

Forschungs- und Technologieperspektiven 2030

Ergebnisband 2 zur Suchphase von BMBF-Foresight Zyklus II



Axel Zweck, Dirk Holtmannspötter, Matthias Braun,
Kerstin Cuhls, Michael Hirt, Simone Kimpeler

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

2020

2025

2030

Forschungs- und Technologieperspektiven 2030

Ergebnisband 2 zur Suchphase von BMBF-Foresight Zyklus II

Axel Zweck
Dirk Holtmannspötter
Matthias Braun
Kerstin Cuhls
Michael Hirt
Simone Kimpeler

Herausgeber:
Innovationsbegleitung und Innovationsberatung
der VDI Technologiezentrum GmbH
VDI-Platz 1
40468 Düsseldorf

im Auftrag und mit Unterstützung des
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Diese Publikation entstand im Rahmen des Dienstleistungsauftrages „Suchphase des neuen BMBF-Foresight-Prozesses (Zyklus II)“ der Abteilung Innovationsbegleitung und Innovationsberatung (IBB, ehemals Zukünftige Technologien Consulting, ZTC) der VDI Technologiezentrum GmbH (VDI TZ) und des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) im Auftrag und mit Unterstützung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), Referat 113.

Projektleitung: Prof. Dr. Dr. Axel Zweck (VDI TZ)
Durchführung: Dr. Dirk Holtmannspötter (VDI TZ)
Dr. Matthias Braun (VDI TZ)
Dr. Kerstin Cuhls (ISI)
Michael Hirt (VDI TZ)
Dr. Simone Kimpeler (ISI)

Autoren: Dr. Gerd Bachmann (VDI TZ); Prof. Dr.-Ing. Harald Bradke (ISI); Dr. Jan Brandt (VDI TZ); Dr. Matthias Braun (VDI TZ); Dr. Heinz Eickenbusch (VDI TZ); Dr. Michael Friedewald (ISI); Dr. Andreas Hoffknecht (VDI TZ); Dr. Dirk Holtmannspötter (VDI TZ); Dr. Bärbel Hüsing (ISI); Oliver S. Kaiser (VDI TZ); Dr. Oliver Krauß (VDI TZ); Dr. Thomas Reiß (ISI); Dr. Olav Teichert (VDI TZ); Dr. Christoph Zanker (ISI)

Dank gilt einer Vielzahl von Experten, die wertvolle Anregungen geliefert haben insbesondere durch Kommentare zu den einzelnen Kapiteln.

Zukünftige Technologien Nr. 101
Düsseldorf, im Mai 2015
ISSN 1436-5928

Für den Inhalt zeichnen die Autoren verantwortlich. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und die Vollständigkeit der Angaben. Die in der Veröffentlichung geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit der Meinung des BMBF übereinstimmen.

Außerhalb der mit dem Auftraggeber vertraglich vereinbarten Nutzungsrechte sind alle Rechte vorbehalten, auch die des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen photomechanischen Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie) und das der Übersetzung.

Titelbild: © peshkova / Fotolia.com. Das Bild wurde mit einem Blaufilter verfremdet.

VDI Technologiezentrum GmbH
Innovationsbegleitung und Innovationsberatung

VDI-Platz 1
40468 Düsseldorf

Die VDI Technologiezentrum GmbH ist im Auftrag und mit Unterstützung des
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) tätig.

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

TABELLENVERZEICHNIS

1	DER FORESIGHTPROZESS IN DER ÜBERSICHT	9
2	VORGEHENSWEISE	11
3	FORSCHUNGS- UND TECHNOLOGIEFELDER	13
3.1	Biotechnologie	14
3.2	Dienstleistungen	27
3.3	Energie	40
3.4	Gesundheit und Ernährung	54
3.5	Informations- und Kommunikationstechnologie	80
3.6	Mobilität	105
3.7	Nanotechnologie	128
3.8	Photonik	147
3.9	Produktion	172
3.10	Zivile Sicherheitsforschung	194
3.11	Materialwissenschaft und Werkstofftechnik	220
4	LITERATURVERZEICHNIS	267

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Drei Arbeitsschritte für die Suchphase von BMBF Foresight Zyklus II	100
--	-----

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele von IT-Diensten im Fahrzeugbereich	114
Tabelle 2: Zukünftige Anwendungsbeispiele im Bereich neue Fahrzeug- und Antriebskonzepte	119
Tabelle 3: Zukünftige Anwendungsbeispiele im Bereich Multimodaler Verkehr	123
Tabelle 4: Zukünftige Anwendungsbeispiele im Bereich Logistik und Internet der Dinge	126
Tabelle 5: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Nanoanalytik	131
Tabelle 6: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Nanomaterialien	136
Tabelle 7: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Nanobeschichtungen	140
Tabelle 8: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Nanostrukturierungen	143
Tabelle 9: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Nanosysteme	146
Tabelle 10: Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Produktion	151
Tabelle 11: Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele von Photonik im Bereich <i>Life Science</i> und Gesundheit	156
Tabelle 12: Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Information und Kommunikation	162
Tabelle 13: Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Beleuchtung und Energie	166
Tabelle 14: Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich <i>Emerging Technologies</i>	169
Tabelle 15: Übersicht über Vor- und Nachteile von generativen Fertigungsverfahren im Vergleich zu konventionellen Verfahren	179
Tabelle 16: Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich IuK-Technologien und Systeme	197

Tabelle 17: Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Sensor- und Detektionstechnologien	201
Tabelle 18: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich künstliche Intelligenz und Robotik	204
Tabelle 19: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Schutztechnik und Ausrüstung	208
Tabelle 20: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Simulation und Modellierung	211
Tabelle 21: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Biometrie und Mustererkennung	214
Tabelle 22: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Navigations, Beobachtungs- und Ortungstechnologie	217
Tabelle 23: Zukünftige Anwendungsbeispiele für Nichteisenmetalle	226
Tabelle 24: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen von Hochleistungskeramiken	232
Tabelle 25: Zukünftige Anwendungsbeispiele von Glas	234
Tabelle 26: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen von Polymeren	239
Tabelle 27: Zukünftige Anwendungsbeispiele von Biowerkstoffen	246
Tabelle 28: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen von Verbundwerkstoffen	251
Tabelle 29: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen von textilen Werkstoffen	255
Tabelle 30: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen von Funktionswerkstoffen	258
Tabelle 31: Zukünftige Anwendungsbeispiele von mineralischen Baustoffen.	263

1 DER FORESIGHTPROZESS IN DER ÜBERSICHT

Foresight ist ein Instrument zur langfristigen Vorausschau, um frühzeitig Orientierungswissen für strategische Entscheidungen zu generieren. Seit 2007 wählt das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) eine zyklische Vorgehensweise für seine Foresightprozesse. Für den letzten abgeschlossenen Foresightprozess des BMBF (Zyklus I, 2007-2009) stand ein technologieorientierter Ansatz im Mittelpunkt. Für den Zyklus II (2012-2014) standen zukünftige gesellschaftliche Entwicklungen und Herausforderungen im Vordergrund. Mit dem Abschluss der Suchphase des zweiten Zyklus des BMBF-Foresightprozesses liegen spannende Ergebnisse über zukünftige gesellschaftliche und technologische Entwicklungen mit dem Zeithorizont 2030 vor. Der Prozess thematisiert dabei mögliche Umbrüche in den Bereichen Gesundheit, Forschung und Innovation, Bildung, Wirtschaft, Politik und Arbeit. Diesen Foresightprozess führte die VDI Technologiezentrum GmbH gemeinsam mit dem Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung im Unterauftrag als *Büro Foresight* durch.

Zyklus II:
gesellschaftliche
Herausforderungen im
Fokus

2030 als Zeithorizont

Das BMBF erhält durch Foresight Orientierungswissen über mögliche zukünftige gesellschaftliche und technologische Entwicklungen, um entstehende Herausforderungen frühzeitig zu erkennen und bei Bedarf durch forschungs- bzw. innovationspolitische Maßnahmen zu adressieren. Die identifizierten Trends und Herausforderungen haben aus Sicht des durchführenden *Büros Foresight* nicht den Anspruch, durchgehend neu für das BMBF zu sein. Die Intention ist vielmehr, eine Diskussionsbasis für das Ministerium in seiner gesamten Breite bereitzustellen und Implikationen für die Forschungs- und Innovationspolitik sichtbar zu machen.

Orientierungswissen
für das BMBF

Die Erkenntnisse des Foresightprozesses sind aber nicht nur für öffentliche Forschungs- und Innovationsaktivitäten interessant. Auch Unternehmen können daraus Herausforderungen und Perspektiven für die Zukunft ihrer Geschäftsfelder ableiten.

Orientierungswissen
für Unternehmen

Für den Foresightprozess wurde eine Vorgehensweise in drei Arbeitsschritten gewählt (vgl. Abbildung 1). Im ersten Schritt (A) wurden gesellschaftliche Trends und Herausforderungen mit Zeithorizont bis 2030 identifiziert. Die zentralen Ergebnisse des ersten Arbeitsschrittes wurden in Form von 60 Trendprofilen zu gesellschaftlichen Entwicklungen und 7 Themenkomplexen mit gesellschaftlichen Herausforderungen in Band 100 zusammengefasst.

Arbeitsschritt A:
60 Trendprofile sowie
7 Themenkomplexe
mit gesellschaftlichen
Herausforderungen

Der BMBF-Foresightprozess gliedert sich in drei Schritte

1. gesellschaftliche Trends und Herausforderungen identifizieren
2. Forschungs- und Technologieperspektiven zusammenstellen
3. Innovationskeime erarbeiten



Abbildung 1: Drei Arbeitsschritte für die Suchphase von BMBF-Foresight Zyklus II

Arbeitsschritt B:
11 Felder mit Forschungs- und Technologieperspektiven
(Band 101)

Im zweiten Arbeitsschritt (B) wurden Forschungs- und Technologieperspektiven mit besonderem Anwendungspotential identifiziert. Die wichtigsten Ergebnisse zu 11 Forschungs- und Technologiefeldern wurden in Band 101 zusammengestellt.

Arbeitsschritt C:
Geschichten aus der Zukunft zu
9 Innovationskeimen
(Band 102)

Aufgabe des dritten Arbeitsschrittes (C) war die Identifikation von neuen Herausforderungen an den Schnittstellen von Gesellschaft und Technik in Form von Innovationskeimen. Innovationskeime stellen eine Grundlage für neue mögliche Missionen der Forschungs- und Innovationspolitik dar. Zur Identifizierung der Innovationskeime sind die erarbeiteten gesellschaftlichen Herausforderungen (A) mit den Forschungs- und Technologieperspektiven (B) verknüpft worden. Um die zukünftige Bedeutung der finalen 9 Innovationskeime zu veranschaulichen, wurden zu ihnen beispielhafte Zukunftsbilder (Geschichten aus der Zukunft, Band 102) entworfen und zentrale Herausforderungen und Chancen skizziert.

In den folgenden Kapiteln werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse des ersten Arbeitsschrittes „Identifikation gesellschaftlicher Veränderungen“ dargestellt.

Wo in den Texten nur die männliche Form verwendet wurde, dient dies lediglich der sprachlichen Vereinfachung und impliziert gleichermaßen die weibliche Form.

2 VORGEHENSWEISE

Die 11 betrachteten Forschungs- und Technologiefelder wurden zu Prozessbeginn festgelegt. Sie basieren im Wesentlichen auf den Ergebnissen von BMBF Foresight Zyklus I und wurden um die Themen Zivile Sicherheitsforschung und Ernährung ergänzt. Die Strukturierung orientierte sich an den Bedarfsfeldern und den Schlüsseltechnologien der Hightech-Strategie. Die 11 Felder spannen für BMBF Foresight Zyklus II den Suchraum für Forschung und Technologie mit Lösungspotenzial für gesellschaftliche Herausforderungen auf:

11 Felder als
Suchraum

- Biotechnologie
- Dienstleistungen
- Energie
- Gesundheit und Ernährung
- Informations- und Kommunikationstechnologie
- Mobilität
- Nanotechnologie
- Photonik
- Produktion
- Zivile Sicherheitsforschung
- Materialwissenschaft und Werkstofftechnik

Für jedes dieser Forschungs- und Technologiefelder wurden mit Schwerpunktsetzung auf einen Zeithorizont bis 2030 potenzielle Anwendungspotenziale zusammengestellt. Suchkriterien waren dabei hohe Relevanz für Forschung und Technologie bis zum Jahr 2030, mögliche bahnbrechende Erkenntnisse, hohe Dynamik im Forschungsbereich und mit besonderer Gewichtung ein hohes technologisches Problemlösungs- bzw. Anwendungspotenzial. Von den vier Suchkriterien für prozessrelevante Anwendungen sollte mindestens ein Kriterium in hohem Maße erfüllt sein.

Suchkriterien

Die Suchstrategie wurde für jedes Forschungs- und Technologiefeld angepasst, d. h. die Quellen- und Methodenauswahl wurden festgelegt sowie geeignete Teilgebiete identifiziert. Für die Bearbeitung kamen verschiedene Recherchemethoden zum Einsatz. Neben der Auswertung von Fachliteratur und Veranstaltungen wurden Aktivitäten zentraler Akteure betrachtet sowie Experteninterviews durchgeführt.

Suchstrategie

Die Suche nach relevanten Anwendungen erfolgte durch interne Experten des Büro Foresight. Zur Qualitätssicherung wurden die Ergebnisse zu jedem Forschungs- und Technologiefeld abschließend in einem externen Validierungsprozess jeweils zwei bis drei anerkannten und unabhängigen Experten zur Prüfung vorgelegt.

Validierung

3 FORSCHUNGS- UND TECHNOLOGIEFELDER

11 Forschungs- und Technologiefelder wurden hinsichtlich ihrer langfristigen Forschungs- und Technologieperspektiven untersucht. Im Folgenden wird ein Einblick in die zentralen Ergebnisse gegeben. Für jedes Feld wurden aussichtsreiche Teilgebiete formuliert und für jedes Teilgebiet vorhandenes und zukünftiges Anwendungspotenzial anhand ausgewählter Beispiele skizziert.

Die 11 Forschungs- und Technologiefelder:



1. Biotechnologie



2. Dienstleistungen



3. Energie



4. Gesundheit und Ernährung



5. Informations- und Kommunikationstechnologie



6. Mobilität



7. Nanotechnologie



8. Photonik



9. Produktion



10. Zivile Sicherheitsforschung



11. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik



3.1 Biotechnologie

Biotechnologie
erforscht lebende
Organismen

Nutzung für
technische Zwecke

Die Biotechnologie erforscht lebende Organismen (Mikroorganismen und Zellkulturen, Pflanzen, Tiere, Menschen) und ihre Bestandteile (Enzyme und andere Proteine, DNA, RNA, Metabolite, Regulationsnetzwerke) und nutzt ihre Leistungen für technische Zwecke, d. h. für Forschungsmethoden, Verfahren, Produkte und Dienstleistungen. Die Hauptanwendungsbereiche liegen in Forschung und Entwicklung, Medizin und Gesundheit, Landwirtschaft, Lebensmitteln und Ernährung, industrieller Produktion, Umweltschutz, Analytik und Bioenergieproduktion. Für die Realisierung der Anwendungen leisten Gentechnik, Molekularbiologie, Bioinformatik, Systembiologie und Ingenieurwissenschaften wesentliche Beiträge.

