (HTGR) mit 210 MWe). Diese sollen zwischen 2021 und 2023 ihren Betrieb aufnehmen.

Aktuell gibt es auch interessante neue Entwicklungen im Bereich der Mikromodular-Reaktoren. Wie bei SMRs gibt es auch bei MMRs verschiedene Funktionsdesigns, z.B.

Heatpipes („eVinci“ mit 3,5 MWe, USA; „MoveluX“ mit 4 MWe, Japan), wo ein Wärmerohr den Reaktor kühlt. Daneben existieren HTGRs („U-Battery“ mit 4 MWe, UK) und flüssigmetallgekühlte schnelle Reaktoren („Aurora“ mit 1,5 MWe, USA).

Die fortschreitende Entwicklung und erste Einsatzreife von SMR erfordern neue internationale Sicherheitsnormen und Schutzmaßnahmen, da SMRs nicht wie konventionelle KKW rein ortsgebundene, aber auch keine rein bewegten Reaktoren sind. So stellt sich am Beispiel der „Akademik Lomonosov“ die Frage, ob diese rechtlich als Seeschiff oder als feste kerntechnische Anlage behandelt werden sollte. Auch die Frage, wie mit einer Vermarktung von SMRs zwischen Kernwaffenstaaten und Nicht-Kernwaffenstaaten im Sinne des Nuklearen Nichtverbreitungsvertrages umgegangen werden soll, ist offen. Somit führt die Entwicklung und der Vertrieb von SMRs zur Notwendigkeit neuer gesetzlicher Regelungen. Darüber hinaus stellt das modulare, integrierte und damit unzugängliche System der SMRs unter Berücksichtigung der Vorfertigung der Einheiten auch die Überwachung der Brennstoffströme durch die Internationale Atomenergie Organisation (IAEA) und die Überprüfung der Reaktorsicherheit vor Herausforderungen. Bei SMRs, welche sich im Design deutlich von den bereits betriebenen Kraftwerken unterscheiden, werden hier neue Lösungen gefunden werden müssen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass viele der aktuellen SMR-Konzepte durch die modulare Bauweise auf ein integrales Design setzen, welches flexible Einsatzmöglichkeiten bietet, die Aufsichtsorgane allerdings vor Herausforderungen stellt. Sicherheitstechnisch basieren die meisten SMR-Konzepte weitestgehend auf passiven und damit inhärent sicheren Systemen. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass nur eine geringe menschliche Kontrolle notwendig ist (Funktionsweise beruht z. B. auf der Schwerkraft). In Bezug auf das Designkonzept ist zu erwarten, dass auf LWR-Technologie basierende SMRs in der näheren Zukunft die größten Realisierungschancen besitzen.

Dr. Marie Charlotte Bornhöft, Dr. Evgenia Lieder, März 2021

Raumtemperatursupraleiter

Trotz jüngster Erfolgsmeldungen ist man der Realisierbarkeit praktisch einsetzbarer Materialien, die unter normalen Umgebungsbedingungen keinen elektrischen Widerstand aufweisen, noch nicht wesentlich näher gekommen.

Materialien, die unter normalen Umgebungsbedingungen und hier insbesondere bei Raumtemperatur keinen elektrischen Widerstand aufweisen, gelten vielen als der heilige Gral der Festkörperphysik. Nach der Entdeckung des Phänomens der sog. Supraleitung an Metallen nahe am absoluten Temperatur-Nullpunkt vor mehr als 100 Jahren erlebte die Suche nach derartigen Werkstoffen mit den sog. Hochtemperatursupraleitern auf keramischer Basis in den 1980er Jahren einen regelrechten Hype. Dieser ist inzwischen allerdings einer deutlichen Ernüchterung gewichen. Aktuell stehen bestimmte wasserstoffhaltige Substanzen im Mittelpunkt des Interesses, erst recht nachdem eine derartige Verbindung synthetisiert werden konnte, die noch bei 15°C supraleitend ist. Allerdings gelang das nur unter extrem hohem Umgebungsdruck, der eine praktische Einsetzbarkeit ausschließt. Trotzdem haben die Bemühungen um diese Materialklasse der Suche nach praktikablen Raumtemperatursupraleitern wieder neuen Auftrieb gegeben.

Supraleiter verlieren ihren elektrischen Widerstand unterhalb einer für sie typischen sog. Sprungtemperatur vollständig und werden ideale Leiter. Die bereits seit 1911 bekannten „konventionellen“ metallischen Supraleiter besitzen so niedrige Sprungtemperaturen, dass eine aufwändige Kühlung mit flüssigem Helium (Siedetemperatur 4,2 K; 0 K = -273,15 °C) erforderlich ist. Sie sind im Moment immer noch die einzigen großtechnisch eingesetzten Supraleiter und werden etwa in Kernspintomographen zur Erzeugung hoher Magnetfelder genutzt. Das am häufigsten verwendete Material sind immer noch Niob oder bestimmte Niob-Legierungen, welche aufgrund ihrer ausgezeichneten Verformbarkeit die problemlose Herstellung von Drähten auch in einer für den Magnetbau erforderlichen Länge von mehreren Kilometern erlauben.

Die wichtigsten Vertreter der keramischen Hochtemperatursupraleiter basieren bis heute auf so genannten Cupraten (Kupferoxiden). Nachdem man zunächst Sprungtemperaturen über 30 K realisiert hatte, fand man innerhalb kurzer Zeit zahlreiche Stoffe, die bereits oberhalb der Siedetemperatur des flüssigen Stickstoffs (77 K) supraleitend werden. Diese zunächst rasante Entwicklung stagniert jedoch schon seit langem. Der derzeit höchste Wert für die Sprungtemperatur liegt für diese Materialklasse seit 1994 bei ungefähr 138 K. Ein weiteres wesentliches Problem für die Anwendung dieser HTSL ist 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. Trotzdem können Hochtemperatursupraleiter auf keramischer Basis inzwischen als Strombegrenzer in Kraftwerken praktisch eingesetzt werden. Als Leiter für elektrischen Strom stehen sie an der Schwelle zur industriellen Fertigung. So gibt es für den Stromtransport in regionalen Netzen in Deutschland bereits seit Jahren ein erfolgreiches Pilotprojekt. Das wichtigste heute etablierte Anwendungsfeld für Cuprate ist die hochgenaue Messung von Magnetfeldern z. B. im menschlichen Gehirn oder in der zerstörungsfreien Materialprüfung. Hier werden sie für so genannte SQUIDs verwendet, welche die Magnetfeldabhängigkeit des bei Supraleitern auftretenden quantenmechanischen Josephson-Effektes nutzen.

Neuen Schwung hat die Suche nach Raumtemperatursupraleitern erhalten, als Anfang dieses Jahrtausends hohe Sprungtemperaturen für bestimmte, während des Abkühlens unter Laborbedingungen stark komprimierbare Wasserstoffverbindungen (Hydride) theoretisch vorhergesagt wurden. Die Bemühungen um die Synthese derartiger Materialien führte in verschiedenen Zwischenschritten zum Erfolg, mit dem bisherigen Höhepunkt eines im Jahr 2020 entdeckten Materials mit einer Sprungtemperatur von 288 K, also von 15 °C. Auch wenn der genaue kristalline Aufbau dieses Werkstoffs noch nicht endgültig aufgeklärt ist, kann man hier wieder von einem metallischen Supraleiter sprechen. Nachdem davor Verbindungen aus zwei Elementen untersucht worden waren, ist er das erste in diesem Zusammenhang untersuchte dreielementige Hydrid. Seine Herstellung erfolgt zunächst durch Einstreuung von Kohlenstoff in einen mit Methan und Schwefelwasserstoff gefüllten Probenbehälter. In einer Diamantpresse entsteht dann daraus bei einem Druck von 2,7 Millionen Bar(!) das supraleitende Metall aus Kohlenstoff-, Schwefel- und Wasserstoffatomen.