Die relevanten Zukunftsthemen in der Biotechnologie lassen sich in vier Teilgebiete mit hoher Relevanz für Forschung und Innovation bis 2030 gruppieren: (1) biomassebasierte, nachhaltige biotechnische Produktion, (2) neue biologische Prinzipien mit Querschnittscharakter, (3) molekulare biologische Produktion und (4) neue Technologieplattformen.

Technologie-
plattformen
als neues Gebiet

Die ersten drei Teilgebiete sind bereits 2009 als besonders relevant identifiziert worden und beschreiben auch im Jahr 2013 künftige Entwicklungstrends noch adäquat. Innerhalb dieser drei Teilgebiete ergibt sich jedoch eine Reihe von neuen Entwicklungen. Zusätzlich lässt sich ein viertes Gebiet erkennen, das stark technologiegetriebene Trends und die Etablierung neuer, effizienter Technologieplattformen für die Nutzung der Biotechnologie beinhaltet.

3.1.1 Biomassebasierte, nachhaltige biotechnische Produktion

Biokatalysatoren

Die Verknappung fossiler Ressourcen und der Klimawandel erfordern eine Verbesserung der Energie- und Materialeffizienz in der industriellen Produktion sowie eine stärkere Nutzung erneuerbarer Ressourcen. Die Biotechnologie kann hierzu wichtige Beiträge leisten, da biotechnologische Prozesse unter milden Reaktionsbedingungen mit hoher Selektivität und Spezifität arbeiten und eine Vielfalt an biobasierten Rohstoffen nutzen können. Weil Biokatalysatoren beim Um-, Ab- und Aufbau natürlich vorkommender Substanzen ihre besonderen Stärken entfalten, kommt ihnen eine Schlüsselstellung bei der industriellen Nutzung von Biomasse zu.

Biofuels

Ein erster Teilbereich ist die Nutzung der Biotechnologie für die Verbesserung der Energie- und Materialeffizienz über den gesamten Produktlebenszyklus. Die Produktion von *Biofuels* sowie eine stärkere Integration der stofflichen und energetischen Nutzung von Biomasse gehören hierzu.

Biologische Produktionsplattformen umfassen bisher vor allem zellbasierte Systeme. Zellfreie Bioproduktionssysteme gewinnen derzeit an Aufmerksamkeit. Mit diesen wird es beispielsweise möglich, Substanzen herzustellen, die in zellbasierten lebenden Systemen nicht produziert werden können.

Zellfreie
Bioproduktions-
systeme

Zunehmende Bedeutung gewinnt auch die systematische und durchgängige Anwendung von Ingenieursprinzipien auf biologische Produktionssysteme. Im Sinne eines *Forward Engineering* werden die schon bewährten Prinzipien des *Metabolic Engineering* angewendet, um Produkte und Prozesse noch besser an die jeweiligen Anforderungen anzupassen. Die Vision ist, dass man auch in biologischen Systemen wie in der Technik zunächst aus Ingenieursperspektive ein Design entwirft, das dann im realen System umgesetzt werden kann. Viele dieser Ansätze laufen unter dem Stichwort „Synthetische Biologie“.

Synthetische Biologie

Ein drittes Themengebiet stellen Bioraffinerien der zweiten Generation dar. Hierzu wurde im vergangenen Jahr eine Roadmap Bioraffinerie 2012 des BMBF¹ entwickelt, die die entsprechenden Zukunftsvisionen aufzeigt.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Die hohe Relevanz für Forschung und Technologie und die Dynamik des Teilgebiets zeigen sich u. a. darin, dass die biomassebasierte nachhaltige Bioproduktion sowohl national als auch international zunehmend an strategischer Bedeutung gewinnt. Mit dem Konzept *Knowledge-based Bioeconomy* (KBBE), mit der Fördermaßnahme BioIndustrie 2021, durch den Bioökonomierat, im Aktionsplan Biomasse, in der Leitmarktinitiative der EU zu biobasierten Produkten, der „Nationalen Forschungsstrategie Bioökonomie 2030“ und der Politikstrategie Bioökonomie (2013) sowie der Roadmap Bioraffinerie 2012 wurde die Thematik umfassend aufgegriffen, kontinuierlich weiterentwickelt und aktuell durch weitere nationale, transnationale und internationale Fördermaßnahmen umgesetzt (z. B. „ERA-IB2: Industrielle Biotechnologie für Europa, unterstützt durch die EuroTransBio-Initiative“; „Bioökonomie International (*Bioeconomy international*) 2014“; „Innovationsinitiative industrielle Biotechnologie“).

Bioökonomie 2030

Bei der Anwendung der Biotechnologie für die Produktion von *Biofuels* bestehen die Herausforderungen darin, einerseits neue Rohstoffe, z. B. zellulosebasierte Ressourcen, zu erschließen, und andererseits die Produkteigenschaften so zu verbessern, dass die *Biofuels* zumindest gleichwertige Qualitäten wie konventionelle Kraftstoffe aufweisen und so direkt in etablierten technischen Systemen eingesetzt werden können. Derzeit verlaufen FuE-Aktivitäten zu *Biofuels* sowie zur stofflichen Nutzung

Produktion von
Biofuels

¹ Die Bundesregierung (2012): Roadmap Bioraffinerien, URL: http://www.bmbf.de/pub/roadmap_bioraffinerien.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.

Biomasse	<p>von Biomasse sowohl strategisch als auch operativ weitgehend getrennt. Dadurch werden wichtige Themen wie die komparative Vorzüglichkeit der energetischen bzw. stofflichen Nutzung von Biomasse, die Kaskadennutzung von Biomasse sowie die adäquate Berücksichtigung der jeweils unterschiedlichen sozioökonomischen und geopolitischen Aspekte strukturell vernachlässigt. Eine Herausforderung für die nähere Zukunft liegt daher in der stärkeren Zusammenführung beider FuE-Linien, zumindest auf strategisch-konzeptioneller Ebene. Darüber hinaus sind – vor allem, bei der Produktion von Biomasse in großindustriellem Maßstab – mögliche Wechselwirkungen mit der Lebens- und Futtermittelproduktion sowie der Biodiversität, sofern auf dieselben Landressourcen und Biomassequellen zurückgegriffen wird, zu berücksichtigen, wie dies auch in der Nationalen Forschungsstrategie Bioökonomie ausgeführt ist.</p>
Zellfreie Systeme	<p>Zellfreie Systeme für die biologische Produktion galten bis vor Kurzem als ein Nischenthema mit vor allem akademischer Relevanz. In den letzten Jahren hat sich das Thema jedoch mit hoher Dynamik entwickelt, sodass dieses Konzept inzwischen eine alternative Produktionsplattform für Fälle darstellt, bei denen zellbasierte lebende Systeme an ihre Grenzen stoßen.</p> <p>In den Ingenieurwissenschaften spielen die Konstruktionsprinzipien Standardisierung, Abstraktion (Reduzierung eines Problems nur auf seine relevanten Bestandteile) und Entkoppelung (Unterteilung eines komplexen Systems in weniger komplexe, voneinander unabhängige Subsysteme) eine wichtige Rolle. Die Anwendung dieser Prinzipien auf biologische Systeme erfordert eine verstärkte interdisziplinäre Vorgehensweise durch die Integration von Ingenieur- und Biowissenschaften, woraus letztlich eine erhebliche Dynamik für FuE-Aktivitäten entstehen kann.</p>
Integration von Ingenieur- und Biowissenschaften	<p>Wie in der Roadmap Bioraffinerie 2012 des BMBF ausgeführt, zeichnen sich Bioraffinerien durch ein explizit integratives, multifunktionelles Gesamtkonzept aus, das Biomasse als vielfältige Rohstoffquelle für die nachhaltige Erzeugung eines Spektrums unterschiedlicher Zwischenprodukte und Produkte (Chemikalien, Werkstoffe, Bioenergie inklusive Biokraftstoffe) unter möglichst vollständiger Verwendung aller Rohstoffkomponenten nutzt.</p>
Roadmap Bioraffinerie	<p>Bereits realisierte (kommerzielle) Anwendungsbeispiele einer biomassebasierten, nachhaltigen biotechnologischen Produktion, denen auch künftig ein großes Problemlösungspotenzial zukommen dürfte, sind daher bei den <i>Biofuels</i> zu finden (z. B. Alkohole als Kraftstoffe (Ethanol, n-Butanol), Biodiesel, Biogas, Alkane, Alkene). Aber auch Rohstoffe für <i>Biofuels</i> (beispielsweise durch die fermentative Umwandlung von Zellulose und Lignozellulose), Chemikalien aus Bioproduktion allgemein (hier sind Enzyme für Stoffumwandlungen in verschiedensten Produktionsprozessen bekannt), Feinchemikalien (hergestellt werden optisch reine Alkohole, optisch reine Vorstufen für komplexe Synthesen, Terpenoide, Polyketide, Alkaloide, Spezialenzyme o.ä.) und Bulkchemikalien (bishe-</p>
<i>Biofuels</i>	
Enzyme	

rige Bioproduktion z. B. bei Ethylen, Essigsäure, Glycerin, Milchsäure, Acrylsäure oder Furfural) haben bis 2030 noch ein großes Potenzial. Ebenfalls unausgeschöpft sind die Möglichkeiten der Biomaterialien: Hier sind bisher hauptsächlich Bioplastik oder Seide bekannt.

Pharmazeutische Industrie

Neue zellfreie biologische Produktionsplattformen werden es ermöglichen, natürliche Wirkstoffe herzustellen, die durch hohe Toxizität ausgezeichnet sind und beispielsweise in der Krebsbehandlung Anwendung finden könnten. Ein weiteres wichtiges künftiges Anwendungsfeld dieser Verfahren ist die Produktion von Membran-Proteinen, die in zellbasierten Systemen nur schwierig zu synthetisieren sind. Unter den Membran-Proteinen finden sich pharmakologisch sehr interessante Substanzen, die als Zielorte neuer Medikamente beispielsweise gegen Bluthochdruck-Erkrankungen fungieren. In der pharmazeutischen Industrie besteht ein großes Interesse an der Nutzung dieser Proteine für das Wirkstoffscreening.

Membran-Proteine

Aber auch die Maßschneidung biobasierter zellfreier Produktionsplattformen für nicht natürliche Wirkstoffe gewinnt an Bedeutung. Aufbauend auf den im industriellen Maßstab bereits etablierten einfachen enzymatischen Reaktionen werden diese Systeme zunehmend komplexer, z. B. durch Multienzymkomplexe und Reaktionskaskaden, integrierte Trennprozesse etc. Dies erfordert zusätzlich zur Optimierung der biologischen Komponenten auch die Entwicklung entsprechender Mess-, Steuer- und Regelungstechnik und -algorithmen, entsprechender Reaktoren (z. B. auf Basis der Mikrosystemtechnik) und deren Entwicklung im Hinblick auf industrielle Produktionsprozesse. Im Rahmen der Förderung der „nächsten Generation biotechnischer Verfahren“ werden entsprechende Ansätze durch das BMBF gefördert.

Nicht natürliche
Wirkstoffe

Chemie und Energie

Der Chemie- und Energiesektor ist aktuell und künftig der wichtigste Industriesektor für die Nutzung biomassebasierter Produktionsverfahren. Dabei muss in der chemischen Industrie zwischen Bulk- und Feinchemikalien unterschieden werden. Bulkchemikalien zeichnen sich durch hohe Produktionsmengen (Jahresproduktion > 20.000 t/a), aber niedrige Produktpreise und Gewinnmargen aus, wohingegen Feinchemikalien in kleineren Produktionsvolumina hergestellt werden (1-10.000 t/a), allerdings höhere Produktpreise und Gewinnspannen erzielen. Herstellungsverfahren für Bulkchemikalien sind seit Jahrzehnten etabliert, die Produktion läuft in eigenen Produktionsstätten. Der Preisdruck ist relativ groß, Gewinnmargen sind klein, der Spielraum für Innovationen ist somit eher gering. Bei Feinchemikalien herrschen eher kurzfristige Nachfragen nach einem spezifischen Produkt. Die Produktentwicklung erfolgt in einem relativ kurzen Zeitraum.

Bulkchemikalien

Feinchemikalien

Synthese von
produktionstechnisch
anspruchsvollen Fein-
chemikalien

Aufgrund der hohen Spezifität, der Möglichkeit, komplexe Synthesen in einem Herstellungsschritt und Synthesen von reinen optisch aktiven Substanzen durchzuführen, gelten biotechnologische Verfahren als besonders geeignet für die Synthese von produktionstechnisch anspruchsvollen Feinchemikalien. Biotechnologische Verfahren sind hier häufig chemischen Synthesen überlegen. Bei Bulkchemikalien überwogen bisher jedoch die Kosten- und Skalenvorteile etablierter konventioneller chemischer Verfahren. Deshalb wurden nur wenige Massenchemikalien biotechnisch hergestellt. Hierzu zählen beispielsweise Zitronensäure, Itaconsäure, Ascorbinsäure (Vitamin C), L-Glutamat oder als wohl bekanntestes und wirtschaftlich bedeutendstes Produkt Ethanol.

Plattformchemikalien

Aufgrund der zunehmenden Herausforderungen durch die Rohstoff- und Klimaproblematik bei gleichzeitig verbesserten und neuen wissenschaftlich-technischen Möglichkeiten biotechnologischer Produktionsverfahren hat sich die Einschätzung geändert, welche Bedeutung der Biotechnologie für die Produktion von Bulkchemikalien zuzumessen ist. Das Potenzial biotechnischer Verfahren, auch Bulkchemikalien herzustellen, wird zunehmend von Chemiefirmen ausgelotet. Zahlreiche großtechnische Anlagen befinden sich in verschiedenen Stadien der Planung, des Baus und des Betriebs. Dabei spielt das Konzept der sogenannten Plattformchemikalien eine zentrale Rolle. Plattformchemikalien können mit einer geringen Anzahl an Prozess-Schritten in großem Umfang aus Biomasse gewonnen werden und bilden die stoffliche Basis verschiedener Produktstammbäume von Industriechemikalien. Beispiele für Plattformchemikalien, bei denen eine besonders hohe Entwicklungsdynamik erwartet wird, sind Ethanol (C2-Körper: enthält 2 Kohlenstoffatome), Bernsteinsäure (C4), 1,4-Butandiol (C4), Fumarsäure (C4), Glutaminsäure (C5), Milchsäureethylester (C3) oder 1,3-Propandiol (C3).

Marktschätzungen für
den Chemiesektor

Dieser Trend dürfte dazu führen, dass sich die Bedeutung der biomassebasierten biotechnischen Produktion im Chemie- und Energiesektor bis zum Jahr 2030 und danach deutlich verstärken wird. So gehen Marktschätzungen für den Chemiesektor davon aus, dass sich der Anteil biobasierter Produkte am gesamten Chemiemarkt von derzeit 1% bis 5% in den Jahren 2025 bis 2030 auf 20% bis 50% erhöhen wird.

3.1.2 Neue biologische Prinzipien mit Querschnittscharakter

Bionik

Nutzung der
Biodiversität

Die Natur stellt eine Vielfalt von Strukturen und Funktionen bereit, die potenziell auch für medizinische oder technische Anwendungen nutzbar sind. Immer mehr Bedeutung gewinnen in diesem Zusammenhang einerseits die Bionik und andererseits die Nutzung der biologischen Vielfalt, also der Biodiversität. Hieraus ergibt sich eine unmittelbare Notwendigkeit für die Kombination möglicher künftiger technischer und medizinischer Nutzungsperspektiven mit nachhaltigem und umweltschonendem Wirtschaften, das einen Erhalt der Biodiversität gewährleistet. Um die Funktions- und Strukturvielfalt in natürlichen Systemen besser verstehen

zu können, werden zunehmend gesamthafte Analyseansätze auf diese natürlichen Systeme übertragen. Man spricht hierbei von „Ökosystem-omics“. Beispielsweise wird versucht, die Gesamtheit aller DNA-Funktionen, aller Proteinfunktionen, aller metabolischen Prozesse in einem definierten Ökosystem zu erfassen und zu analysieren.

„Ökosystem-omics“

Weitere Prinzipien beruhen auf RNA-Technologien, wobei inzwischen auch spezifische Funktionen der RNA interessant werden, die auf Aspekten der Epigenetik (vererbare Veränderungen der Genexpression ohne Veränderung der DNA-Sequenz) und Epigenomik basieren sowie auf einer Renaissance der Entwicklungsbiologie, insbesondere bezüglich ihrer Übertragung auf das Verständnis von Alternsprozessen. Die Entwicklungsbiologie untersucht Lebensprozesse und Mechanismen der ontogenetischen Entwicklung von Organismen, Organen, Geweben und Zellen. Hierbei gewinnen wahrscheinlich auch menschliche humane Stammzell-Linien, deren Klonierung jüngst gelungen ist, neben induzierten pluripotenten Stammzell-Linien und adulten Stammzellen an Bedeutung. Embryonale Stammzellen müssten in diesen Fällen nicht mehr verwendet werden.

RNA-Technologien

Epigenetik und Epigenomik

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Die Gesamtheit der von Lebewesen und Organismen-Gemeinschaften bereitgestellten biologischen Funktionen ist bislang nur unvollständig bekannt. Zugleich werden neuartige Methoden breit verfügbar, die eine neue Qualität der Untersuchung und Charakterisierung der Biodiversität ermöglichen. Aufbauend auf der informationstechnischen Vernetzung der weltweit bestehenden Organismen-Sammlungen und der konzeptionellen Weiterentwicklung der Klassifikation und Taxonomie ergibt sich hohe FuT-Relevanz für die vergleichende Erforschung der Vielfalt der Funktionen und natürlichen Problemlösungen in einer großen Zahl von Organismen (z. B. Vielfalt der genutzten Regulationsmechanismen, Biokatalysatoren, Anpassungen an besondere Bedingungen, Interaktionen in Lebensgemeinschaften). Hierfür müssen fortgeschrittene Methoden zur funktionellen Analyse der Organismen-Vielfalt (z. B. hocheffiziente DNA-Sequenzier-Verfahren, Transkriptom-, Proteom- und Metabolom-Analyseverfahren, bildgebende Verfahren und molekulares *Imaging*) auf der Ebene von Lebensgemeinschaften, Arten und auf subzellulärer Ebene weit über „gängige“ Modellorganismen hinaus eingesetzt werden. Insgesamt sind diese technologischen Faktoren die treibenden Kräfte und entfalten eine hohe Dynamik.

Vergleichende Erforschung der Vielfalt von Organismen

Wissenschaftliche Erkenntnisse des letzten Jahrzehnts zeigen, dass RNA-Moleküle in Organismen – unerwarteterweise – vielfältige strukturelle, katalytische und regulatorische Funktionen von zentraler biologischer Bedeutung ausüben. Hieraus ergibt sich sowohl eine hohe FuT-Relevanz und Dynamik als auch die Erwartung, weitere wesentliche Erkenntnisgewinne zu erzielen.

RNA-Moleküle

Epigenetik

Kohärentes
Forschungsfeld

Die Epigenetik stellt einen grundlegenden und neuartigen Mechanismus dar, wie Gene in Abhängigkeit von Umwelteinflüssen in ihrer Aktivität moduliert werden können. Die Mechanismen umfassen DNA-Methylierung, posttranslationale Histonmodifikationen, Regulation durch ncRNAs. In den letzten Jahren hat sich das Feld von einer „Sammlung exotischer Fallbeispiele“ zu einem kohärenten Forschungsfeld mit beträchtlichem wissenschaftlichem und wirtschaftlichem Potenzial und hoher FuT-Relevanz entwickelt. Zur Ausschöpfung des Potenzials erscheint jedoch eine stärkere Vernetzung von Grundlagenforschung und klinischer bzw. pharmakologischer Kompetenz (translationale Forschung) erforderlich.

Entwicklungsbiologie

Die Entwicklungsbiologie ist derzeit vor allem durch zwei Trends gekennzeichnet. Zum einen geht es um die Übertragung der an Modellorganismen gewonnenen Erkenntnisse in die klinisch orientierte Forschung am Menschen, zum anderen um die Erforschung der Veränderung von Lebensprozessen über die gesamte Lebensspanne hinweg. Um die Altersabhängigkeit der verschiedenen Lebensprozesse und die zugrunde liegenden Mechanismen bis auf molekulare Ebene aufzuklären, müssen Kohorten-Biobanken und -Datenbanken als Forschungsinfrastruktur aufgebaut werden. Diese Trends sind gleichzeitig die treibenden Kräfte für die künftige Dynamik des Feldes.

Entsprechende Forschungsarbeiten werden durch das BMBF vor allem im Rahmen der Medizinischen Genomforschung gefördert.

Wenige Beispiele
heute schon
realisiert

Insgesamt handelt es sich bei diesem Teilgebiet um ein sehr zukunftsorientiertes Forschungsfeld mit großem Potenzial, in dem allerdings erst wenige Beispiele heute schon realisiert sind. So ist bisher ein RNA-Therapeutikum zur Behandlung von Augenerkrankungen (neovaskuläre (feuchte) altersabhängige Makuladegeneration (AMD)) auf dem Markt zugelassen (Pegaptanib (Macugen®)), ein weiteres befindet sich in den USA und Argentinien in der Präregistrierungsphase (Rintatolimod, ein Toll-like Rezeptor 3 Agonist für die Behandlung des chronischen Erschöpfungssyndroms), drei Produkte sind in der klinischen Phase 3². Im Falle der Therapeutika nach dem Prinzip der Epigenetik kann man zwischen Histon-Modifikationen als Wirkorte und DNA-Methylierung unterscheiden. Drei histonorientierte Medikamente sind aktuell auf dem Markt zugelassen, ein weiteres befindet sich im Stadium der Präregistrierung, eines in der klinischen Phase 3³. Bei Medikamenten, die

² eigene Recherchen des Fraunhofer ISI in der Datenbank Pharmaprojects, Stand 12.09.2013.

³ Ebd., Romidepsin (bis jetzt nur in den USA zugelassen) und Vorinostat (in USA, Japan und Canada zugelassen) sind Histondeacetylaseinhibitoren und werden für die Therapie von einigen Krebserkrankungen verwendet. Das dritte, auch in Deutschland zugelassene Medikament, Natrium-Valproat, hat die Histondeacetylaseinhibition nur als „Nebeneffekt“.

auf DNA-Modifikationen wirken, sind derzeit zwei auch in Deutschland zugelassene Produkte auf dem Markt⁴: 5-Azacitidinb und Decitabin (zwei Cytidinanaloga, die die DNA Methyltransferase inhibieren) für die Behandlung einiger Krebserkrankungen. Die Erwartungen an weitere Entwicklungen sind langfristig sehr hoch.

Chemie und Energie

Die Erschließung der Vielfalt biologischer Funktionen als biotechnologische Ressource eröffnet weitere Anwendungspotenziale für die Herstellung von Chemikalien und Energieträgern, welche die bereits im vorangegangenen Abschnitt skizzierten Möglichkeiten erweitern. Diese betreffen sowohl das Produktportfolio als auch die Produktionsplattformen und -prozesse.

Herstellung von
Chemikalien und
Energieträgern

Insgesamt handelt es sich um eine sehr langfristige Aufgabe, die auf intensive Kooperation bisher getrennter Forschungsgemeinschaften angewiesen ist. Forschungsaktivitäten zu Biodiversität werden bisher vor allem mit dem wichtigen Ziel des Erhalts von Lebensräumen und Lebensgemeinschaften vorangetrieben und weniger unter der Perspektive der Ressourcenbereitstellung für biotechnische Produktionsverfahren. Umgekehrt steht das Thema Biodiversität eher weniger im Fokus von Forschungsaktivitäten im Bereich der biotechnischen Produktionsverfahren.

Sehr langfristige
Aufgabe

Biodiversität

Pharmazeutische Industrie

RNA-Technologien erschließen RNA-Funktionen für wissenschaftlich-technische Zwecke und bieten ein großes Kommerzialisierungspotenzial, z. B. als Forschungstool in der Grundlagen- und pharmazeutischen Forschung, als Regulationsprinzip bei der Optimierung organismenbasierter sowie molekularer Produktionsverfahren, als Pharmawirkstoff für neuartige Therapieprinzipien sowie in der Analytik und Sensorik.

Zurzeit werden die Funktionen und Mechanismen epigenetischer Veränderungen in Embryonalentwicklung, Stammzellbiologie, Gewebedifferenzierung und -regeneration, Krebsentstehung, Alterung sowie im Zusammenspiel genetischer, Umwelt- und Lebensstilfaktoren bei Entwicklung, Gesundheit und Krankheit beim Menschen erforscht. Hierfür ist es erforderlich, Forschungswerkzeuge zur Identifizierung und Charakterisierung epigenetischer Veränderungen zu verbessern sowie Methoden zur gezielten Veränderung epigenetischer Markierungen in Modellorganismen (z. B. An-/Abschalten epigenetischer Programme, Setzen/Entfernen epigenetischer Markierungen) zu entwickeln. Epigenetische Veränderungen können auch als Target für neue Therapeutika dienen. Grundlegende Erkenntnisse über epigenetische Regulierungsprogramme lassen sich zudem für die Entwicklung neuer Therapieprinzipien (z. B. Zelltherapien mit Stammzellen, Beeinflussung der Geweberegeneration, Beeinflussung

Epigenetische
Veränderungen als
Target für neue
Therapeutika

⁴ Ebd.

der Prä- und Perinatal-Entwicklung) nutzen. Somit dürfte sich aus der Epigenetik-Forschung künftig ein erhebliches Anwendungspotenzial im Gesundheitswesen entwickeln.

Alternsprozesse

Die Kenntnis des Verlaufs und der Mechanismen von Alternsprozessen stellt die Basis für anwendungsorientierte Forschung am Menschen und die Entwicklung von Interventionen zur Beeinflussung von altersabhängigen Prozessen dar. An Alternsprozessen beteiligte Regulationsmechanismen sind auch in anderen Wissenschafts- und Technikgebieten von zentraler Bedeutung, sodass eine große Ausstrahlung und starke Synergie-Effekte von der Entwicklungsbiologie z. B. auf die Krebsforschung, die Ätiologie und Therapie multifaktorieller Krankheiten (z. B. Diabetes, neurodegenerative Krankheiten), auf die Stammzellforschung, regenerative Medizin u. a. zu erwarten sind.

3.1.3 Molekulare biologische Produktion

Aufbau von
Produkten und
Materialien aus
einzelnen Molekülen

Neue Produktionsformen werden entwickelt, die auf einer Miniaturisierung der Produktionsmittel selbst beruhen, und eine industrielle Fertigung komplexer Architekturen auch unter Nutzung der Selbstorganisation und Selbstanordnung biobasierter Komponenten und damit den Aufbau von Produkten und Materialien aus einzelnen Molekülen ermöglichen. Wesentliche Triebkräfte dieser Entwicklung sind eine zunehmende Miniaturisierung von Produktionsprozessen, die vermehrte Nutzung der biologischen Diversität als Ressourcen, die Anwendung von systembiologischen Erkenntnissen in ihrer Kombination mit der Synthetischen Biologie und eine zunehmende Verschmelzung der Biotechnologie mit der Nanotechnologie und der Mikrosystemtechnik.

*Microenergy
Harvesting*

Eine Herausforderung der Miniaturisierungsprozesse ist die Energieversorgung: Beim sogenannten *Microenergy Harvesting* geht es darum, Energie aus der Umgebung direkt für dezentrale Energiewandlungsvorgänge zu nutzen. Darüber hinaus stellt es eine technologische und strategische Herausforderung dar, die im Labor etablierten Ansätze der molekularen Produktion in industriell relevante Maßstäbe zu übertragen und Produkte bzw. Prozesse zu identifizieren, bei denen molekulare Produktionsprozesse den herkömmlichen Prozessen in Bezug auf Qualität und Wirtschaftlichkeit überlegen sein können.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

„Molekulatorientierte
Ausrichtung“ der
Forschung

Ein wesentliches Merkmal der molekularen biologischen Produktion ist ihre „molekulatorientierte Ausrichtung“ der Forschung (z. B. Biomaterialien, Energiewandlungssysteme, Produktionsplattformen, synthetische Biologie, Diversität biologischer Funktionen als Ressource). Diese grundlegende Charakteristik hat eine hohe Relevanz für zahlreiche andere Zukunftsthemen, die im Foresight-Prozess diskutiert werden. Hierzu zählen beispielsweise „Werkstoffe und Materialien“, „Nanotechnologie“ oder „Produktionsprozesse“. Somit kommt diesem Teilgebiet eine hohe

FuT-Relevanz nicht nur als eigenständiges Gebiet, sondern insbesondere durch seine „Ausstrahlung“ auf andere Zukunftsthemen zu. Erheblicher Erkenntnisgewinn für Wissenschaft und Technologie und Impulse für andere Forschungsgebiete sind zu erwarten.

Bei der molekularen biologischen Produktion handelt es sich um ein Teilgebiet der Biotechnologie mit großem künftigem Problemlösungspotenzial für verschiedene Sektoren, insbesondere das Gesundheitswesen und den Energie- und Chemiesektor. Allerdings werden diese Potenziale erst langfristig mit einer Zeitperspektive von 10 bis 15 Jahren realisierbar. Sieht man vom Teilbereich der zellfreien Produktionsplattformen ab, der im ersten Teilgebiet diskutiert wird, sind daher heute noch keine konkreten Anwendungen realisiert. Die Potenziale werden im Rahmen des BMBF-Strategieprozesses „Nächste Generation biotechnischer Verfahren“ sowie der zugehörigen Projektförderungen ausgelotet.