Dass man genau dieses Material in keiner praktischen Anwendung einsetzen kann, ist offensichtlich. Allerdings steht die Forschung an Hydriden aus drei Elementen erst am Anfang, und in der nächsten Zeit sind hier weitere Rekorde zu erwarten, womöglich auch bei geringeren Umgebungsdrucken. Eine Unsicherheit bezüglich der weiteren Entwicklung gibt es auch im Hinblick auf die Supraleitung allgemein. Bis heute ist dieses Phänomen nicht in allen seinen Ausprägungen umfassend theoretisch beschrieben. Insbesondere gibt es keine Theorie, welche die Existenz von Raumtemperatursupraleitern ausschließen würde. Wenn diese aber auch praktisch einsetzbar sein sollen, müssen sie außerdem eine Reihe weiterer Eigenschaften in sich vereinen. Dazu gehören gleichzeitig hohe kritische Stromdichten und Magnetfelder, geeignete Herstellungsverfahren und adäquate mechanische Eigenschaften. Nicht zuletzt müssen sie natürlich auch unter weiteren normalen Umgebungsbedingungen (z. B. unter normalem Umgebungsdruck) funktionieren. Das große Interesse an solchen Materialien, welche die moderne Technik tiefgreifend verändern würden, zeigen allein die fünf Nobelpreise, die im Zusammenhang mit diesem Themenkomplex bisher vergeben worden sind. Bis zur praktischen Einsetzbarkeit von Raumtemperatursupraleitern wird sicher noch der eine oder andere diesbezügliche Nobelpreis dazu kommen.

Jürgen Kohlhoff, April 2021

Lifelong Machine Learning

Bereits mittelfristig werden die Methoden des Lebenslangen Maschinellen Lernens vielfältige Anwendungen in KI-Systemen finden und ein Schlüssel für deren erwartbar erheblichen Einfluss auf die technologische Entwicklung sein.

Als aktueller Forschungszweig des klassischen maschinellen Lernens (ML) hat sich Lifelong Machine Learning (LML) in letzter Zeit signifikant weiterentwickelt. Es baut auf den Methoden des ML auf, die wesentlich für die aktuellen Erfolge auf dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz (KI) verantwortlich sind und deren Anwendungsspektrum vom selbstfahrenden Auto bis hin zum digitalen Sprachassistenten reicht. Mittelfristig werden die Methoden des LML vielfältige Anwendungen in KI-Systemen finden und ein Schlüssel für deren erwartbar erheblichen Einfluss auf die technologische Entwicklung sein.

Bislang steht beim maschinellen Lernen der traditionelle Ansatz, das isolierte Lernen, im Mittelpunkt. Bei diesem Ansatz wird strikt zwischen Trainings- und Anwendungsphase unterschieden. Gelernt wird dabei ausschließlich in der Trainingsphase, die mit der Erstellung eines ML-Modells endet. Während der Anwendungsphase wird das Modell zwar genutzt, aber nicht mehr verändert. Im Gegensatz dazu ist das Ziel von LML, eine KI zu erschaffen, die kontinuierlich lernt, dadurch Wissen aus der Vergangenheit anhäuft und dieses dann in der Zukunft zur Problemlösung und zum weiteren Lernen nutzt. Damit können auch Erfahrungen während der Anwendung direkt in die Verbesserung des zugrundeliegenden ML-Modells einfließen, welches sich somit stetig verändert. Im Ergebnis wächst die KI mit den ihr über die Zeit gestellten Aufgaben und ist so später in der Lage, auch solche Aufgaben erfolgreich zu bearbeiten, für die sie ursprünglich nicht vorgesehen war.

LML orientiert sich an der Fähigkeit des Menschen, mit nur wenigen Beispielen effektiv zu lernen. Das in der Vergangenheit angeeignete Wissen – auch und besonders aus der Beschäftigung mit verwandten Aufgabenstellungen heraus – hilft dem Menschen dabei,

mit relativ wenigen Trainingsdaten und geringem zeitlichen Aufwand Neues zu erlernen und die eigenen Denkmodelle schnell und effektiv an eine neue Aufgabenstellung anzupassen. LML zielt darauf ab, diese Fähigkeit zum effektiven Lernen nachzuahmen, denn ohne sie kann ein KI-System nicht als wirklich intelligent bezeichnet werden. Es wird hierfür umfangreiches, breites Erfahrungswissen benötigt, um viel leichter und einfacher lernen zu können. Daher ist für LML Wissensanhäufung wichtig. Aus einer Vielzahl unterschiedlicher Aufgaben wird eine große Menge an Erfahrungen gesammelt, um daraus genau diejenigen Teile des Wissens auszuwählen, die beim Lernen einer neuen Aufgabe helfen können.

Hauptmerkmal von LML ist also der kontinuierliche Lernprozess. Idealerweise sollte dieser nicht nur in vordefinierten Umgebungen erfolgen, sondern er entfaltet erst im offenen Umfeld, der sogenannten Open World, sein Potenzial. Dort finden sich neuartige Herausforderungen, die vorher unbekannt waren und daher nicht explizit gelernt werden konnten. Dabei ist zu beachten, dass hier auf den ersten Blick nicht klar ist, ob die in diesem Umfeld vorhandenen Daten vertrauenswürdig und für den Wissenserwerb geeignet sind. Die reale Straßenumgebung für selbstfahrende Autos ist ein Beispiel für eine sehr typische dynamische und offene Umgebung. Der kontinuierliche Lernprozess muss dies berücksichtigen und das in der Vergangenheit erlernte Wissen gezielt auswählen, um es für zukünftiges Lernen zu nutzen. Im Idealfall sollte LML in der Lage sein, seine Lernaufgaben und Trainingsdaten in der Interaktion mit Mensch und Umwelt eigenständig zu finden, selbst wenn die Konfrontation mit einer neuen, bislang unbekannten Aufgabe nicht schleichend, sondern abrupt erfolgt und die Aufgabe mit ihren Trainingsdaten nicht von externen Systemen oder menschlichen Nutzern bereitgestellt wird. So werden beispielsweise fahrerlose Fahrzeuge sicherer, indem sie das Wissen aus früheren Erfahrungen und Interaktionen – einschließlich der Unfälle, toten Winkel und Schwachstellen, auf die sie während der Fahrt stoßen – auf die aktuelle Straßensituation anwenden. Jedoch sollten sich diese möglichst nicht von schlechten Angewohnheiten anderer Verkehrsteilnehmer oder von eigenen „kreativen“ Lösungsfindungen – z. B. Abkürzen durch Befahren einer Einbahnstraße in falscher Richtung – beeinflussen lassen.

Ein interessantes Resultat der Erforschung von LML-Konzepten für KI-Systeme ist die neue Generation des kommerziell erhältlichen Roboterhundes Sony Aibo (Artificial Intelligence Robot). Dieser nimmt durch Gesichts- und Spracherkennung die Reaktionen seines Besitzers auf und verbessert deren Interpretation durch LML. Ebenfalls werden so über verschiedene Sensoren Berührungen (z. B. Streicheln) immer genauer interpretiert. Damit soll sich Aibo

immer besser an seinen Besitzer anpassen und zudem eine eigene Persönlichkeit entwickeln können. Optional werden seine gesammelten Erfahrungen zusammen mit den Erfahrungen anderer Aibos in einer Cloud analysiert. Durch die Ergebnisse des virtuellen Rudels kann der Hund auch von den Erfahrungen seiner Artgenossen lernen.

Obwohl das Verhalten des Aibo auf LML basiert, sind die Möglichkeiten seiner Interaktionen mit der Umwelt stark beschränkt, so dass man hier noch nicht vom Einsatz in einer Open World reden kann. Dennoch zeigt der Aibo bereits heute das künftige Potential von LML auf. Mittelfristig gesehen wird LML breite Anwendung in vielen KI-Systemen finden. Für die Forschung ergeben sich für die nächsten Jahre noch viele ungelöste Problemstellungen, wie z. B. die Anfälligkeit einer KI für katastrophales Vergessen. Durch das Anreichern eines ML-Modells mit neuen Trainingsdaten wird in erlerntes Wissen eingegriffen. Bereits erlernte Verhaltensweisen können so gewissermaßen vergessen werden, indem diese im schlimmsten Fall durch neue vollständig ersetzt werden. Dies kann zu einem abrupten Leistungsabfall des Modells führen. Ziel ist es auch hier, die Fähigkeit des menschlichen Gehirns zu erreichen, eine große Anzahl verschiedener Aufgaben zu lernen, ohne dass sich das jeweils Gelernte gegenseitig negativ beeinflusst. Daher wird jedes LML-System immer einen Kompromiss finden müssen zwischen Plastizität, um neues Wissen aufzubauen, und Stabilität, um nicht katastrophal in das konsolidierte Wissen einzugreifen.

Dr. Dirk Thorleuchter, Mai 2021

Explainable Artificial Intelligence

Die Fähigkeit, Resultate und Funktionsweisen von KI-Systemen in einer für Menschen verständlichen Form zu erklären, soll in Zukunft wesentlich zu deren Verbreitung und Weiterentwicklung beitragen.