Molekulare
biologische
Produktion

Chemie und Energie

In den kommenden zehn Jahren werden grundlegende Forschungsarbeiten zur Bereitstellung molekularer Bauteile vor allem dem Erkenntnisgewinn für Wissenschaft und Technologie und als Impulsgeber für andere Forschungsgebiete dienen. Diese münden letztlich in eine molekulare Produktion und werden damit auch wirtschaftlich relevant. Bis allerdings Forschungsergebnisse erwachsen, die für industriell einsetzbare Verfahren, Produkte und Dienstleistungen nutzbar sind, wird noch ein Zeitraum von etwa zehn Jahren veranschlagt; für komplexe Systeme (z. B. biologische Systeme zur Energiewandlung, Minimalorganismen oder artifizielle Lebewesen) wird der Forschungshöhepunkt noch etwa drei bis fünf Jahre später angesetzt. Konkrete Anwendungen sind somit vor allem nach 2030 zu erwarten. Einige Anknüpfungspunkte hierfür werden im Folgenden skizziert:

Bereitstellung
molekularer Bauteile

Unter Nutzung der Diversität biologischer Funktionen als Ressource werden mithilfe der angewandten Systembiologie und der synthetischen Biologie miniaturisierte Produktionsplattformen und molekulare Bauteile bereitgestellt. Die Systembiologie zielt auf das Verständnis biologischer Systeme in ihrer Gesamtheit ab und erarbeitet ein integriertes Bild aller molekularen Einzelkomponenten und regulatorischen Prozesse über alle Ebenen, vom Genom über das Proteom, zu den Organellen bis hin zum Verhalten und zur Biomechanik des Gesamtorganismus. Hierzu werden mathematische Konzepte auf biologische Systeme angewandt und ein neuer Forschungsansatz implementiert, dessen Kern ein iterativer Prozess zwischen Laborexperiment und Modellierung im Computer darstellt.

Angewandte
Systembiologie

Pharmazeutische Industrie

Die synthetische Biologie verfolgt im Zusammenspiel mit der Systembiologie die Herstellung und Nutzung von Lebewesen mit neuen Eigenschaften durch Integration künstlicher Systeme und oder über „Minimalorganismen“. Letztere sind Organismen, die auf genau jene Systemkom-

ponenten reduziert sind, welche zur Erfüllung der Funktion unerlässlich sind, für die der jeweilige Organismus maßgeschneidert wurde. Ziel ist es, mittel- bis langfristig standardisierte, vorgefertigte molekulare Bauteile (z. B. biomolekulare Schalter, Katalysatoren, Biomaterialien, Funktionsoberflächen, funktionale Moleküle, mit denen die Eigenschaften molekularer komplexer Strukturen gezielt beeinflussbar werden) bereitzustellen, die dann zu industriell nutzbaren Systemen kombiniert werden können.

„Artifizielle“
Systeme

Solche „artifiziellen“ Systeme könnten beispielsweise im biomedizinischen Bereich bei der Produktion neuer Pharmazeutika, Diagnostika und medizintechnischer Geräte Anwendung finden. Anvisiert ist auch die Entwicklung von Biomaterialien und Energieträgern, wobei bestehende (chemische und energetische) Produktionssysteme ergänzt bzw. ersetzt werden sollen. Um die autonome Energieversorgung miniaturisierter Produktionssysteme zu gewährleisten, müssen biobasierte Energiewandlungssysteme, die Umgebungsenergie nutzbar machen können, entwickelt werden. Eine besonders herausfordernde, aber vielversprechende Nutzung dieser molekularen Konstruktion wäre die technische Nutzung der Fotosynthese für die Energiegewinnung.

Technische Nutzung
der Fotosynthese

Trotz dieser zweifellos vorhandenen Potenziale und den damit verknüpften großen Erwartungen soll auch auf skeptischere Einschätzungen hingewiesen werden. Diese Vorbehalte beziehen sich zum einen konkret auf die Forschungsaufgabe, artifizielle Organismen zu konstruieren: Hier wird auf die Sicherheitsrisiken, die diese Organismen bergen können, sowie auf die ethische Problematik hingewiesen. Zum anderen werden grundlegende Bedenken geäußert, ob die synthetische Biologie wirklich Lösungsoptionen für industrielle Anwendungen bereitstellen können, die alternativen Ansätzen (z. B. der Optimierung natürlicher Systeme) überlegen sein werden. Weil in den nächsten Jahren der Fokus noch auf der Bereitstellung molekularer Systeme als Bauteile liegt, wird auf längere Sicht nur unter großer Unsicherheit beurteilt werden können, ob die in Aussicht gestellte Umsetzbarkeit in industrielle Anwendungen realisierbar sein wird.

Bedenken, ob
synthetische Biologie
wirklich
Lösungsoptionen
bereitstellen kann

3.1.4 Neue Technologieplattformen

Die schon seit einigen Jahren eingesetzte Verbreitung von gesamthaften Analysemethoden für biologische Funktionsebenen (*Genomics*, *Proteomics*, *Metabolomics* usw.) gewinnt weiter an Dynamik. Es wird immer einfacher, hoch parallelisiert eine große Datenmenge über biologische Systeme zu gewinnen. Diese datenintensive Forschung stellt einerseits eine gewaltige Informationsfülle zur Verfügung, die prinzipiell für medizinische und technische Anwendungen nutzbar wird. Andererseits besteht das Risiko, dass Daten und Analysen nur deshalb durchgeführt werden, weil sie möglich sind. Dringend erforderlich ist daher eine stärkere analytische und theoretische Durchdringung der grundlegenden bio-

Gesamthafte
Analysemethoden

Genomics
Proteomics
Metabolomics

logischen Prozesse und eine stärkere Kombination von technikgetriebener Datengewinnung mit hypothesengetriebener Forschung sowie eine kritische strategische Analyse derjenigen Probleme und Bedarfe, für die die technologische Option als Lösung propagiert wird. Ein Beispiel für diesen Entwicklungstrend ist der Kostenverfall der Genom-Sequenzierung. Im Jahr 2012 wurde das 1.000-\$-Genom erreicht (d. h. die Kosten für die Entschlüsselung des Genoms eines Organismus konnten auf 1.000 \$ gesenkt werden). Die Vision der Community lautet, dass ein Genom eines ganzen Organismus, also auch eines Menschen, für 10 \$ aufgeschlüsselt werden kann.

Vision der Community:
10-\$-Genom

Ein zweiter technikgetriebener Trend fokussiert sich auf die Aufklärung der Gehirnfunktionen. Schon vor über zehn Jahren wurde die Vorstellung eines gesamthaften Ansatzes zur Identifizierung aller Strukturen und Funktionen des menschlichen Gehirns formuliert und unter dem Stichwort „Cognome“ paraphrasiert.

„Cognome“

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Nach wie vor stellt die Funktionsaufklärung von Genom-Informationen eine große Herausforderung dar. So hat sich inzwischen gezeigt, dass aus den drei Milliarden Basen des menschlichen Genoms nur 20.000 Gene alle Proteine des Menschen kodieren, wohingegen die regulatorischen Funktionen der nicht codierenden Regionen bislang noch unzureichend aufgeklärt sind. Zentrale Herausforderungen bestehen jedoch auch auf der Datenverarbeitungs- und -speicherungsseite. Stichworte sind *Cloud Computing*, Qualitätssicherung von Datenbanken und -beständen, Multi-skalen-Modellierung biologischer Systeme, Datenschutz und -sicherheit, sozio-ökonomische, ethische und rechtliche Aspekte des Wissens bzw. Nichtwissens und des Transfers der gewonnenen Daten in die lebensweltliche Praxis.

Funktionsaufklärung
von
Genom-Informationen

Die Vision des *Brain Mapping* (Erforschung und Kartierung der strukturellen und funktionellen Organisation des Gehirns) hat erheblich an Dynamik gewonnen, so hat beispielsweise die Europäische Kommission das *Human Brain Project* als eines der beiden Leuchtturmprojekte ausgewählt, das in den nächsten zehn Jahren mit 100 Mio Euro pro Jahr versucht wird, die Gesamtheit aller Gehirnstrukturen und -funktionen aufzuklären und zu verstehen. Längerfristig könnte daher das personalisierte *Brain Mapping*, d. h. die Kartierung des individuellen Gehirns eines einzelnen Menschen, zu einem wichtigen Thema werden.

Vision des
Brain Mapping

Insgesamt unterstreichen diese Entwicklungen die große FuT-Relevanz und Dynamik des Teilgebiets. Entsprechende Forschungsarbeiten werden durch das BMBF vor allem im Rahmen der Medizinischen Genomforschung, der Systemmedizin und des „Nationalen Bernstein Netzwerks Computational Neuroscience“ (NNCN) gefördert.

Pharmazeutische Industrie

Paralleltechnologien
Genom-Sequenzierung
etabliert

Paralleltechnologien sind heute bereits die Basis für die biologische Forschung, die der Aufklärung von Krankheitsmechanismen zugrunde liegt. Die Genom-Sequenzierung zählt inzwischen schon zu den etablierten Verfahren, z. B. ist die Hochdurchsatz-Sequenzierung auf einem Stand, die Sequenzierung des proteinkodierenden Bereichs eines menschlichen Genoms mit Geräten/Technologie von Life Technologies oder Illumina in wenigen Stunden für weniger als 1.000 Euro zu gewährleisten, und sie unterstützen die personalisierte Medizin oder die Charakterisierung von Tumor-Subtypen sehr stark. Allerdings werden sie auch weiterhin ständig im Hinblick auf Effizienz- und Qualitätssteigerung sowie Kostenreduktion optimiert.

Proteomanalyse erst
am Anfang der
kommerziellen
Nutzung

Demgegenüber steht die Proteomanalyse erst am Anfang ihrer kommerziellen Nutzung. Erste Analysen gesamter Proteome von Organismen sind inzwischen bekannt. In den kommenden Jahren sind ähnliche Verbesserungen wie bei der Genomanalyse zu erwarten. Dies wird zu weiteren Anwendungspotenzialen für die Pharmazeutika-Entwicklung führen. Langfristig dürften auch aus den Forschungsarbeiten zu *Brain Mapping* medizinisch relevante Erkenntnisse entstehen, die sich beispielsweise auf neurodegenerative Erkrankungen beziehen.

Chemie

Paralleltechnologien bieten ebenfalls große Potenziale für die Entwicklung neuer Biokatalysatoren, die für die biomassebasierte Produktion von Chemikalien eingesetzt werden.



3.2 Dienstleistungen

Dienstleistungen bezeichnen zum einen als Sektorbegriff eine Reihe von Branchen, die vornehmlich eine kundenorientierte, immaterielle Wertschöpfung betreiben. Zum anderen steht der Begriff branchenunabhängig für kundenorientierte Wertschöpfungsformen, bei denen eine konsequente Ausrichtung des Geschäftsmodells am Kundennutzen verfolgt wird, ggf. bis hin zur Integration der Kunden in den Prozess der Leistungserstellung. Für produzierende Unternehmen ist die dienstleistungsorientierte Wertschöpfung in Form innovativer Produkt-Dienstleistungsbündel ein wichtiger Wettbewerbsfaktor, der auch künftig weiter an Bedeutung gewinnt. Treiber im Bereich der Dienstleistungen sind vor allem die Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) sowie innovative Technologien zur Herstellung materieller Güter. Die Entwicklung und Umsetzung von Problemlösungen aus Kundenperspektive erfordert sowohl technisches als auch betriebswirtschaftliches Wissen.

Kundenorientierte,
immaterielle
Wertschöpfung

Folgende Teilgebiete der Dienstleistungsforschung werden bis 2030 von hoher Relevanz für Forschung und Innovation (FuI) sein: (1) kunden- und marktspezifische Anpassung hybrider Geschäftsmodelle, (2) Integration von Dienstleistungen und neuen Technologien; bereits stark bearbeitet, aber weiterhin relevant sind zudem (3) Modellierung und Simulation von Dienstleistungen, (4) *Service Engineering* und (5) Entwicklung hybrider Geschäftsmodelle für dezentrale Produktion.

IKT als Treiber

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass im Forschungsfeld Dienstleistungen vornehmlich nicht technische Innovationen⁵ im Vordergrund stehen. Trotz dieser Einschränkung kommt den genannten Themen eine zentrale Rolle auch im Hinblick auf den technologischen Fortschritt zu, da nicht technische Innovationen wie Dienstleistungen oder neue Geschäftsmodelle wichtige Treiber für technische Entwicklungen sind. Sie sind relevanter Bestandteil des Transformationsprozesses von einer produktzentrierten hin zu einer serviceorientierten Organisation.

Nicht technische
Innovationen
im Vordergrund

Das Teilgebiet „Kunden- und marktspezifische Anpassung hybrider Geschäftsmodelle“ wird im Folgenden vertiefend ausgeführt, da es auf strategischer Ebene eine besondere Relevanz für Deutschland bis 2030 besitzt. Das zweite Teilgebiet in der anschließenden ausführlichen Darstellung ist die „Integration von Dienstleistungen und neuen Technologien“, die auf einer stärker operativen Ebene die Umsetzung hybrider Ge-

⁵ Nicht technische Innovationen beinhalten neben sozialen oder kulturellen Innovationen auch neue Organisationskonzepte, nicht technische Prozessinnovationen und anderweitige Serviceinnovationen sowie dienstleistungsbasierte Geschäftsmodelle, wie sie im weiteren Text näher ausgeführt und beschrieben werden (vgl. zur Definition nicht technischer Innovationen OECD/Eurostat (2005): Oslo Manual: Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data. Paris. URL: <http://www.oecd.org/sti/oslomanual>. Abgerufen am 17.04.2014).

schäftsmodelle bedingt. Die drei übrigen Teilgebiete werden im Anschluss vorgestellt.

3.2.1 Kunden- und marktspezifische Anpassung hybrider Geschäftsmodelle

Neue
Organisations- und
Geschäftsmodelle

Innovationen mit Dienstleistungen führen in Unternehmen zu neuen Organisations- und Geschäftsmodellen. Für die Unternehmen geht dies mit einer Reihe von Herausforderungen einher: Diese reichen von der passgenauen Integration von Sachgütern und Dienstleistungen zu hybriden Produkten über die Entwicklung neuer Preis- und Erlösmodelle bis hin zu neuen Formen der Koordination und Steuerung. Dieses Zukunftsthema weist somit enge Bezüge zur Organisations- und arbeitspsychologischen Forschung auf, denn Dienstleistungsinnovationen scheitern nicht selten an innerbetrieblichen Anpassungs- und Transformationsprozessen.

Ressourcen-
management

Eine derzeit diskutierte Forschungsfrage ist, wie neue dienstleistungsorientierte Organisations- und Geschäftsmodelle systematisch entwickelt und implementiert werden können und wie ein damit verbundenes Ressourcenmanagement gestaltet sein muss. Ein solches Ressourcenmanagement bezieht sich auch auf externe Akteure (Kunden, Kooperations- und Netzwerkpartner), die sich dem eigentlichen Steuerungsradius der Organisation entziehen, aber für den Aufbau eines internationalen Dienstleistungsnetzwerkes unverzichtbar erscheinen.

Nutzenorientierte
Leistungsverrechnung

Die Entwicklung von innovativen Preis- und Erlösmodellen, die eine stärker nutzenorientierte Leistungsverrechnung erlauben, erscheint ebenfalls vielversprechend. Darunter kann beispielsweise die Anpassung des Geschäftsmodell-Designs an regionale Anforderungen und Gegebenheiten verstanden werden. Bei den dadurch bedingten stärker diversifizierten Kundenmärkten sollte jedoch die Komplexitätsbeherrschung der hybriden Geschäftsmodelle sichergestellt sein. Eine Komplexitätsreduzierung kann beispielsweise durch eine verstärkte Modularisierung des Dienstleistungsangebotes erfolgen, die einerseits eine als individuell empfundene Leistungserbringung ermöglicht, andererseits eine zu starke Aufspaltung des Angebots erfolgreich verhindert.

Anpassung hybrider
Geschäftsmodelle

Die Erforschung der kunden- und marktspezifischen Anpassung hybrider Geschäftsmodelle lässt ein beträchtliches Potenzial für die Dienstleistungsforschung erwarten. Aufgrund der vielen Anwendungsmöglichkeiten und nahezu unbegrenzten Diversifizierungsoptionen, sowohl hinsichtlich der Kundengruppen als auch der Marktgrenzen, ist eine hohe Dynamik im Forschungsbereich zu erwarten, welche die Generierung neuer Erkenntnisse zu begünstigen verspricht. Insbesondere ist es erforderlich, die zentrale Rolle des Kunden im Wertschöpfungsprozess anzuerkennen und effektive gemeinschaftliche Wertschöpfungsszenarien zu entwickeln, die eine gerechte Verteilung der Risiken, Kosten und Wertschöpfung zwischen den beteiligten Parteien beinhalten. Strategische Plattformen für Dienstleistungen könnten hier hilfreich sein.

Die mit dieser kunden- und marktspezifischen Anpassung einhergehenden Herausforderungen bezüglich der nötigen Komplexitätsbeherrschung der hybriden Geschäftsmodelle müssen dabei im Sinne einer kundenindividuellen Massenproduktion (*Mass Customization*) adäquat angegangen werden. Hierzu erscheint es Erfolg versprechend, Ansätze aus dem Produktionsbereich auf Dienstleistungen zu übertragen und unter Berücksichtigung von Besonderheiten der jeweiligen Dienstleistung kontext- und situationsspezifisch anzupassen.

Mass Customization

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Bereits heute existieren einige hybride Geschäftsmodelle mit kunden- und marktspezifischen Anpassungen, z. B. Verfügbarkeitsgarantien (Hersteller gewährt garantierte Maschinenverfügbarkeit), Betreibermodelle (Hersteller übernimmt Teile der Produktion für Kunden), *Pay-per-use*, *Pay-on-production*-Modelle, *Carsharing*-Angebote anstelle klassischer Mietwagen, verbrauchsorientierte Abrechnungen (z. B. bei Datennutzung), aber auch Änderungen in der Wertschöpfungskette durch *Self-Service-Terminals* (z. B. am Flughafen-*Check-In*). Das *Service-Design* wird mehr und mehr vom Kunden ausgehen. Dafür bedarf es aber auch neuer Didaktik – sowohl für die Entwicklung der Geschäftsmodelle als auch für den Einbezug der Kunden (Trainings, Ausbildung, Weiterbildung). Die Geschäftsmodelle erfahren dabei einen Wandel von rein funktions-, über nutzungs- bis hin zu ergebnisorientierten Konzepten. Lebenszyklusorientierte Betrachtungsweisen (wie *Total Cost of Ownership*-Berechnungen beim Neukauf von Maschinen), innerbetrieblicher kultureller Wandel (wie bei der Wandlung von IBM vom Hardware-Produzenten zum Dienstleistungsunternehmen) oder eine Erhöhung der Wertigkeit und Sichtbarkeit der Dienstleistung, z. B. durch explizite Auszeichnung der Preise für Dienstleistungen (nicht länger in einem erhöhten Produktpreis eingepreist) begleiten diese Veränderungen schleichend.

Service-Design

Auch sind zukünftig ganz neue Formen der Wertschöpfung denkbar. So könnte beispielsweise ein Logistikdienstleister teilweise Wertschöpfungsstufen des Herstellers übernehmen, indem er im Logistikzentrum kurz vor der eigentlichen Auslieferung an den Endkunden noch individuelle Anpassungen am physischen Produkt vornimmt (z. B. hinsichtlich der Farbgebung). Durch diese kundenspezifische Anpassung im Rahmen einer innovativen Arbeitsteilung rückt die Dienstleistungskomponente noch stärker in den Fokus.

Spezifische Probleme und Innovationsbarrieren für die Entwicklung kunden- und marktspezifischer hybrider Geschäftsmodelle liegen in einer fehlenden Kompetenz der betroffenen Mitarbeiter, in einer ungenügenden Kunden-Akzeptanz sowie in einem Mangel an Promotoren der innovativen Lösung. Diese Innovationsbarrieren zu überwinden wäre ein erster wichtiger Schritt zur weiteren Verbreitung der kunden- und marktspezifischen Anpassung hybrider Geschäftsmodelle. Trotz der bisherigen

Innovationsbarrieren

Integration von
Produkten und
Dienstleistungen zu
hybriden Produkten

Entwicklungen gibt es noch erheblichen Bedarf an wissenschaftlichen Erkenntnissen, insbesondere für soziale oder öffentliche Dienstleistungen. Erste Forschungsergebnisse lassen darauf schließen, dass bei der Integration von Produkten und Dienstleistungen zu hybriden Produkten, insbesondere an Stellen inner- und überbetrieblicher Kooperationsprozesse, zusätzlicher Forschungsbedarf besteht. Nicht nur die Entwicklung, sondern vielmehr auch die Implementierung und organisatorische Umsetzung hybrider Geschäftsmodelle gilt es folglich zukünftig verstärkt zu adressieren. Die weitere Dienstleistungsforschung mit dem Zeithorizont 2030 sollte somit Grundlagen für die sozio-technische Systemgestaltung neuer Produktions- und Konsumformen liefern. Im Folgenden werden exemplarisch zukünftige Anwendungen für Flexibilitätsgarantien in der Investitionsgüterindustrie und bei der Internationalisierung von Dienstleistungen vorgestellt.

Flexibilitätsgarantien in der Investitionsgüterindustrie

Neben antizipierenden Instandhaltungskonzepten versprechen insbesondere flexibilitätsorientierte Dienstleistungen in der Investitionsgüterindustrie, z. B. im Maschinenbau, hohe Wachstumspotenziale. Dabei garantiert das anbietende Unternehmen zu einem bereits vorab festgelegten Preis eine zukünftige Flexibilität des Investitionsgutes durch eine mögliche Anpassung an geänderte Produktions- oder Rahmenbedingungen. Diese Veränderungen können beispielsweise in einer geänderten Stückzahl oder in einer geänderten Geometrie des Produktionsgutes liegen.

Absicherung gegen
sich ändernde
Umweltfaktoren und
volatile Märkte

Die flexibilitätsorientierte Dienstleistung kann Kundenanforderungen hinsichtlich einer erhöhten Kapazitätsauslastung, bei einer gleichzeitigen Absicherung gegen sich ändernde Umweltfaktoren und volatile Märkte, wirkungsvoll erfüllen. Auch verspricht eine Umsetzung eine zielgenaue und gute Übereinstimmung mit zukünftigen Marktbedürfnissen. Allerdings ist es erforderlich, dass der Anbieter ein gewisses Maß an Unsicherheit akzeptiert und bereit ist, diskontinuierliche Erträge zu erwirtschaften. Derart kann die Durchgängigkeit des Engineerings über den gesamten Lebenszyklus des Investitionsgutes und des zugehörigen Produkt-Dienstleistungssystems unterstützt werden.

Internationalisierung von Dienstleistungen

Internationalisierung
verstärkt auch von
KMU

Die Internationalisierung von Dienstleistungen gehört sowohl in der Praxis als auch in der Forschung zu den zentralen Fragestellungen der Zukunft. Die zunehmende Internationalisierung, nicht nur von Großunternehmen, sondern verstärkt auch von kleinen und mittelständischen Betrieben, macht folglich eine Beschäftigung mit nationalen, regionalen oder gar lokalen Besonderheiten notwendig. Die Liberalisierung des internationalen Handels und das Fallen einstiger Handelsschranken bietet für den grenzüberschreitenden Vertrieb von Dienstleistungen im Zeithorizont bis 2030 enorme Entwicklungsmöglichkeiten, die es auch technisch zu nutzen gilt.

Durch IT-Lösungen wird zudem die räumliche Entkopplung von Dienstleistungen und ihrer Produktionsstätte ermöglicht. So lassen sich von einer zentralen Stelle aus viele Dienstleistungen weltweit anbieten und vermarkten. Allerdings müssen teilweise große kulturelle Unterschiede beachtet werden, z. B. hinsichtlich der Termintreue oder verbindlicher Umgangsformen. Der Nichtübertragbarkeit deutscher bzw. westeuropäischer Verhaltensweisen und Gepflogenheiten, sowohl im zwischenmenschlichen als auch im technischen Bereich, muss unbedingt Rechnung getragen werden, um erfolgreich zu sein. Das Erfordernis, auch externe Akteure, wie Kooperations- und Netzwerkpartner vor Ort, einzubeziehen, besteht ebenfalls und sollte von vornherein realistisch eingeschätzt werden. Abhängig vom Stand der wirtschaftlichen Entwicklung des jeweiligen Landes bzw. der Region treten Dienstleistungen in den Vordergrund, die von rein produktbezogenen, über Entwicklungs- und IT- bis hin zu Beratungsdienstleistungen reichen können. Hierfür eine geeignete Vorgehensweise und ein valides Bezugssystem zu entwickeln, ist im Zuge einer weiter fortschreitenden Globalisierung bestehender und zukünftiger Wertschöpfungsketten von unschätzbarem Wert für den Exporterfolg deutscher Unternehmen.

IT-Lösungen zur räumlichen Entkopplung von Dienstleistungen und ihrer Produktionsstätte

3.2.2 Integration von Dienstleistungen und neuen Technologien

Neue Technologien können die Funktionsweisen ganzer Märkte in kurzer Zeit verändern. Verstärkt wird diese Dynamik durch das engere Zusammenwachsen unterschiedlicher Technologien und die Kombination neuer Technologien oder Einzeltechniken mit dienstleistungsorientierten Wertschöpfungsformen. Diese Effekte sind so weittragend, dass sich die Integration von Dienstleistungen bzw. dienstleistungsorientierten Wertschöpfungsformen und neuen Technologien als ein wesentliches, eigenständiges und langfristiges Zukunftsthema herauskristallisiert hat.

Forschungsrelevante Fragestellungen finden sich beispielsweise nicht nur bei der Nutzung neuer Techniken zur Automatisierung und Rationalisierung bestehender Dienstleistungsprozesse, sondern bei der Schaffung vollständig neuer und innovativer Dienstleistungsangebote. Auch trägt neue Technologie zunehmend zur Individualisierung von Leistungen bei, etwa durch eine individuelle Gestaltung der ästhetisch-emotionalen Leistungsbestandteile oder über die Gestaltung der Kommunikationsschnittstellen zwischen Anbieter und Kunde.

Automatisierung und Rationalisierung von Dienstleistungsprozessen

Individualisierung von Leistungen

Ferner bietet die Frage, wie durch Integration von Dienstleistungen und Technologien nationale und internationale Standards und Schnittstellen durchgesetzt und etabliert werden können, vielfältige Anknüpfungspunkte für die Dienstleistungsforschung. Und schließlich ist zu beobachten, dass über Dienstleistungen zunehmend technische Entwicklungen vorangetrieben werden (z. B. RFID-Technik im Handel), ohne dass die daran geknüpften Prozessveränderungen bislang ausreichend erforscht worden sind. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch die stärker-

Standards und Schnittstellen

re Integration von Dienstleistungen mit neuen Technologien der Komplexitätsgrad von Dienstleistungssystemen zwar erhöht, zugleich aber auch beherrschbar gehalten werden kann. Die daraus resultierende Wechselwirkung im Zusammenspiel von Konsum und Produktion ist von hoher wirtschaftlicher Relevanz. Der Zusammenhang mit möglichen gesellschaftlichen Veränderungen durch eine neue Rolle der Konsumenten in der Wertschöpfung und Innovation ist bislang allerdings erst ansatzweise erforscht.

Neue Rolle der
Konsumenten in der
Wertschöpfung

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

In der Erforschung einer optimalen Integration von Dienstleistung und neuer Technologie kommen IT-gestützten Informationsplattformen eine besondere Bedeutung zu, da diese viele neue Dienstleistungen überhaupt erst ermöglichen bzw. ehemals etablierte Geschäftsmodelle revolutionieren. Neben der IT sind unter Dienstleistungsgesichtspunkten jedoch auch die Energietechnik oder Biomedizin zu nennen, die beide ein hohes Anwendungspotenzial versprechen.

IT-gestützte
Informations-
plattformen

In der Dienstleistungsforschung dominiert die Vorstellung, dass die Entwicklung neuer technischer Forschungsfelder die Entwicklung neuer Dienstleistungen impliziert, um für neue technische Möglichkeiten vermarktungsfähige Produkte und Leistungen zu entwickeln. Gleichwohl beleuchtet diese Sichtweise nur eine Facette der Wechselbeziehungen zwischen der Entwicklung von Dienstleistungen und Technologien und es gilt, diese noch besser zu untersuchen und zu verstehen.

Neue Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) und sich verändernde individuelle und soziale Bedürfnisse der Kunden spielen eine Schlüsselrolle für die Entwicklung neuer Dienstleistungsangebote. Sie verändern auch die Art und Weise, wie Dienstleistungen entwickelt, produziert und vermarktet werden. Dabei werden Standard-Dienstleistungen zunehmend automatisiert und Kunden durch neue Technik stärker in den Produktionsprozess einbezogen (*Self-Services*). Zugleich findet nach und nach eine Transformation der Dienstleistungsarbeit von transaktionsorientierten Tätigkeiten (z. B. Verkauf, Datenbearbeitung) in Richtung interaktionsorientierte Tätigkeiten (individuelle Beratung, etc.) statt.