Verfahren der künstlichen Intelligenz (KI) werden in immer mehr Bereichen zum Bestandteil unseres alltäglichen Lebens. Verwendung finden sie heute z. B. schon zum Erkennen von Objekten auf Bildern oder zur Verarbeitung von Sprache. Dabei übertreffen sie teilweise bereits die Leistungsfähigkeit von Menschen. Die Ergebnisse von zurzeit eingesetzten KI-Systemen sind jedoch häufig nicht nachvollziehbar, bspw. warum auf einem Bild ein bestimmtes Objekt erkannt wurde. Im Themenfeld Explainable Artificial Intelligence (XAI) wird deshalb daran gearbeitet, die Resultate und Funktionsweise von KI-Systemen in einer für Menschen verständlichen Form zu erklären bzw. überprüfbar zu machen. Diese Fähigkeit ist eine wichtige Voraussetzung, um das Vertrauen eines Benutzers in das KI-System zu steigern. Darüber hinaus ermöglicht sie es, die Stärken und Schwächen des Systems besser beurteilen zu können. XAI befindet sich zurzeit noch in einem relativ frühen Entwicklungsstadium.

Die aktuellen Fortschritte im KI-Bereich sind ganz wesentlich durch den Einsatz von Verfahren des maschinellen Lernens (ML) erreicht worden. Diese erlauben es Computern, selbstständig anhand von Beispieldaten bestimmte Sachverhalte zu erlernen, z.B. ob auf einem Bild ein gewisses Objekt abgebildet ist. Die Basis für ML bildet jeweils ein Modell mit einstellbaren Parametern, wobei diese Parameter in der Lernphase im Hinblick auf die Beispieldaten optimiert werden.

Die derzeit sehr erfolgreichen ML-Modelle des Deep Learning basieren auf sog. künstlichen neuronalen Netzwerken mit einer sehr großen Anzahl von Parametern. Das erlernte Wissen ist aufgrund dieser hohen Komplexität des Modells typischerweise nicht verstehbar. Man

spricht daher bei Deep Learning häufig auch von einer Black Box. Andere derzeit verwendete ML-Modelle, wie z.B. die sog. Support Vector Machines und Random Forests, gelten vielfach ebenfalls als Black-Box-Modelle.

Allgemein scheint ein reziproker Zusammenhang zwischen der Leistungsfähigkeit eines ML-Modells und dessen Erklärbarkeit zu existieren. So sind die aktuell leistungsfähigsten ML-Modelle, wie z.B. Deep Learning, vielfach auch die am wenigsten erklärbaren, während besser nachvollziehbare Modelle, wie etwa Entscheidungsbäume, häufig schlechtere Ergebnisse liefern. Entscheidungsbäume sind hierarchisch strukturiert und enthalten für Menschen verständliche Regeln, die das Wissen widerspiegeln, das anhand der Beispieldaten erlernt wurde.

Ansätze im Bereich XAI können im Wesentlichen in transparente Modelle und Post-hoc-Erklärungen eingeteilt werden. Transparente Modelle werden von vornherein mit dem Ziel entworfen, zu einem gewissen Grad verständlich zu sein. Zu den transparenten Modellen gehören z.B. die genannten Entscheidungsbäume. Post-hoc-Erklärungen umfassen dagegen Verfahren, die die Ergebnisse von Modellen erklären können, welche nicht von vornherein als transparente Modelle entworfen wurden, wie z.B. typische Verfahren aus dem Bereich Deep Learning. Das zu erklärende komplexe Modell wird hierzu auf ein einfacheres Modell abgebildet, mit dessen Hilfe dann die Erläuterungen erzeugt werden, während das komplexe Modell nach wie vor die eigentlichen Ergebnisse liefert.

Eine große Bedeutung wird XAI insbesondere in sicherheitskritischen Anwendungsfeldern von KI zugesprochen. Sie wäre bspw. im medizinischen Bereich von Interesse, um die Gründe für eine mit Hilfe von KI-Systemen erstellte Diagnose, wie z. B. die Identifizierung eines Tumors auf einer Röntgenaufnahme, zu erklären. Bei autonomen Fahrzeugen könnte XAI u.a. helfen zu verstehen, warum ein solches Fahrzeug bei einem Unfall ein Objekt nicht korrekt erkannt hat. In der Justiz könnte sie z. B. bei der Prognose der Wahrscheinlichkeit für einen potenziellen Rückfall bei Straftätern anhand von sozialen Einflussgrößen verwendet werden. Im Rahmen der IT-Sicherheit wäre bspw. die Fähigkeit von Interesse, die Handlungsempfehlungen eines KI-Systems bei Cyber-Angriffen zu erläutern. In der Industrie könnte u.a. die Abschätzung, wann eine Wartung bei technischen Systemen erfolgen sollte, profitieren (Predictive Maintenance). Außerdem könnte XAI auch in der Wissenschaft eingesetzt werden, z. B. in der Arzneimittelforschung oder bei der Entwicklung von neuen Werkstoffen. Durch XAI könnten hier bspw. Hinweise auf potenzielle, bisher unbekannte

kausale Zusammenhänge innerhalb von Daten erhalten werden, die dann in Experimenten näher untersucht werden könnten. Weitere potenzielle Anwendungsfelder finden sich im Personalwesen bei der Auswahl von geeigneten Bewerbern, um hierbei eine faire Behandlung zu gewährleisten, oder im Finanzsektor im Hinblick auf die Beurteilung von Kreditanträgen.

Obwohl bereits merkliche Fortschritte auf dem Gebiet der XAI erzielt werden konnten, existieren trotzdem noch einige Herausforderungen. So gibt es bspw. noch keine allgemein anerkannte formale Definition davon, was unter Erklärbarkeit im Rahmen von XAI genau zu verstehen ist. Bereits existierende Ansätze beinhalten außerdem in erster Linie Erklärungen, die sich an die Entwickler von KI-Systemen wenden. Zukünftig sind aber auch vermehrt Erklärungen zu erwarten, die sich an andere Adressaten wenden, wie z. B. die Nutzer von KI-Systemen. Das augenblicklich hohe Interesse an XAI ist eng mit der gegenwärtigen Popularität von ML-Verfahren, insbes. von Deep Learning, verbunden. Ein Forschungsschwerpunkt liegt daher aktuell auf Erklärungen von derartigen Modellen. In diesem Zusammenhang werden vielfach Post-hoc-Erklärungen und visuelle Erklärungen eingesetzt. So werden bspw. mit Hilfe von sog. Heatmaps diejenigen Bereiche eines Bildes farblich hervorgehoben, die am stärksten das Ergebnis des Systems beeinflusst haben. Ein vielversprechender Ansatz zur zukünftigen Verbesserung von Erklärungen besteht generell darin, diese interaktiv zu gestalten. In einer Art von Konversation zwischen dem erklärenden System und dem Adressaten der Erklärung kann dieser dann auch individuelle Fragen stellen.

Dr. Klaus Ruhlig, Juni 2021

Bioinspirierte Unterwasserklebstoffe

Die Orientierung an biologischen Vorbildern wird die Eigenschaften von Klebeverbindungen in Gegenwart von Wasser bzw. Feuchtigkeit zunehmend verbessern. Besonders großer Forschungsbedarf besteht hier noch im Bereich der reversiblen Klebesysteme.

Klebeverbindungen sind für unser alltägliches Leben heute praktisch essentiell. Ohne sie sind Dinge wie Mobiltelefone, Photovoltaikmodule oder selbst Autos kaum mehr denkbar. Für die Zukunft sagen viele Experten sogar eine Vorherrschaft des Klebens als insgesamt dominierende Fügetechnik voraus. Besondere Herausforderungen gibt es heute allerdings immer noch für industrielle Klebeverbindungen in Gegenwart von Wasser bzw. Feuchtigkeit. In biologischen Systemen dagegen treten praktisch alle Haft- und Klebeverbindungen unter derartigen Umgebungsbedingungen auf und zeigen herausragende Eigenschaften. Das erklärt die Bemühungen um die Entwicklung bioinspirierter Unterwasserklebstoffe, die inzwischen auch schon zu Erfolgen geführt haben. Besonders großer Forschungsbedarf besteht hier noch im Bereich der reversiblen Klebesysteme.