Self-Services

Auch wenn Onlinebanking, *e-Commerce* oder *Cloud Computing*, hier besonders zentrales Speichern von Daten mit Zugriff über verschiedene Endgeräte, bereits standardmäßig genutzt werden, sind Web 2.0-Technologien mit kundenspezifischer Ansprache und verstärkter Kommunikation mit dem Kunden sowie der Einbezug des Kunden in die Produktentwicklung fast permanente Entwicklungen, die sich noch über eine lange Zeitspanne hinziehen werden. Das veranschaulicht das Beispiel der Entwicklung von *Carsharing*-Angeboten im innerstädtischen Bereich (z. B. Stadtmobil, car2go, DriveNow), die zum Teil schon etabliert sind, aber durch ein stärkeres Engagement von Automobilherstellern in diesem

Einbezug des
Kunden in die
Produktentwicklung

Bereich auch zukünftig weiter in Bezug auf die Geschäftsmodelle herausgefordert werden.

In Ansätzen vorhanden, aber noch lange nicht ausgereizt, sind die Fernwartung von Maschinen, die Produktion von Ersatzteilen durch generative Verfahren (*Rapid Manufacturing*, z. B. 3-D-Drucker), Ferndiagnose anhand genetischer Merkmale oder die Fernüberwachung von kritischen Körperwerten (z. B. Puls, Blutdruck), die alle langfristig auf der Forschungsagenda stehenbleiben werden.

Fernwartung
Ferndiagnose
Fernüberwachung

Durch neue cyber-physische Produktionssysteme, wie sie beispielsweise im Rahmen des Zukunftsprojektes „Industrie 4.0“⁶ gefördert werden, können neue IKT-Lösungen aus dem sogenannten Internet der Dinge und Dienste die industrielle Weiterentwicklung entscheidend voranbringen. Durch neue Dienstleistungen, welche die zunehmende Verbreitung cyber-physischer Systeme unterstützen, gilt es die Chancen intelligenter Produktionssysteme auszuschöpfen und die Entstehung einer sogenannten *Smart Factory* zu ermöglichen.

Cyber-physische
Produktionssysteme

Die Bedeutung der Integration von neuen Technologien und Dienstleistungen wird im Rahmen einer Betrachtung der Forschung und Innovation im Zeithorizont bis 2030 durch den Trend immer wichtiger, dass nicht länger nur innovative Technologien als Auslöser für Dienstleistungen fungieren, sondern in einem Wechselspiel Dienstleistungen gleichzeitig zum Treiber für die Entwicklung neuer Technik werden können. Ursache hierfür sind Veränderungen in der gesellschaftlichen Nachfrage, aber auch neue Geschäftsmodelle von Unternehmen mit nicht unerheblichen Einsparungspotenzialen. Nicht zu unterschätzen ist in diesem Zusammenhang die Debatte über ökologische Nachhaltigkeit, die zu einer vermehrten Einführung von zyklusorientierten Geschäftsmodellen anreizt. Doch auch wenn etliche Anwendungen bereits am Markt sind oder kurz vor der Umsetzung stehen, gibt es in allen Bereichen der Forschung und Entwicklung hohen Bedarf an wissenschaftlichen Erkenntnissen zu Hemmnissen und Erfolgsfaktoren. Exemplarisch werden im Folgenden die Anwendungsfelder zu Dienstleistungen als Treiber neuer Technologie vorgestellt sowie Standardisierung und Rationalisierung von Dienstleistungen.

Debatte über
ökologische
Nachhaltigkeit

Dienstleistungen als Treiber neuer Technologie

Als zukünftige Anwendung einer zu erfolgenden Integration von Dienstleistung und neuer Technologie wird die gegenseitige Wechselwirkung und das daraus resultierende Wechselspiel der beiden Bereiche betrachtet. Das Bedürfnis nach Individualisierung von Produkten, der Wunsch

⁶ Vgl. Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. URL: www.bmbf.de/pubRD/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

Personalisierung und Individualisierung

nach Nachhaltigkeit und der Wunsch nach intuitiv nutzbaren Lösungen scheinen der Hauptauslöser für die Technologietreiber-Funktion von Dienstleistungen in den nächsten Jahrzehnten zu sein.

Ein geändertes Nachfrageverhalten durch individuelle und soziale Bedürfnisse einer anspruchsvoller werdenden Gesellschaft führt zu einer stärker werdenden Personalisierung und Individualisierung von Leistungen durch eine individuellere Gestaltung der ästhetischen und emotionalen Leistungsbestandteile. Beispielsweise hat ein von der Nachfrageseite getriebener Wunsch nach besserer Verfolgbarkeit von Warenlieferungen dazu geführt, dass verstärkt RFID-Entwicklungen (z. B. Miniaturisierung der Chips) vorangetrieben wurden, um eine möglichst lückenlose Nachverfolgung von Lieferungen im Handel zu ermöglichen. Ähnliche Tendenzen sind auch in anderen Branchen zu erwarten. Kundenwünsche in Investitionsgüterbranchen bezüglich der Zurverfügungstellung von Technologie-Know-how, beispielsweise im Bearbeitungsprozess von Werkzeugmaschinen, können durch eine internetbasierte Kommunikation zwischen der Maschine und der Technologiedatenbank des Maschinenherstellers erfüllt werden.

Betrachtung des gesamten Lebenszyklus

Zugleich führt der größer werdende Wunsch nach Nachhaltigkeit zu einer ganzheitlichen Betrachtung des gesamten Lebenszyklus von Produkten mit Beachtung von Recycling- und Wiederverwertbarkeitsaspekten. Folglich tritt zunehmend der eigentliche Kaufpreis eines Gutes zugunsten einer Darstellung der Gesamtbetriebskosten (*Total Cost of Ownership*) in den Hintergrund. Diese ganzheitliche Betrachtung mit ihren einhergehenden zyklusorientierten Geschäftsmodellen erfordert zukünftig flexiblere technologische Lösungen, wie z. B. material- und energieeffizientere Fertigungsverfahren oder die Sicherstellung der späteren kostengünstigen Entsorgung des materiellen Gutes bereits in der Entwicklungs- und Konstruktionsphase.

Plug-and-Play-Lösungen in der Fertigung und im verarbeitenden Gewerbe

Durch neue hybride, einfach und intuitiv zu bedienende Produkte, die dem Kunden gebrauchsfertige Lösungen offerieren, verbunden mit entsprechenden neuen dienstleistungsbasierten Geschäftsmodellen können hier wertvolle Wettbewerbsvorteile entstehen. Dies gilt im Übrigen sowohl für den *Business-to-Consumer* (B2C)-Markt als auch für den *Business-to-Business* (B2B)-Markt. Beispielsweise werden innovative Werkzeuge für Werkzeugmaschinen entwickelt, die in der Lage sind, bei der Montage an eine neue Maschine unverzüglich mit dieser kommunizieren zu können, um grundlegende Einrichtungsvariablen zu übernehmen, und die damit eine zusätzliche menschliche Programmierarbeit oder Treiberinstallation überflüssig machen. *Plug-and-Play*-Lösungen, wie sie bei Computern schon längst Standard sind, werden in den kommenden Jahren auch in der Fertigung und im verarbeitenden Gewerbe Einzug halten. In diesem Zusammenhang müssen Geschäftsmodelle die spezifischen Fragestellungen des Schutzes von Know-how mit adressieren. Bislang werden hier vornehmlich technische Lösungen diskutiert, deren Schutz-

wirkung allerdings begrenzt und nur temporär ist. Intelligente Geschäftsmodelle könnten hier einen entscheidenden Lösungsbeitrag liefern.

Standardisierung und Rationalisierung von Dienstleistungen

Unter einer stärkeren Standardisierung und Rationalisierung lassen sich Versuche zusammenfassen, einerseits die Standardisierung und Automatisierung einfacher Dienstleistungen voranzutreiben und andererseits komplexe Dienstleistungen möglichst effizient erstellen zu können.

Die Standardisierung von Dienstleistungen ist aufgrund der Einbeziehung des Kunden allerdings nicht trivial. Auch herrscht keine einheitliche Terminologie vor. Es existieren daher Bemühungen, die Begrifflichkeiten der hybriden Wertschöpfung im Rahmen einer öffentlich verfügbaren Spezifikation, veröffentlicht durch das Deutsche Institut für Normung e.V., zu standardisieren.⁷ Die Problematik des Kundeneinbezugs wird jedoch auch durch neue Techniken nicht kleiner. Vielmehr werden die Kunden, beispielsweise durch *Self-Services*, sogar noch stärker in den Produktionsprozess einbezogen.

Standardisierung von
Dienstleistungen
nicht trivial

Hinsichtlich der Produktivitätsmessung und -steigerung im Dienstleistungsbereich werden grundlegende Ergebnisse erwartet. Insbesondere für komplexe und wissensintensive Tätigkeiten zeichnen sich dabei innovative Ansätze ab: Beispielsweise können neue technische Systeme, wie Software-gestützte Verfahren, helfen, notwendige Rationalisierungsmaßnahmen zu unterstützen. Von zunehmender Bedeutung erscheinen Verfahren, die zur Messung der Leistung und Komplexität sowie der Effektivität und Effizienz von Dienstleistungen verwendet werden können. Ähnlich der stetigen Rationalisierung, wie sie im verarbeitenden Gewerbe seit Beginn der Massenproduktion durchgängig vorangetrieben wird, muss im Zuge einer Betrachtung bis zum Zeithorizont 2030 auch im Dienstleistungsbereich der Effizienzaspekt stärker berücksichtigt werden, um die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft zu stärken.

Produktivitäts-
messung und
-steigerung im Dienst-
leistungsbereich

Jedoch stellt sich die Frage, inwieweit eine Produktivitätssteigerung überhaupt von Nutzen ist. Beispielsweise sind Probleme zu erwarten, wenn eine Bank aufgrund technischer Möglichkeiten weniger Mitarbeiter für die Kundenberatung einsetzt. Zwar führen die kürzeren Beratungszeiten der Kunden zu einer höheren Produktivität der einzelnen Mitarbeiter und der Bank an sich, eine Erhöhung der Kundenzufriedenheit ist aber eher nicht zu prognostizieren. Es ist folglich schwierig zu beurteilen, was als „produktiv“ bzw. als „unproduktiv“ einzuschätzen ist. Dies hängt nicht zuletzt vom Standpunkt des Betrachters ab. Was von der Unternehmensleitung als produktiv angesehen wird, kann sich zum Teil erheb-

⁷ DIN (2009): PAS 1094:2009-12. Hybride Wertschöpfung - Integration von Sach- und Dienstleistung; Berlin: Beuth.

Win-win-Situationen
schaffen

lich von dem unterscheiden, was Mitarbeiter oder Kunden als produktiv empfinden. Hier gilt es, zukünftig eine gesunde Balance zwischen den Interessen der Betroffenen zu finden, um eindeutige *Win-win*-Situationen zu schaffen.

3.2.3 Modellierung und Simulation von Dienstleistungen

Referenzartiger
Modelle für ganze
Dienstleistungs-
systeme

Virtualisierung von
Dienstleistungen

Die „Modellierung und Simulation von Dienstleistungen“ bedeutet die Übertragung und Anpassung von bewährten Modellierungs- und Simulationstechniken aus der Produktentwicklung auf dienstleistungsspezifische Fragestellungen und Sachverhalte. Diese neuen Modellierungstechniken für Dienstleistungen beinhalten die Generierung referenzartiger Modelle für ganze Dienstleistungssysteme und die damit verbundene Konzeptformalisierung. Die Virtualisierung von Dienstleistungen geht noch einen Schritt weiter und simuliert neben der räumlichen Umgebung und dem Kontext auch die Gestaltung der eigentlichen Interaktion zwischen Anbieter und Nachfrager einer spezifischen Dienstleistung. Eine zentrale Herausforderung wird es hier sein, Lösungen zu entwickeln, welche die vergleichsweise weichen Faktoren der menschlichen Interaktion umfassend in Modellen berücksichtigen, sodass in Simulationen neue Erkenntnisse für die Konzeption und Umsetzung von Dienstleistungen generiert werden können.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Komplexitäts-
beherrschung als
Herausforderung

Modellierung von
Wertschöpfungs-
netzwerken

Zukünftige Entwicklungspfade liegen vor allem in der Modellierung zunehmend komplexer werdender Dienstleistungssysteme, die beispielsweise ein Management der gesamten Lebenszykluskosten ermöglichen. Neue Herausforderungen entstehen bezüglich der Komplexitätsbeherrschung. Durch eine künftig zu verstärkende Arbeit an generischen Fragestellungen und interdisziplinären Aspekten der Modellierung und Simulation von Dienstleistungen sind neue Anwendungen unter anderem in den Bereichen Wirtschaft und Gesellschaft zu erwarten. Im Bereich der Wirtschaft könnte ein Innovationsschub durch einen bereichsübergreifenden Wissenstransfer und branchenübergreifende Kooperationen ausgelöst werden. Die Modellierung von Wertschöpfungsnetzwerken kann beispielsweise dabei helfen, unternehmensrelevante Entscheidungen zu Outsourcing oder Joint Venture-Aktivitäten zu prüfen und die Optimierung von Prozessen, Produkten und Dienstleistungsangeboten voranzutreiben. Hierfür notwendig sind jedoch offene Modellbeschreibungen, die ein durchgängiges Management des gesamten Lebenszyklus‘ eines Dienstleistungsproduktes ermöglichen.

Im gesellschaftlichen Bereich können Modelle und Simulationen von Dienstleistungen einen Beitrag zur Adressierung maßgeblicher gesellschaftlicher Bedarfsfelder, wie Nachhaltigkeit (z. B. Ressourceneffizienz, Klimawandel, Umweltbelastung) und Sicherheit (z. B. Risikoabschätzungen, Monitoring von Naturkatastrophen) leisten. Zukünftig wird es dabei noch wichtiger werden, Simulation mit menschlichen Erfahrungs-

prozessen zu koppeln (Mensch-Technik-Interaktion). Hinzu kommen Nutzungspotenziale, die sich aus der Verknüpfung unterschiedlicher Anwendungsbereiche ergeben, wenn menschliche Entscheidungsfindung in Interaktionsbeziehungen (Dienstleistung und Verhaltenspsychologie bzw. Gehirnmodellierung) simuliert wird. Ein weiterer Nutzen der verstärkten Anwendung von Simulation und Modellierung liegt im Verstehen von komplexen Entwicklungen, z. B. von vernetzten Verkehrs- und Warenströmen, von kritischen Infrastrukturen in Städten oder Mega-Cities (Waren, Verkehr, Menschen, Wasser, Energie, Abfall und ökologische Randbedingungen). Hier könnten durch Simulationen erhebliche Ressourceneffizienzpotenziale erschlossen, Verkehrs- und Warenströme optimiert und Gefahrenpotenziale frühzeitig erkannt werden.