Neben der Verwendung im medizinischen Bereich, beispielsweise zum Wundverschluss und zur Gewebsrekonstruktion, können bioinspirierte Unterwasserklebstoffe auch unter Wasser z. B. zum Verkleben an oder von Konstruktionen wie Bauwerken oder Schiffen sowie für Reparaturarbeiten eingesetzt werden. Zur Verbesserung von bioinspirierten Unterwasserklebstoffen muss jedoch weiterhin das Verständnis der Mechanismen von natürlichen, biologischen Unterwasserklebstoffen beständig erweitert werden, auch wenn gerade in den letzten Jahren hier bereits große Fortschritte erzielt wurden.

Aber welche besonderen Herausforderungen stellen sich bei der Entwicklung und Anwendung von bioinspirierten Unterwasserklebstoffen? Beispielsweise ist eine Vorbereitung

der zu verklebenden Oberflächen unter Wasser, wie z. B. Reinigung oder Trocknung, wenn überhaupt eher schwierig umzusetzen, trotzdem muss eine robuste Grenzflächenhaftung (also zwischen Klebstoff und Material) gewährleitet werden. Auch die innere Festigkeit des Klebstoffs, die Kohäsion, muss trotz des umgebenden Wassers garantiert werden. Weitere Schwierigkeiten stellen ein zu frühes Verkleben oder zu starkes Verdünnen des Klebstoffs in der wässrigen Umgebung dar.

Natürliche Lösungen der Unterwasserverklebung, zudem bei andauernden dynamischen und turbulenten Wasserbewegungen, wie z. B. bei den Tiden, sind sehr erfolgreiche Vorbilder, wenn es gilt diesen Herausforderungen zu begegnen. Daher werden die molekularen Mechanismen unterschiedlicher natürlicher Unterwasserklebstoffe verschiedener Organismen (wie z. B. von Muscheln, Köcherfliegenlarven, Rankenfußkrebsen und Sandburgenwürmern) untersucht, wobei sowohl wieder lösbare als auch dauerhafte hochfeste Klebeverbindungen von Interesse sind. Aktuelle bioinspirierte Forschungsansätze für Klebstoffzusammensetzungen basieren zumeist auf dem Molekül 3,4-Dihydroxy-L-phenylalanin, kurz DOPA, oder auf anderen sog. Koazervat-vermittelten Verklebungen. Koazervate sind kleine, kugelförmige Zusammenballungen von Molekülen mit membranartigen Oberflächen, die in stark verdünnten wässrigen Lösungen entstehen können.

DOPA scheint sehr häufig ein Schlüsselmolekül für die Haftung unter Wasser zu sein, wobei dennoch unterschiedliche chemische Bindungen eine Rolle spielen. Viele Forschungsansätze konzentrieren sich daher auf Proteine oder andere Polymere, die entweder DOPA oder DOPA-analoge Verbindungen enthalten. Häufig handelt es sich dabei um rein chemisch hergestellte Polymere, wie z. B. Hydrogele, die ähnliche chemische Strukturelemente beinhalten. Derzeit werden aber insbesondere auch biotechnologische Methoden verwendet, um solche Klebeproteine von Wasserlebewesen herstellen zu lassen. Solche Methoden (inkl. solchen aus der Synthetischen Biologie) erlauben zudem Modifikationen, die kleinere Strukturänderungen in den Klebeproteinen bewirken und somit das Kleben verbessern können oder zusätzliche Eigenschaften ermöglichen. Dies könnten z. B. eine höhere Toleranz der Klebeverbindung gegenüber zerstörenden Einflüssen oder selbstheilende Eigenschaften sein.

Neben den bisher genannten sind auch, wie eingangs erwähnt, reversible bioinspirierte Unterwasserklebstoffe von Interesse. Dazu können beispielsweise speziell modifizierte DOPA-Moleküle oder geckoähnliche Strukturen auf Silikonbasis verwendet werden.

Die Hafteigenschaften dieser Stoffe können z. B. über Temperaturänderungen gesteuert werden, was unter anderem für ein kontrolliertes Absetzen bzw. Aufnehmen von Objekten oder eine kontrollierte Fortbewegung kleiner Roboter im Wasser genutzt werden könnte.

Insgesamt weist das Feld der bioinspirierten Unterwasserkleb- und Haftstoffe ein hohes Potenzial auf. Viele der natürlichen, in biologischen Organismen vorkommenden Proteinssequenzen der Unterwasserklebstoffe wurden mittlerweile aufgeklärt. Auch das Verständnis der Struktur-Funktionsbeziehungen dieser Moleküle sowie die Langzeitstabilität der Stoffe wurde weiter verbessert. Auch weitere Erkenntnisse in Bezug auf die Sekretionskontrolle, die ein zu frühes Verkleben oder zu starkes Verdünnen des Klebstoffs in der wässrigen Umgebung verhindern, sowie zur Langzeitstabilität konnten erlangt werden. Zukünftige Arbeiten werden weiterhin versuchen bereits erfolgreich hergestellte DOPA- und Koazervat-vermittelte Klebstoffe zu verbessern. Zudem ist es auch denkbar mit Hilfe von Methoden der Synthetischen Biologie gänzlich neue Unterwasserklebstoffe zu entwickeln, deren Haftungsprinzip auf wichtige Charakteristika solcher biologischer Adhäsive zurückzuführen ist.

Im Bereich der reversiblen Unterwasserklebstoffe besteht noch weitaus größerer Forschungsbedarf und es werden noch verschiedene Prinzipien auf ihre generelle Tauglichkeit hin überprüft. Teilweise könnten auch im Trockenen funktionierende Haftmechanismen für den Einsatz unter Wasser adaptiert werden, wie beispielsweise geckoähnliche Fußstrukturen oder Formgedächtnismaterialien. Erste erfolgversprechende Ansätze konnten jedoch auch in diesem Anwendungsfeld bereits identifiziert werden.

Dr. Diana Freudendahl, Juli 2021

Mikroroboter

Mit einer verbreiteten Einsetzbarkeit von Robotern mit geometrischen Abmessungen von maximal einigen wenigen Zentimetern oder auch wesentlich darunter ist eher langfristig zu rechnen.

Mit den Erfolgen bei der Entwicklung mikroelektromechanischer Systeme (MEMS) im Allgemeinen haben auch die Forschungsaktivitäten zu sog. Mikrorobotern zugenommen. Damit sind mobile, navigierende Systeme mit geometrischen Abmessungen von maximal einigen wenigen Zentimetern oder auch wesentlich darunter gemeint (auch wenn Definitionen und Begrifflichkeiten hier international nicht einheitlich verwendet werden). Grundsätzlich könnten Mikroroboter bedingt durch die miniaturisierte Geometrie und das minimale Gewicht gänzlich neue Anwendungsgebiete erschließen. Trotz bereits existierender Labormuster und Prototypen bedarf es bis zu ihrer Einsatzreife aber noch vieler technischer Verbesserungen.

Als komplexes Mikrosystem sind Mikroroboter ausgestattet mit aufgabenspezifischen Aktoren, Sensoren, einer integrierten oder externen Steuerungseinheit mit Mikroprozessor und einer Energieversorgung. Mithilfe der Sensoren werden äußere Reize oder Signale für die Selbstüberwachung oder Kommunikation erfasst. Abhängig vom Anwendungsfeld und dem Aufgabengebiet werden biologische, chemische, elektrische, magnetische, mechanische, optische oder thermische Sensoren verwendet. Die Steuerungseinheit ist verantwortlich für die Verarbeitung und Auswertung des Datenflusses und leitet diese Informationen weiter, die in entsprechende Befehle für die Aktoren umgesetzt werden. Die Aktoren dienen schließlich der physischen Interaktion mit der Umgebung. Die Energie eines Mikroroboters kann durch eine externe Versorgung wie zum Beispiel über einen Kabelstrang oder eine drahtlose Energieübertragung sichergestellt werden, wobei im letzteren Fall induktiv oder kapazitiv durch elektromagnetische Felder eingekoppelt wird. Demgegenüber kann abhängig vom Anwendungsfall eine interne Energieversorgung

wie zum Beispiel durch ultradünne wiederaufladbare Lithium-Polymer-Batterien erfolgen. Eine weitere Alternative, bekannt als Energy Harvesting, ist die Möglichkeit des Gewinns der Energie aus der Umgebung, z.B. aus einer Temperaturdifferenz oder Vibrationseffekten. Diesbezügliche Technologien ermöglichen aber nur relativ geringe Energieausbeuten.