Mensch-Technik-
Interaktion

Verstehen von
komplexen
Entwicklungen

3.2.4 *Service Engineering*

Unter dem Teilgebiet *Service Engineering* versteht man die systematische Entwicklung neuer Dienstleistungen mithilfe der adäquaten Übernahme von bereits vorhandenen ingenieurwissenschaftlichen Methoden, beispielsweise aus der klassischen Produktentwicklung. Im *Service Engineering* werden folglich Referenzmodelle für systematische Dienstleistungsentwicklungsprozesse entwickelt und anwendungsbezogen ausgestaltet. Hierzu müssen geeignete Methoden, Vorgehensweisen und Instrumente ausgewählt werden, die ein spezifisches Engineering auch für unterschiedliche Typen von Dienstleistungen ermöglichen. Da im Rahmen des *Service Engineering* in der Vergangenheit oftmals Fragen bezüglich der späteren Akzeptanz der Nutzer nicht die Beachtung fanden, die sie verdienen, wurde der Ansatz des *Service Engineering* zu Recht als zu technokratisch kritisiert. Zukünftig sollten verstärkt Kunden und ihre individuellen Bedürfnisse in den Mittelpunkt rücken. Durch die Einbindung von Kunden und Anwendern bereits in den Entwicklungsprozess neuer Dienstleistungen ließe sich dies gewährleisten. Kopplungen mit anderen Fachdisziplinen – wie Psychologie oder Neurologie – können hierzu größere Potenziale bieten.

Entwicklung neuer
Dienstleistungen
mit ingenieurwissen-
schaftlichen
Methoden

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Es ist zu erwarten, dass im Zeithorizont bis 2030 neue Anwendungen des *Service Engineering* nicht auf einzelnen, separaten Dienstleistungen liegen werden, sondern vielmehr verstärkt in Bereichen der integrierten Entwicklung von ganzheitlichen Produkt-Dienstleistungs-Kombinationen und damit verbundenen innovativen hybriden Produkten. Auch hier ist es angezeigt, dass der Faktor Mensch – auf Anbieter- und Kundenseite – deutlich stärker in den Mittelpunkt rückt. So kann durch den consequenten Kundeneinbezug in allen unterschiedlichen Phasen des Entwicklungsprozesses das Engineering des späteren Dienstleistungserlebnisses (die sogenannte *Service Experience*) bereits in frühen Phasen wirkungsvoll unterstützt und zum beiderseitigen Vorteil umgesetzt werden. Hierzu

Entwicklung von
ganzheitlichen
Produkt-
Dienstleistungs-
Kombinationen

ist es notwendig, das Dienstleistungserlebnis analytisch zu bestimmen, um dann entsprechend die Formen der Interaktion zu gestalten.

Differenzierte Interaktions- und Kommunikations-schnittstellen

Aufgrund der ständigen Weiterentwicklung gängiger Kommunikationsformen (z. B. Interaktion mit potenziellen Kunden durch *Social Media*) müssen zudem differenzierte (technische und nicht technische) Interaktions- und Kommunikationsschnittstellen eingebunden werden. Gelingt es dem *Service Engineering* die skizzierten Herausforderungen anzunehmen und zu überwinden, steht dem künftigen Einsatz einer systematischen Entwicklung und Gestaltung von Produkt-Dienstleistungs-Systemen in nahezu allen Branchen und Fertigungsstufen sowie über alle Unternehmensgrößen hinweg prinzipiell nichts im Wege.

3.2.5 Entwicklung hybrider Geschäftsmodelle für dezentrale Produktion

Zukunftsvision „Industrie 4.0“

Die „Entwicklung hybrider Geschäftsmodelle für dezentrale Produktion auf Basis neuer Fertigungstechnik“ bezieht sich insbesondere auf neue intelligente technische Systeme, die unter anderem im Rahmen der Zukunftsvision „Industrie 4.0“ entwickelt werden. So ist davon auszugehen, dass zukünftig beispielsweise neue Formgebungsverfahren aus dem Bereich des *Rapid Prototyping* und *Rapid Manufacturing* in größerem Umfang in der industriellen Produktion Einzug halten. Diese auf 3-D-CAD-Modellen basierenden und umgangssprachlich meist unter dem Begriff „3-D-Drucker“ bekannten Fertigungsverfahren erlauben eine schnellere und flexiblere Herstellung von Bauteilen als bisher.

Begleitende Entwicklung hybrider Geschäftsmodelle

Die begleitende Entwicklung neuer intelligenter Formen hybrider Geschäftsmodelle für solche Techniken könnte sich als entscheidender Stellhebel für eine frühzeitige Marktdurchdringung erweisen. Neue Geschäftsmodelle werden darauf abzielen, der zunehmenden Transformation bestehender Wertschöpfungsketten in komplexe Wertschöpfungsnetzwerke Rechnung zu tragen und darauf abgestimmt passende Lösungen zu entwickeln. Sowohl neue inner- und überbetriebliche Organisationsformen als auch gänzlich neu zu entwickelnde Wertschöpfungsdesigns, welche die Wertschöpfung partizipativ zwischen allen Beteiligten aufteilen, müssen mit dieser innovativen Fertigungstechnik einhergehen.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Innovative Preis- und Erlösmodelle

Die zukünftige Entwicklung hybrider Geschäftsmodelle für die dezentrale Produktion verspricht durch innovative Produkt-Dienstleistungskombinationen zusätzlichen Mehrwert für die anbietenden Unternehmen generieren zu können. Diese neuartigen hybriden Geschäftsmodelle müssen dann mit passenden innovativen Preis- und Erlösmodellen versehen werden, um eine gerechte Aufteilung des durch sie generierten Mehrwertes zu gewährleisten und *Win-win*-Situationen für Anbieter und Nachfrager zu schaffen. Einerseits können neue Geschäftsmodelle für Gebrauchsgüter im Privatkundenmarkt entwickelt werden, andererseits lie-

gen auch im Geschäftskundenbereich große Potenziale verborgen, die es zukünftig zu erschließen gilt.

Im B2C-Bereich betrifft dies in erster Linie sogenannte *Do-it-yourself*-Produkte, die von privaten Konsumenten in den eigenen vier Wänden erschaffen werden und bei einer erlaubten Einflussnahme auf die Konstruktion des zu erstellenden Bauteils hohe Individualisierungsgrade erlauben. Im B2B-Bereich dagegen ist davon auszugehen, dass das Hauptaugenmerk bis 2030 auf dem Ersatzteilmarkt (z. B. im Maschinen- und Anlagenbau) liegen wird. Hier lässt sich eine noch stärkere Integration des Kunden in den Prozess der Leistungserstellung prognostizieren, da der Kunde durch die neue Fertigungstechnik in die Lage versetzt wird, benötigte Ersatzteile zeitnah und eigenständig herzustellen. Hier müssen folglich innovative hybride Geschäftsmodelle entwickelt werden, die eine konsequente Ausrichtung des gesamten Geschäftsmodells am Kundennutzen ermöglichen und derart eine flächendeckende Verbreitung unterstützen.

Do-it-yourself-
Produkte

Ersatzteilmarkt



3.3 Energie

Gewinnung, Umwandlung, Transport, Speicherung und Nutzung von Energie und Strom

Das Technologiefeld Energie beschreibt Techniken der Gewinnung, Umwandlung, des Transports und der Speicherung von fossilen und regenerativen Energien und Strom, deren effiziente Nutzung einschließlich der dazu erforderlichen neuen Materialien, Werkstoffe und organisatorischen Innovationen. Darüber hinaus umfasst das Technologiefeld die spartenübergreifende Integration von Angebot und Nachfrage von Energieträgern.

Energiewirtschaft in Transformation

Die Energiewirtschaft in Deutschland, insbesondere die Elektrizitätswirtschaft, befindet sich in einem Transformationsprozess. Ausgelöst wurde dieser durch die weitreichenden politischen Entscheidungen für den schrittweisen Atomausstieg bis 2022, für den Ausbau der erneuerbaren Energien und für den Klimaschutz. Die Bundesregierung hat sich zum Klimaschutz bekannt und damit den zentralen Zielrahmen gesteckt. Bis zum Jahr 2050 sollen die Treibhausgasemissionen in Deutschland um 80% bis 95% gegenüber 1990 reduziert werden. Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromversorgung soll im gleichen Jahr einen Anteil von mindestens 80% erreichen. Trotz weiteren Wirtschaftswachstums soll der Primärenergiebedarf durch eine wesentlich effizientere Nutzung und Wandlung von Energie bis 2050 halbiert werden, insbesondere im Bereich der Wärmenutzung; der Stromverbrauch soll bis dahin um 25% sinken.

Energiewende

Die Energiewende sucht Antworten auf die absehbare Verteuerung fossiler Energien, die gravierenden ökologischen Folgekosten, die Risiken der aktuellen Erzeugungsstruktur und die derzeit noch sehr hohen Energieverluste auf allen Wandlungs- und Nutzungsstufen; sie bietet eine Perspektive für eine nachhaltige Energieversorgung und -nutzung. Der Umbau des Energiesystems ist eine große Chance für den Innovationsstandort Deutschland. Es geht darum, die verschiedenen Systemkomponenten so zu integrieren, dass die erneuerbaren Energien und die sehr effiziente Nutzung von Energie in allen Verbrauchssektoren zu den Leittechnologien des Energiesystems werden. Zentral ist dabei, im Zusammenspiel mit dem Aus- und Umbau der Netze, dem Nachfragemanagement, dem Einsatz von Speichertechnologien sowie der Integration der Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und Industrie langfristig die Vollversorgung übernehmen zu können. Entscheidend sind daher für die langfristige Zukunft die Bereiche (1) Energiebereitstellung, (2) hohe Effizienz bei der Energienutzung, (3) Energiesystem sowie (4) *Enabler* (z. B. IuK-Technik, Leistungselektronik, neue Werkstoffe).

3.3.1 Energiebereitstellung

In Europa stammt rund 80% der verwendeten Primärenergie (Energieträger vor der ersten Umwandlung) von fossilen Energieträgern (Kohle, Erdöl, Erdgas), etwa 13% sind Kernenergie und etwa 7% stammen von

erneuerbaren Energieträgern, davon wiederum etwa 70% aus Biomasse. Diese Primärenergie wird u. a. in Raffinerien und Kraftwerken in Endenergie wie Treibstoffe und Strom umgewandelt. Mehr als 50% des Stroms in Europa wird aus fossilen Energieträgern hergestellt, mehr als ein Viertel stammt aus Kernkraftwerken, etwa 11% stammt aus Wasserkraft, 5% aus Windkraft und 0,5% aus Photovoltaik-Anlagen. Für die Energieträger Kohle und Erdöl existiert schon lange ein Weltmarkt; Gas wird europaweit gehandelt, auch die Stromnetze sind in Europa miteinander verbunden; bis 2015 soll der europäische Binnenmarkt für Energie realisiert sein. Nationale Veränderungen im Energiesystem haben daher immer Auswirkungen bei den Nachbarländern, so auch die „Energiewende“ in Deutschland, bei der insbesondere die deutlich gestiegene Stromerzeugung aus den fluktuierenden Energieträgern Wind und Sonne starke Auswirkungen auf die Strommärkte nicht nur in Deutschland hat. So ist der Durchschnittspreis für Strom an der Börse so stark gesunken, dass viele moderne Kraftwerke, insbesondere Gaskraftwerke, nicht mehr wirtschaftlich produzieren können. Gleichzeitig hat die Volatilität der Strompreise zugenommen. Es gibt bereits Zeiten, in denen der Strompreis an der Börse negativ ist und Zeiten, an denen er mehr als das Zehnfache des Durchschnittspreises kostet. Mit einem weiteren Umbau des Energiesystems könnten diese Effekte zunehmen. Daher wird nicht nur eine Umgestaltung des Marktdesigns für Strom erforderlich. Vielmehr müssen auch deutliche Veränderungen der Techniken und des Gesamtsystems erforscht werden.

Primärenergie

Gestiegene Stromerzeugung aus den fluktuierenden Energieträgern Wind und Sonne

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Während sich mittelfristig bei der Bereitstellung und Aufbereitung von fossilen Brennstoffen wenig ändern wird, steht die Erzeugung von elektrischer Energie vor deutlichen Umwälzungen. Um die EU-CO₂-Reduktionsziele bis 2050 zu erreichen, werden in allen EU-Ländern mindestens 60% der Stromerzeugung aus CO₂-freien Kraftwerken stammen müssen. In Deutschland sollen zukünftig 80% der Elektrizität aus erneuerbaren Energien erzeugt werden, ganz überwiegend aus Photovoltaik- und Windkraftanlagen. Diese Stromerzeugung ist dargebotsabhängig, d. h., ihre Einspeisung schwankt sehr stark je nach Witterung und Tages- bzw. Jahreszeit. Im Gegensatz zum heute dominierenden fossilen Kraftwerkspark wird sich dadurch in einem überwiegend auf erneuerbaren Energien basierendem System die Erzeugung des Stroms nur begrenzt regeln lassen.

In Deutschland zukünftig 80% der Elektrizität aus erneuerbaren Energien

Somit zählen Versorgungssicherheit und Systemstabilität zu den großen Herausforderungen eines an Wind und Sonne ausgerichteten Energiesystems: Die Gesamtstruktur der Energieversorgung und des Energiemanagements aufseiten der Energienutzer wie auch der Stromerzeuger und -verteiler muss sich den starken und schnellen Schwankungen der dargebotsabhängigen erneuerbaren Energieträger anpassen und ein großes Maß an Flexibilität aufweisen.

Versorgungssicherheit und Systemstabilität

Konventionelle
Kraftwerke

Während der Transformation des Stromsystems hin zu einer vollständig auf erneuerbaren Energieträgern beruhenden Stromerzeugung werden konventionelle Kraftwerke weiterhin das Rückgrat bilden. Daher ist es notwendig, dass diese sehr schnell der Residuallast entsprechend in ihrer momentanen Leistung angepasst werden können, d. h. sie über eine hohe Lastwechselgeschwindigkeit verfügen müssen und einen großen Regelbereich haben bzw. schnell aus dem Stillstand angefahren werden können. Dies gilt nicht nur für neue Kraftwerke, auch Bestandsanlagen müssen entsprechend nachgerüstet werden, soweit dies wirtschaftlich möglich ist. Gleichzeitig sollten die konventionellen Kraftwerke möglichst wenig Treibhausgase emittieren, was durch die Abscheidung und dauerhafte Lagerung oder Wiederverwendung des CO₂ erreicht werden kann. Die hierfür erforderlichen Techniken bedürfen noch der Forschung und Entwicklung, der Akzeptanz in der Bevölkerung und entsprechender gesetzlicher Regelungen. Die bei der Stromerzeugung in konventionellen Kraftwerken zwangsläufig anfallende Abwärme sollte besser als bisher genutzt werden, was bei kleinen dezentralen Einheiten leichter zu realisieren ist. Hier besteht sowohl bei der Technikentwicklung (z. B. Mikro-Gasturbinen, Stirlingmotoren, Hochtemperatur-Brennstoffzellen) als auch bei der Integration in das Energiesystem Forschungsbedarf.

Windkraftanlagen

Windkraftanlagen (WEA) werden einen zunehmenden Beitrag zur Stromversorgung liefern müssen. Der technische Standard von WEA ist bereits sehr hoch. Grundlegende Forschungsaktivitäten im Bereich Wind zielen vor allem auf eine weitere Kostenreduktion, insbesondere im Bereich der Komponenten wie Generator, Getriebe, Rotorblätter, Platzbedarf der Gondel und innovative Turmbaukonzepte. Ein weiteres Ziel ist die Erhöhung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer der WEA-Komponenten. Aufgrund der vermehrten Anforderungen an WEA, Systemdienstleistung bereitzustellen, besteht auch ein FuE-Bedarf in der Verbesserung des Teillastverhaltens.

Photovoltaik

In den letzten 30 Jahren hat im Bereich der Photovoltaik (PV)-Technologie eine rasante technologische Entwicklung stattgefunden, die Technologien von kristallinen Solarzellen und Dünnschichtzellen befinden sich bereits auf einem hohen Entwicklungsstand, Entwicklungsziele bestehen hier zum einen in der Senkung der Stromgestehungskosten und zum anderen in der Systemintegration der PV. Die Preise für Photovoltaik-Anlagen sind in den letzten Jahren dramatisch gesunken, daher wird erwartet, dass sie zukünftig ebenfalls einen deutlichen Beitrag zur Stromversorgung in Deutschland liefern werden. Dieser Preisverfall hat als unerwünschten Nebeneffekt jedoch den Niedergang der PV-Industrie in Deutschland bewirkt. Noch nicht eindeutig beantwortet ist die Frage, ob die deutsche PV-Industrie den Preiswettkampf mit asiatischen Herstellern bei Standardprodukten gewinnen kann oder sich besser auf High-tech-Nischen konzentrieren sollte.

Noch nicht in der breiten kommerziellen Anwendung sind konzentrierende PV Systeme (engl. *Concentrating Photovoltaic*, CPV). Diese nutzen optische Komponenten, um das Sonnenlicht auf Solarzellen kleiner als 1 cm^2 zu konzentrieren. Dadurch können hocheffiziente Solarzellen zum Einsatz kommen, die in einem konventionellen PV-System aufgrund der hohen Herstellungskosten nicht rentabel wären. Allerdings sind diese Systeme nur in Ländern mit einem hohen Anteil direkter (nicht diffuser) Sonnenstrahlung sinnvoll und benötigen dem Sonnenstand nachführbare Systeme. HIT Solarzellen (*Herero-junction with Intrinsic Thin-layer*) bestehen aus einem monokristallinen Wafer, der vorder- und rückseitig mit amorphem Silizium beschichtet ist. Damit wird die relativ energieintensive Herstellung des p-n-Überganges durch ein energiesparenderes Verfahren ersetzt. HIT-Solarzellen erreichen außerdem einen höheren Wirkungsgrad als konventionelle Siliziumsolarzellen. Für die Dünnschichttechnologie ist der Materialbedarf ein zu überwindendes Entwicklungshemmnis. Die Herstellung von Solarzellen auf Basis organischer Halbleiter benötigt im Vergleich zu den kommerziellen Technologien wenig Energie, daher wird von geringen Herstellungskosten ausgegangen. Allerdings werden bis dato auch nur geringe Wirkungsgrade erreicht. Aktuelle Forschungsschwerpunkte liegen in der Evaluierung neuer organischer Halbleitersysteme, in der Weiterentwicklung bestehender Zellkonzepte, der Entwicklung angepasster Produktionstechnologien, Modulverschaltung, langzeitstabiler Verkapselung und Lichtmanagement.

Konzentrierende
PV Systeme

Auf Grund des Preisverfalls bei der Photovoltaik ist die solarthermische Stromerzeugung ebenfalls unter Druck geraten. Dabei bietet diese Technologie insbesondere hinsichtlich der bedarfsgerechten Stromerzeugung durch kostengünstige Integration von hocheffizienten thermischen Speichern und der gesicherten Kapazität durch optionale Hybridisierung mittels Zusatzfeuerung deutliche Vorteile gegenüber PV- und Windenergieanlagen. Da diese Technologie nur direkte Strahlung nutzen kann, ist sie für einen Einsatz in Deutschland nicht geeignet, sondern nur für den Export in Wüstenregionen. Die Schlüsselkomponenten für die Weiterentwicklung und Kostenreduktion solarthermischer Kraftwerke sowie der spezifische FuE-Bedarf dazu sind bei dem Konzentrador-System die Reduktion des Materialeinsatzes und verbesserte Reflexionsschichten; beim Receiver die Nutzung höherer Temperaturen bei hohen Wirkungsgraden, höhere solare Strahlungsflussdichten und selektive Absorberschichten; bei den Wärmeträgermedien der Ersatz des Thermo-Öls durch Direkt-dampferzeugung oder Flüssigsalz, Stabilität bei höheren Nutzungstemperaturen, Reduktion von thermischen Verlusten durch Absenkung des Schmelzpunktes und Korrosionsvermeidung; bei der Prozesstechnik die Erhöhung der Kraftwerks-Wirkungsgrade, Trockenkühlung in ariden Regionen, optimale Integration von Speicher und Zusatzbrenner, verbesserte Betriebsführung; bei den Speichern die Entwicklung kostengünstiger Speichermedien und Optimierung der Speicherkonzepte.

Solarthermische
Stromerzeugung

Biomasse

Große Hoffnungen wurden in der Vergangenheit auf die energetische Nutzung der Biomasse gelegt. Da der Anbau von Energiepflanzen aus ethischen und ökologischen Gründen gegenwärtig in der Öffentlichkeit zunehmend kritischer gesehen wird, wird sich die energetische Nutzung von Biomasse zukünftig auf die Nutzung von biogenen Abfällen konzentrieren müssen. Bei dieser Biomassenutzung der 2. Generation werden Bioabfälle einer erweiterten energetischen und stofflichen Nutzung zugeführt. Hierbei kann z. B. Überschussstrom zum Betrieb eines Pyrolyseaggregates genutzt werden, um Biokohle und Pyrolyseöl/-gas zu erzeugen. Diese Produkte sind speicherbar und können bedarfsgerecht stofflich und energetisch genutzt werden. Die Pyrolysetechnologie ist prinzipiell verfügbar, die motorische Nutzbarkeit der Gase und Öle ist nachgewiesen, jedoch muss die Langzeitadaptation noch erfolgen. Aufgrund ihrer begrenzten Verfügbarkeit sollte in Zukunft die so veredelte Biomasse primär für Anwendungen vorgesehen werden, die voraussichtlich auch weiterhin auf chemisch gebundene Energieträger angewiesen bleiben, z. B. die Luftfahrt.

Brennstoffzellen

Brennstoffzellen bieten künftig voraussichtlich in einer breiten Leistungsklasse interessante Perspektiven für eine effiziente Energieumwandlung, sowohl für stationäre als auch für mobile Anwendungen. Aktuelle Entwicklungen fokussieren sich auf SOFC (*Solid Oxid Fuel Cell*), MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*) und PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*), wobei die ersten beiden den Vorteil haben, dass – bedingt durch die hohen Temperaturen – Erdgas direkt als Brenngas eingesetzt werden kann, während die PEMFC besser für mobile Anwendungen geeignet ist, aber Wasserstoff als Brenngas voraussetzt. Dieser Wasserstoff kann zukünftig aus „überschüssigem“ Strom aus Photovoltaik und Windkraft erzeugt werden. Für Wasserstofferzeugung und Brennstoffzellen besteht der Forschungsbedarf insbesondere zu folgenden Themen: Entwicklung kostengünstiger Materialien, Erhöhung der Leistungsdichte und der Betriebszuverlässigkeit, Designoptimierung von Zellen und Stacks, Erforschung der optimalen Brenngaszusammensetzungen, Erforschung und Entwicklung von Reformierungstechniken, um die bereits vorhandenen Energieträger Erdgas und Benzin bzw. Diesel als Übergangstechnologie zu nutzen. Auch die Weiterentwicklung „reversibler“ Brennstoffzellen/Elektrolyseur-Systeme sowie der Brennstoffzellen-Systemtechnik zur Integration in Versorgungsstrukturen erscheinen sinnvoll.

3.3.2 Hocheffiziente Energienutzung und -wandlung der Endenergieträger

Um das Ziel einer drastischen Reduktion der CO₂-Emissionen zu erreichen, wird neben einer Substitution kohlenstoffintensiver Energieträger durch solche mit weniger oder keinem Kohlenstoff auch die absolute Menge der Energieträger deutlich reduziert werden müssen.

Rund 35% der in Deutschland verbrauchten Endenergie wird in mechanische Energie umgewandelt (insbesondere für den Verkehr und Elektromotoren), etwa 30% für Raumwärme, 20% für Prozesswärme, 5% für Warmwasser und weniger als 5% jeweils für Beleuchtung und Informations- und Kommunikationstechnik. Sektoral betrachtet werden jeweils etwa 28% der Endenergie in den Sektoren Industrie, Verkehr und Haushalte verbraucht, etwa 15% im tertiären Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen. Strom wird in Deutschland zu rund 40% in der Industrie benötigt, je knapp 30% in privaten Haushalten und im tertiären Sektor. Während bei der Umwandlung von Primärenergie in Endenergie bereits knapp 30% Verluste entstehen, sind es bei der Umwandlung von Endenergie in Nutzenergie knapp 50%. Hier gibt es bereits heute große Verbesserungspotenziale, die durch Forschung weiter erhöht und verbilligt werden können. Im Bereich der Brennstoffe liegen große wirtschaftliche Energieeffizienzpotenziale in der Raumwärme-Erzeugung, beim Strom bei den elektromotorisch betriebenen Systemen wie Pumpen, Ventilatoren und Kompressoren, insbesondere in der Industrie. Und auch beim Nutzenergiebedarf kann ohne Komfort- oder Wohlfahrtverlust gespart werden, insbesondere bei den Gebäuden durch bessere Wärmedämmung und bei den Autos durch geringeres Fahrzeuggewicht.

Energienutzung

Sektorale
Betrachtung

Große Verbesserungspotenziale

Ein kostenseitiges Optimum zum Erreichen der CO₂-Reduktionsziele ist nur unter Einbeziehung der Vermeidung der hohen Energieverluste auf der Energienachfrageseite zu erreichen. Kurz- und mittelfristig liegen in Energieeffizienzmaßnahmen die größten wirtschaftlichen CO₂-Vermeidungspotenziale. Im Vergleich zur Stromerzeugung und Energiebereitstellung im Allgemeinen ist die Energieverwendung und damit verbunden das gesamte Feld der Energieeffizienz im Nachfragebereich sehr viel heterogener und kaum ein Thema von Energiefachleuten. Die Anzahl und Vielfalt der eingesetzten Technologien ist entsprechend der vielfältigen Anwendungszwecke sehr hoch und führt nicht nur zu einer starken Zersplitterung des Themenfeldes, zu mangelndem Marktüberblick, fehlenden Kenntnissen und zu einer Vernachlässigung durch Energiepolitik und Medien, sondern stellt auch eine große Herausforderung für analytische Untersuchungen in diesem Bereich dar. Viele der technischen Lösungsansätze für eine hocheffiziente Energienutzung und -wandlung der Energieträger wie neue Management- und Kontrollsysteme einschließlich Sensoren, aber auch neue Materialien und Verfahren werden im Abschnitt 3.3.4. *Enabler* beschrieben.

Energieeffizienzmaßnahmen

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Im Haushaltssektor ist die Umsetzung von Effizienzpotenzialen neben Wärmedämm-Maßnahmen an der Gebäudehülle und dem Einsatz von effizienten Heizgeräten vorwiegend mit dem Austausch von einzelnen in Großserien gefertigten Geräten sowie ihrer Nutzung verbunden. Entsprechend steht hier für FuE die Entwicklung hocheffizienter Geräte sowie

Haushaltssektor

die Unterstützung der Verbraucher bei der Steuerung ihrer Geräte durch verbesserte Informationen, z. B. über *Smart Meter*, im Vordergrund.

Nullenergiehaus-
standard

Die Europäische Kommission hat 2009 entschieden, dass alle neuen europäischen Gebäude ab dem 01.01.2021 nahezu Nullenergiehausstandard haben sollen. Diese Gebäude werden in Deutschland vermutlich ähnlich hohe Anforderungen wie das heutige Passivhaus stellen, sodass spätestens 2021 Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung im Neubau zum Standard werden. Da sich dieser Standard dann auch im Bereich der Altbauanierung durchsetzen wird, bietet FuE in diesem Bereich große Potenziale.

Gewerbe, Handel und
Dienstleistungen

Im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen ist bei den meisten Unternehmen der Anteil der Stromkosten an den Gesamtkosten sehr niedrig, was dazu führt, dass viele Einsparpotenziale nicht realisiert werden. So gibt es große wirtschaftliche Energieeffizienzpotenziale im Bereich der Beleuchtung, insbesondere durch die Verbesserung hocheffizienter Leuchtmittel wie LED und OLED hinsichtlich Lichtausbeute, Lichtqualität und Kosten. Aber auch im Bereich Kühlung sowie Lüftung und Klimatisierung bestehen große, noch nicht ausgeschöpfte Effizienzpotenziale. Neben der energetischen Optimierung einzelner Komponenten wie Fassadenelementen, Fenstersystemen und dem Einsatz von Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlagen bietet ein Systemansatz in diesem Sektor große Potenziale, da sich die einzelnen Komponenten gegenseitig beeinflussen. Energieeffiziente Geräte und Beleuchtungssysteme und eine funktionsfähige Abschattung können in Verbindung mit einem guten Gebäudemanagementsystem z. B. den Kühllastbedarf so stark reduzieren, dass auf konventionelle Kühlsysteme verzichtet werden kann. Existierende Bürogebäude im Passivhaus-Standard sind ein gutes Beispiel für die bereits existierenden Technologien, die durch Forschung weiter verbessert und wirtschaftlicher gemacht werden können.

Industrielle
Querschnitts-
techniken

Im Bereich der industriellen Querschnittstechniken wie Elektromotoren und ihren Anwendungen, z. B. für Pumpen, Ventilatoren oder Kompressoren, aber auch für Dampf- und Heißwassererzeuger gibt es bereits heute hocheffiziente wirtschaftliche Techniken und weitere, die noch Forschungsbedarf aufweisen, z. B. Hochtemperatur-Kraft-Wärme-Kopplungstechniken, die mit industriellen Thermoprozessanlagen gekoppelt sind. Durch den hohen Anteil des industriellen Stromverbrauchs sind die Einsparpotenziale auch in diesem Bereich hoch, aber gleichzeitig werden viele derzeit verfügbare und wirtschaftliche Techniken nicht umgesetzt, da die Querschnittstechniken nicht wie Produktionsanlagen im Fokus der Betriebsleiter stehen und die Energiekosten hierfür meist nur einen geringen Anteil an den Produktionskosten haben. Somit birgt allein die Verwendung von besten verfügbaren Techniken (BVT) noch große Einsparpotenziale. Entsprechend kommt der Einführung von BVT eine wichtigere Rolle zu als der FuE – zumindest mittelfristig bis 2025. Beispielsweise können durch Frequenzumrichter zur elektronischen