Je nach Auslegung der dafür zuständigen Aktoren kann die Fortbewegung von Mikrorobotern in einer Ebene, aber auch im dreidimensionalen Raum erfolgen. Hierbei existieren sieben Prinzipien der Fortbewegung: Piezoelektrische Beine ähnlich dem Gehen und Laufen, wurmartige Fortbewegung wie einer Schlange, Radantrieb ähnlich eines Fahrzeugs, Springmechanismus wie bei einer Grille, fliegende Fortbewegung nachgeahmt einer Biene, schwimmende Fortbewegung vergleichbar mit einem Fisch oder der Antrieb durch künstliche Muskeln.

Dank der vielfältigen Möglichkeiten zur Fortbewegung und aufgrund ihrer Abmessungen sind Mikroroboter für die unterschiedlichsten Einsatzgebiete denkbar. In der Medizintechnik könnten Sie im Körperinneren Medikamente zuführen oder biologisches Material am Zielort, wie an einem Organ oder auch Ablagerungen in den Blutgefäßen, entfernen. Mikroroboter könnten als Präzisionswerkzeuge in der Biotechnologie verwendet werden, bei der durch die feine Mikromanipulation beim Sortieren von Zellen oder eine Injektion von Fremdkörpern in eine Zelle die Genauigkeitsarbeit erleichtert wird. Für den Zusammenbau von Mikrobauteilen mit Kantenlängen kleiner als 1 mm oder eines komplexen Systems mit Abmessungen im Mikrometerbereich ist auch ein Einsatz in der Mikromontage und der Mikrofertigung möglich. Eine Anwendung für Inspektionsarbeiten an schwer zugänglichen Bauwerken, Infrastrukturen oder Maschinen und Anlagen ist ebenfalls denkbar, besonders auch bei gefährlichen Umweltbedingungen. Im Bereich des Rettungswesens könnten Mikroroboter in eingeschlossenen Räumen z.B. nach einem Gebäudeinsturz oder in nicht einsehbaren Höhlensegmenten in Gebirgsketten mit schwerer Zugänglichkeit nach Überlebenden suchen.

Weiteres potentielles Einsatzgebiet ist der Umweltschutz für die Überwachung von Depo-nien, die Begutachtung von landwirtschaftlich genutzten Flächen oder die Erkundung von unbekanntem Terrain zur Beurteilung der Umweltverhältnisse. Auch der Sicherheitsbereich bietet den Mikrorobotern ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten, wobei ihnen hier ihre schwere Erkennbarkeit, möglicherweise noch verbessert durch anpassbare Farben und Reflektivität, von Nutzen sein kann.

Die Forschungsaktivitäten im Bereich der Mikrorobotik haben besonders in den letzten 20 Jahren zugenommen. Zahlreiche Forschungsgemeinschaften entwickeln Mikroroboter mit unterschiedlichsten Antriebstechniken und Aufbauten als Labormuster und Prototypen mit erkennbarem Anwendungspotenzial. Die Prinzipien der Fortbewegung und ihre Funktion wurden in Testversuchen unter Beweis gestellt. Die möglichen Nutzlasten, Geschwindigkeiten und Reichweiten sind derzeit, bedingt durch die eingeschränkte Energieversorgung, jedoch noch stark begrenzt. Daraus folgernd können viele Anwendungen noch nicht bedient werden. Zusätzlich existieren noch weitere technische Herausforderungen. Eine Umsetzung von aktuellen Makrorobotern auf Mikroroboter durch Minimierung der Bauteile ist bedingt durch Skalierungsprobleme nicht möglich, da es bei einer Verkleinerung zu Störeinflüssen kommen würde, resultierend in einer Verschlechterung der Leistungsdaten des Mikroroboters. Aber die technische Umsetzung der Mikrofertigung und Mikromontage inklusive der Überwachung via Lichtmikroskop oder Rasterelektronenmikroskop stellt heutzutage kein Problem mehr dar. Die Herausforderungen für eine marktreife Fertigung liegen in einer automatisierten Massenproduktion mit kontrollierten und reproduzierbaren Operations-schritten im industriellen Maßstab.

Daher sind für einen ernstzunehmenden Einsatz solcher Mikroroboter weitere technische Verbesserungen nötig. Derzeit kann davon ausgegangen werden, dass realistische Einsätze eher langfristig zu erwarten sind. Denn neben den technischen Herausforderungen könnte es durchaus zu gesellschaftlichen Akzeptanzproblemen kommen, z. B. im Zusammenhang mit einer massenhaften Anwendung autonomer Mikroroboter in unmittelbarer menschlicher Umgebung.

Dr. Baycan Yildirim, August 2021

Living Materials

Die Kombination lebender Organismen und nicht lebender Materie könnte zukünftig zu Werkstoffen mit lebensähnlichen Fähigkeiten führen, also z.B. der Fähigkeit sich zu vermehren oder zur Selbstheilung.

Living Materials stellen einen neuen Ansatz in der Materialsynthese dar, der die Fachgebiete Materialwissenschaft, Synthetische Biologie und Biotechnologie innovativ miteinander verknüpft. Dabei werden lebende Zellen als aktive Komponenten verwendet, um nicht lebender Materie lebensähnliche Fähigkeiten zu verleihen, also z.B. die Fähigkeit sich zu vermehren, zur Selbstheilung, zur Anpassung an Umweltreize oder zur Herstellung medizinischer Wirkstoffe. Als lebende Zellen kommen dabei Bakterien, Hefen oder Algen zum Einsatz, die oftmals zuvor gentechnisch verändert wurden, während die nicht lebende Materialkomponente aus organischen oder anorganischen Polymeren sowie Mineralien oder Metallen bestehen kann. Living Materials befinden sich derzeit noch im Stadium der Grundlagenforschung, allerdings konnten einige ihrer vielen denkbaren Anwendungsmöglichkeiten bereits für Versuchszwecke realisiert werden.

So wurden für die Herstellung von lebenden Baustoffen Photosynthese betreibende Cyanobakterien auf einem Gerüst aus Sand und Gelatine angesiedelt, wobei letztere die Feuchtigkeit und die Nährstoffe für die Bakterien liefert. Diese nehmen CO₂ auf, um Energie zu gewinnen, und produzieren dabei Calciumcarbonat, wodurch ein Mineralisierungsprozess angestoßen wird, bei dem Sand und Gelatine zu einer festen Masse gebunden werden. Wird ein so gefertigter Stein in zwei Hälften zerbrochen, können beide Hälften innerhalb weniger Stunden wieder zu zwei vollständigen Steinen heranwachsen. Aus einem Stein konnten auf diese Weise mindestens acht Steine entstehen, wofür die Bakterien lediglich zusätzlichen Sand und Gelatine benötigten. Derartige lebende Baustoffe sind insbesondere für die Logistik und den Bau in abgelegenen und risikobehafteten Umgebungen von Interesse. Streitkräfte könnten einfach vorhandenen Sand und Wasser nutzen

und müssten nur noch Bakterien hinzufügen, anstatt Tonnen von Baumaterialien in Einsatzgebiete zu transportieren. Auf diese Weise wurde im Rahmen des Programmes Engineered Living Materials der US-amerikanischen DARPA ein 232 m² großer Prototyp einer temporären Landebahn gebaut.

Das Bakterium *Escherichia coli* wurde gentechnisch so verändert, dass es in der Lage war Biofilme zu produzieren, in die nicht lebende Materialien wie Gold-Nanopartikel integriert werden konnten. *E. coli*-Bakterien produzieren natürlicherweise Biofilme, die die darin eingebetteten Bakterien vor negativen äußereren Einflüssen schützen. Biofilme bestehen aus einer extrazellulären polymeren Matrix aus Cellulose und amyloiden Nanofasern, die jeweils aus einer sich wiederholenden Kette identischer Proteinuntereinheiten bestehen. Durch die Integration von Gold-Nanopartikeln in die Proteinketten entstanden Reihen von Gold-Nanodrähten, die Elektrizität leiten konnten und somit in Batterien und Solarzellen Anwendung finden könnten. Allerdings sind diese Filme sehr klein und dünn, was ihre Verwendung in großtechnischen Anwendungen erschwert.

Um in größerem Maßstab Living Materials herzustellen, wurde eine Mischung aus Bakterien und der Hefe *Saccharomyces cerevisiae* verwendet. In dieser symbiotischen Kultur aus Bakterien und Hefe produzieren die Bakterien große Mengen an Zellulose, die als Gerüst dient, in das entweder die Hefen selber oder nur die von ihnen produzierten Enzyme eingebaut werden. Die Hefen können gentechnisch so verändert werden, dass sie bzw. ihre Enzyme eine Vielzahl von Funktionen erfüllen können, wie das Erkennen und Abbauen von Umweltschadstoffen oder die Herstellung intelligenter Verpackungsmaterialien, die sich nach dem Gebrauch selber abbauen.

Ein weiteres Beispiel, in dem bakterielle Zellulose als Gerüst für die lebende Komponente des Living Materials dient, sind künstliche Blätter zur nachhaltigen Energiegewinnung. Auf ein Gewebe aus Bakterienzellulose wird mithilfe eines 3D-Druckers die Mikroalge *Chlamydomonas reinhardtii* aufgetragen. Die Bakterienzellulose sorgt für eine ausreichende mechanische Festigkeit des Materials, durch die Algen kann das Material Photosynthese betreiben, also mithilfe des Sonnenlichts Wasser und CO₂ in Sauerstoff und Energie umwandeln. Die Energie wird in den künstlichen Blättern in Form von Zucker gespeichert. Zusätzlich könnte das Material auch als nachhaltig produziertes und vollständig biologisch abbaubares photosynthetisches Biotextil Anwendung finden.

Im Bereich smarte Textilien wurde auch eine selbstbelüftende Sportbekleidung entwickelt, wobei auf dem Textil kleine Klappen aus Latex angebracht waren, die von beiden Seiten mit E. coli-Bakterien beschichtet waren. Bei Trockenheit schrumpfen die Zellen, während sie bei feuchten Bedingungen anschwellen und so bewirken, dass sich der Latex verbiegt. Wenn der Träger des Textils ins Schwitzen gerät, krümmen sich die Klappen und erzeugen so kleine Belüftungsöffnungen.

Auch in der Medizin eröffnen Living Materials neue Möglichkeiten, z. B. den therapeutischen Einsatz zur Abgabe von medizinischen Wirkstoffen in den Körper bei chronischen Erkrankungen. Dabei werden Bakterien mit Hilfe synthetischer Biologie zielgerichtet so programmiert, dass sie in der Lage sind medizinische Wirkstoffe zu produzieren und als Antwort auf bestimmte physiologische Reize hin freizusetzen. Die so programmierten Bakterien werden in ein implantierbares Trägermaterial eingeschlossen, welches durchlässig für den Wirkstoff, nicht aber für die Bakterien ist, welche somit dauerhaft im Trägermaterial verbleiben und als langfristige und personalisierte Wirkstoffproduzenten zur Verfügung stehen.

Auch wenn sich das Forschungsfeld der lebenden Materialien derzeit sehr schnell weiterentwickelt, sind bis zu einer verbreiteten Einsatzreife noch viele Probleme zu lösen. So müssen Fragen bezüglich der Sicherheit bei der Herstellung und Anwendung sowie der Nachhaltigkeit der neuen Living Materials berücksichtigt werden. Hierbei werden insbesondere gentechnisch veränderte Organismen zu regulatorischen Problemen führen, die den Fortschritt auf diesem Forschungsgebiet verlangsamen werden.

Dr. Britta Pinzger, September 2021

Augmented Sensing

Zunehmend werden direkt am oder im Körper befindliche Technologien zur Wiederherstellung, Verbesserung oder Erweiterung des menschlichen sensorischen Repertoires einsetzbar.

Unter dem Begriff Augmented Sensing (AS) wird zusammengefasst, was mittels direkt am oder im Körper befindlicher Technologien zu einer Wiederherstellung, Verbesserung oder Erweiterung des menschlichen sensorischen Repertoires führen kann. Dahinter verbirgt sich ein ganzer Komplex verschiedenster Konzepte mit unterschiedlichen Reifegraden, vom Stand der Technik bis hin zum Forschungs- und Entwicklungsstadium. Angetrieben wird die Entwicklung vor allem durch Fortschritte in der allgemeinen Mikrosystemtechnik und hier insbesondere der zunehmenden Miniaturisierung von Sensorik und Energieversorgung.

Eine Überschneidung gibt es mit Technologien, die für den Augmented-/Virtual-Reality-Bereich entwickelt werden. Hier ist die Abgrenzung, dass zum Augmented Sensing nur Technologien gezählt werden, die direkt in der realen Welt vom Menschen genutzt werden können. Die Umsetzung ist sehr divers und kann von Brillen über kleinste Wearables wie Kontaktlinsen, in Kleidung eingenähte Sensoren, Sensor-Tattoos auf der Haut bis hin zu implantierten Systemen wie Cochlea-Implantaten reichen.

Bei einem Großteil der im medizinischen Bereich anzuordnenden Maßnahmen geht es darum, fehlende oder verloren gegangene Sinneswahrnehmungen, hauptsächlich im visuellen und auditorischen System, wiederherzustellen. Die moderne Medizintechnik kann blinden Menschen mittlerweile beispielsweise durch künstliche Hornhäute, Retina-prothesen, Netzhaut-Chips oder visuelle cortikale Prothesen (implantiertes Elektrodenarray im Cortex) ermöglichen, entsprechende sensorische Informationen zumindest teilweise wieder wahrzunehmen. Von einer kompletten Wiederherstellung mit vergleichbarem sensorischem Input ist man aber noch weit entfernt. Bei tauben Menschen können Cochlea-

Implantate die Funktion des Innenohres ersetzen und dem Menschen wieder auditorischen Input ermöglichen. Im Bereich des Tastsinns gehen die Entwicklungen dahin, mittels Sensor-Patches und modernen Brain-Computer-Interfaces beispielsweise einer prosthetischen Hand eine Art Tastsinn zu verleihen und damit amputierten Personen einen Teil dieser Sinneswahrnehmung wiederzugeben.

Abgesehen von einer Wiederherstellung eines Sinnessystems gibt es auch die Spiegelung bzw. Übertragung von Sinneseindrücken auf ein anderes Sinnessystem. Was als natürlich vorkommendes Phänomen als Synästhesie bezeichnet wird, kann technisch umgesetzt betroffene Personen in die Lage versetzen, Sinneseindrücke auf eine andere Art wahrzunehmen. Bekannt sind zum Beispiel Systeme, die per Kamera aufgenommene visuelle Signale in eine 3D-Klanglandschaft übersetzen, oder Systeme, die Geräusche in vibrotaktile Reize übertragen können. Da es sich beim Gehirn um eine plastische Struktur handelt, ist es noch im Erwachsenenalter möglich, solch eine Spiegelung von Sinneseindrücken fest in die eigene Wahrnehmung zu integrieren.

Beim Augmented Sensing geht es aber nicht nur um die Wiederherstellung verlorener Sinne, sondern auch um die Verbesserung vorhandener Sinne und sogar um sensorische Erweiterungen. Im Tierreich findet man viele Sinnessysteme, die ein wesentlich größeres Spektrum aufweisen als das vergleichbare System des Menschen. Die bekanntesten Beispiele hierfür sind das Sehen von Ultravioletten- und Infrarot-Licht und das Hören von Ultra- und Infraschall. Aber auch beim Menschen überhaupt nicht vertretene Sinnessysteme, wie z.B. einen Magnetsinn, findet man bei vielen Meerestieren und Vögeln. Mittlerweile gibt es aus der Cyborg-Szene, in der es allgemein darum geht, die eigenen körperlichen Fähigkeiten zu verbessern und zu erweitern, auch schon marktreife Gadgets, mit denen man zusätzliche Sinnesinformationen wahrnehmen kann. Das Produkt „North Sense“, ein kleines Gerät, was ähnlich einem Piercing befestigt wird, lässt einen mittels Vibrationen den magnetischen Norden erkennen. Auch das Implantieren von kleinen Magneten in die Fingerspitzen, mit denen man magnetische Felder wahrnehmen kann, ist bei einigen Mitgliedern dieser Szene sehr beliebt.

Ebenfalls gibt es Pläne, mittels Cochlea-Implantaten das Hören zu filtern und damit besser zu fokussieren oder auch sinneserweiternde Features zu implementieren, indem z.B. durch ein Koppeln der Implantate mit anderen Geräten (z.B. Geigerzähler) zusätzliche Umweltinformationen wahrgenommen werden sollen.

Aber auch abseits der Cyborg-Szene gibt es eine Vielzahl von Bestrebungen das Sinnesrepertoire zu verbessern. So gibt es beispielsweise einen Navigationsgürtel (FeelSpace), der dem Träger durch 32 kleine Vibrationsmotoren ermöglicht, sich am magnetischen Nordpol zu orientieren, temporäre Tattoos am Körper oder Patches an der Kleidung, die auf gefährliche Substanzen (Kohlenmonoxid, Explosivstoffe, Chemikalien, u. v. m.) reagieren, Handschuhe die bei Kontakt mit Chemikalien leuchten oder Fingerspitzensensoren, die schnell und vor Ort Chemikalien analysieren und die Gefahr bewerten können. Solche sensorischen Features könnten bei Einsatzkräften, aber auch in Bereichen wie Lebensmittelkontrolle oder frühzeitiger Branddetektion Anwendung finden. Auch im Bereich des visuellen Systems gibt es viele verschiedene Ansätze, um die Sinneseindrücke zu verbessern und zu erweitern. Das Spektrum reicht von Kopfaufsätzen, die einen 360-Grad-Blick ermöglichen, bis hin zu Kontaktlinsen mit eingebautem Miniaturteleskop, welches das Gesehene durch Blinzeln um einen bestimmten Faktor vergrößern oder verkleinern kann. Auch Kontaktlinsen, die den Träger UV und Infrarot sehen lassen oder Informationen einblenden, sind in der Entwicklung.

Allgemein kann man sagen, dass die erfolgreiche Entwicklung von kleinsten Wearables unabdingbar abhängig ist von den Fortschritten im Bereich transparenter und flexibler Elektronik und flexiblen Mikrobatterien. Damit und aufgrund der stetigen Weiterentwicklung bei der Miniaturisierung verschiedenster Sensoren sind in den kommenden Jahren weitere Fortschritte im Bereich des Augmented Sensing zu erwarten.

Dr. Vanessa Hollmann, Oktober 2021

Biomimetische Riechsysteme

Neuartige biochemische Sensorkomponenten und moderne maschinelle Lernverfahren könnten künstliche Nasen endlich konkurrenzfähig zu ihren natürlichen Vorbildern werden lassen.

Elektronische Nasen (E-Nasen) sind technische Systeme, die Gassensoren und Mustererkennungsverfahren nutzen, um chemische Signale in der Luft zu detektieren und geruchlich (olfaktorisch) zu bewerten. Dabei geht es weniger um die präzise Bestimmung von Einzelkomponenten als vielmehr um die Identifikation von olfaktorischen Fingerabdrücken, die dann bekannten Geruchsqualitäten zugeordnet werden. Dem natürlichen Geruchsvermögen von Säugetieren, Fischen oder Insekten sind künstliche Riechsysteme bislang allerdings noch in vielen Leistungsparametern unterlegen. E-Nasen finden daher aktuell nur in wenigen, eng umrissenen Einsatzbereichen Anwendung. Wenn es um besondere olfaktorische Herausforderungen wie die Suche nach Verschütteten oder das Aufspüren von Explosivstoffen geht, verlässt sich der Mensch weiterhin meist auf den Geruchssinn von Tieren. Neuartige biochemische Sensorkomponenten und moderne maschinelle Lernverfahren ermöglichen es jedoch heute, die biologischen Prozesse der Geruchserfassung und -verarbeitung immer besser nachzuahmen und könnten E-Nasen zukünftig konkurrenzfähig zu den natürlichen Vorbildern werden lassen.

Anders als traditionelle chemische Analyseverfahren wie die Gaschromatographie und die Massenspektrometrie sind E-Nasen biomimetisch, orientieren sich also in Aufbau bzw. Funktion eng am biologischen Vorbild. Die Rolle der olfaktorischen Sinneszellen wird in technischen Riechsystemen von arrayartig angeordneten Gassensoren übernommen, die reversibel auf Geruchsstoffe in der Umwelt reagieren und das chemische Signal in ein elektronisches Signal umwandeln. An die Stelle der zentralnervösen Verarbeitungsstationen treten computerbasierte Mustererkennungs- und Klassifikationsverfahren, welche die Sensordaten analysieren und interpretieren. Um die Übersetzung der olfaktorischen Signa-

turen in Geruchseindrücke zu ermöglichen, muss das System im Vorfeld mit entsprechenden Beispieldatensätzen der zu erkennenden Geruchsqualitäten angelernt werden.

Gängige E-Nasen-Systeme nutzen häufig Sensoren auf der Basis von leitfähigen Polymeren oder Metalloxiden, deren elektrischer Widerstand durch die Adsorption und Desorption von bestimmten flüchtigen organischen Verbindungen (Volatile Organic Compounds = VOC) in charakteristischer Weise verändert wird. Neben chemoresistiven Nachweismethoden finden aber auch gravimetrische, optische und potentiometrische Messprinzipien Anwendung. Je nach Umsetzung weisen solche künstlichen Riechsysteme aber oft nur ein eingeschränktes Detektionsspektrum, eine geringe Empfindlichkeit, eine niedrige Spezifität und/oder ein geringes Auflösungsvermögen auf. Die Nutzung von biochemischen Sensorkomponenten stellt einen relativ neuen Ansatz dar, die Leistungsparameter von E-Nasen zu verbessern.

Konkret wird dabei der Einsatz von isolierten Geruchsrezeptoren, Duftstoff-Bindeproteinen und VOC-affinen Peptiden erforscht. Letztere sind kleine Moleküle aus 5 – 15 Aminosäuren, die räumliche Strukturen bilden, an die sich Geruchsstoffe mit komplementärer Geometrie nach dem sog. Schlüssel-Schloss-Prinzip anlagern können. Sie gelten unter anderem deshalb als besonders vielversprechend, weil sie sich aufgrund ihrer geringen Größe und Komplexität verhältnismäßig leicht und kostengünstig herstellen und manipulieren lassen. Dies ermöglicht das Design von VOC-affinen Proteinen, die eine hohe Spezifität gegenüber einer vorgegebenen Zielsubstanz zeigen. Ein biohybrider Sensor zur Detektion von Explosivstoffen konnte so bereits realisiert werden.

Bei der Interpretation der Sensordaten spielen maschinelle Lernverfahren eine zentrale Rolle. Anhand von Beispieldaten soll das System selbstständig Gesetzmäßigkeiten und Muster im olfaktorischen Signalraum erlernen und so idealerweise in die Lage versetzt werden, später auch unbekannte Eingangsdaten korrekt zu interpretieren. Für diese Aufgabe werden zunehmend Netzwerke aus sog. künstlichen Neuronen genutzt, die in ihrer Anordnung und Verknüpfung natürliche Neuroarchitekturen nachahmen. Künstliche neuronale Netze mit einer tiefen Architektur bilden beispielsweise die Basis für Deep Learning – eine Form des maschinellen Lernens, bei der Merkmalszusammenhänge sukzessive auf mehreren Hierarchieebenen analysiert werden. Durch den Einsatz eines solchen Netzwerks konnte Google in jüngster Vergangenheit z. B. bemerkenswerte Erfolge bei der automatisierten Voraussage von Geruchsqualitäten erzielen. Weitere Varianten von künstlichen neuronalen Netzen, die sich in ihrer Organisation und Funktion noch stärker an Verarbeitungszentren des Nervensystems anlehnen, werden aktuell weiterentwickelt.

systems orientieren, sind sog. Convolutional Neural Networks und Spiking Neural Networks. Auch hier konnten vor kurzem vielversprechende Ergebnisse bei der Klassifikation von Geruchsmustern demonstriert werden.

Leistungsstarke und zuverlässige E-Nasen könnten z.B. zur Sicherstellung der Qualität von Lebensmitteln und anderen Industrieprodukten oder zur Überwachung der Emissionen von Industrieanlagen eingesetzt werden. Ein besonders aussichtsreiches Anwendungsgebiet stellt die medizinische Atemgasanalyse dar. Über den Nachweis von charakteristischen Markersubstanzen in der Atemluft kann dieses nicht-invasive Diagnoseverfahren wichtige Beiträge zur Früherkennung von Organleiden, Krebserkrankungen und anderen Krankheiten leisten. Weitere Anwendungsfelder ergeben sich überall dort, wo sich der Mensch derzeit noch auf den Geruchssinn von Tieren (insbesondere Hunden) verlässt – beispielsweise bei der Detektion von Explosivstoffen und Waffen, bei der Suche nach Drogen und beim Aufspüren von vermissten Personen. Auch in der militärischen Kampfmittelaufklärung könnten E-Nasen zukünftig wertvolle Fähigkeiten bei der Detektion und Identifikation von B- und C-Kampfstoffen eröffnen. Bis es soweit ist, gilt es allerdings, die Reaktionszeit und das Regenerationsvermögen der Sensoren weiter zu steigern, die Nachweisempfindlichkeit und das Auflösungsvermögen weiter zu verbessern und die Robustheit und Zuverlässigkeit von biomimetischen Riechsystemen unter wechselhaften und mitunter widrigen Umweltbedingungen weiter zu erhöhen.

Dr. Carsten M. Heuer, November 2021

Hochentropie-Keramiken

Die neuen Entwicklungen im Bereich der Hochentropie-Keramiken sollten bereits mittelfristig zur Einsetzbarkeit von Werkstoffen mit wesentlich verbesserten Eigenschaften in Raumfahrtsystemen oder Hochleistungsbatterien führen.

Mit den sog. Hochentropie-Keramiken (High-Entropy Ceramics = HEC) rückt seit einigen Jahren eine neue Werkstoffgruppe in den Fokus des wissenschaftlichen Interesses, von der man sich wesentliche Verbesserungen im Hinblick auf mechanische, aber je nach Typ auch funktionale Eigenschaften wie z. B. die Ionenleitfähigkeit erwartet. Bereits mittelfristig kann mit auf HEC basierenden Produkten in der Raumfahrt oder in Hochleistungsbatterien gerechnet werden. Gerade auch im wehrtechnischen Kontext könnten solche speziell für den Einsatz in extremen Umgebungen erforschten Werkstoffe sowohl in massiver Form als auch als Beschichtungen vielfältige Anwendungsmöglichkeiten bieten.

HEC enthalten im Vergleich zu etablierten Hochleistungskeramiken (z. B. Bornitrid oder mit Zirkonoxid verstärktes Aluminiumoxid) ungewöhnlich viele verschiedene Komponenten. Diese mindestens vier, meist mehr Komponenten sind zu annähernd gleichen Anteilen in der Keramik enthalten. Aufgrund ihrer näherungsweise statistisch homogenen Verteilung innerhalb der kristallinen Struktur ergeben sich sehr viele gleichwertige Kombinationsmöglichkeiten bezüglich der Atome auf den benachbarten Gitterplätzen. Mit genau dieser Vielfalt ist, wie schon zuvor für Legierungen gezeigt, die Stabilität solcher hochentropischen Keramiken verknüpft. Die Bezeichnung HEC beruht auf der hohen Entropie dieser Werkstoffe, die generell ein Maß für die Gesamtzahl an solchen Anordnungsmöglichkeiten darstellt. Diese völlig neue Art von Werkstoffen wird daher als strukturell geordnet und kompositorisch ungeordnet beschrieben.

Dieser Zusammenhang wurde erstmalig 2015 für Keramiken nachgewiesen, deren Ausgangskomponenten unterschiedliche Oxide waren. Seither konnte bereits für viele weitere

chemische Untergruppen (Boride, Karbide, Nitride und kürzlich Aluminate, Zirkonate sowie Silizide) Eigenschaftskombinationen nachgewiesen werden, die die der individuellen Ausgangskomponenten übertreffen. Sie weisen beispielsweise besondere mechanische Eigenschaften auf und gelten somit als vielversprechende Option bei der Neuentwicklung von Schutzkonzepten.

Aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften, zu denen neben hervorragenden mechanischen Eigenschaften auch eine hohe chemische Beständigkeit sowie eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit zählen können, sind HEC interessante Kandidaten für Anwendungen bei extrem hohen Temperaturen. Solche Neuentwicklungen bei Ultrahochtemperaturkeramiken, von denen nur eine sehr begrenzte Anzahl an möglichen Materialsystemen zur Verfügung steht, könnten im Inneren von Turbinenantrieben Anwendung finden oder als thermische Barrieren in Automobilanwendungen sowie in der Luft- und Raumfahrt. In diesem Zusammenhang wird auch diskutiert, ob sie auch Belastungen, wie sie bei Hyperschallgleitern oder Hyperschallmarschflugkörpern zu erwarten sind, standhalten.

Im Bereich der Raumfahrt wäre der Schutz von Kommunikations- oder Aufklärungssatelliten vor schädlichen Einflüssen wie kosmischer Strahlung, Temperaturextremen und Trümmer einschlägen ein weiterer möglicher Anwendungsfall für HEC. Ein besonders wichtiger Aspekt ist die Entwicklung extrem harter und gleichzeitig zäher Materialsysteme mit verbesserten ballistischen Haltewirkung speziell für den Personen- und Fahrzeugschutz. Darüber hinaus könnten transparente HEC z.B. für den Schutz von Sensoren interessant werden.

Ein breites Spektrum an funktionalen Eigenschaften wurde vorwiegend bei oxidbasierten HEC nachgewiesen. Hierzu zählt eine hohe ionische Leitfähigkeit für Lithium- oder Natrium-Ionen bei Raumtemperatur, wie sie z. B. bei Batterien wünschenswert ist. Einige HEC zeigen auch vielversprechende katalytische Eigenschaften, z. B. als Katalysatoren für die Wasserspaltung zur sauberen Wasserstofferzeugung. In unterschiedlichsten Bereichen des Energiesektors könnten durch HEC neue Impulse gegeben werden. Erste im Labor realisierte HEC verfügen über ein starkes Absorptionsvermögen und eine große effiziente Absorptionsbandbreite und werden zur Manipulation elektromagnetischer Wellen in Betracht gezogen.

Die mögliche Anwendungsvielfalt dieser Werkstoffgruppe in Kombination mit den zu erwartenden Leistungssteigerungen bei relativ günstigen Herstellungskosten führt zu dem beobachteten akademischen Interesse und der damit verbundenen hohen Publikations-

dynamik. Ihre nutzbaren Eigenschaften rücken gerade erst in den Fokus, da das Forschungsgebiet sich zurzeit überwiegend noch im Stadium der Grundlagenforschung befindet. Derzeit liegt der Schwerpunkt bei der Diversifizierung der HEC, sowohl bezüglich möglicher kristalliner Strukturen als auch ihrer chemischen Zusammensetzung. Allein die Bandbreite der möglichen Kombinationen von Komponenten scheint unüberschaubar, hier liegt auch die größte Herausforderung. So spielen die Möglichkeiten der computergestützten Materialentwicklung eine wichtige Rolle bei der Auswahl der optimalen Ausgangszusammensetzung für ein nutzbares Endprodukt mit signifikant gesteigerten Leistungsparametern. Die computergestützte Vorhersage von anwendungsspezifischen, funktionalen Materialien und Strukturwerkstoffen, teils auch mit Hilfe von künstlicher Intelligenz, setzt sich in der Forschungslandschaft zunehmend durch und wird zu einer zusätzlichen Beschleunigung im Bereich der Materialwissenschaften beitragen. Darüber hinaus zählt sie zu den Schlüssel faktoren für die Kommerzialisierung der HEC.

Aufgrund der beobachteten herausragenden Eigenschaften werden sich einzelne Anwendungsgebiete zu Treibern bei der Entwicklung von HEC entwickeln. Dazu könnte zum einen die Raumfahrt gehören, da hier der Entwicklungsdruck besonders hoch ist und hohe Entwicklungskosten nicht per se abschreckend wirken. Zum anderen die Batterieindustrie, da hier eine enorm breite Anwendung mit entsprechenden Absatzzahlen hohe Profite verspricht. In diesen Bereichen kann unabhängig vom genutzten Materialsystem (z. B. HEC-Borid, HEC-Oxid) bereits mittelfristig mit Produkten gerechnet werden.

Dr. Heike Brandt, Dezember 2021

Eine wesentliche Kernkompetenz des Fraunhofer-Instituts für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (INT) ist die flächendeckende, systematische und kontinuierliche Technologiefrühaufklärung, um technologische Entwicklungen frühzeitig zu identifizieren und hinsichtlich ihres weiteren Potenzials zu bewerten. Besonders hervorzuheben ist dabei der Anspruch einer flächendeckenden Analyse aller möglichen relevanten Technologieentwicklungen in einem sogenannten 360°-Scanning-Prozess. Dieses Buch dokumentiert wesentliche Ergebnisse der diesbezüglichen Arbeiten aus den Jahren 2009 bis 2021.

Kontakt

Fraunhofer-Institut
für Naturwissenschaftlich-Technische
Trendanalysen

Appelsgarten 2 • 53879 Euskirchen

Telefon +49 2251 18-0

Telefax +49 2251 18-277

info@int.fraunhofer.de

www.int.fraunhofer.de

ISBN 978-3-8396-1825-7

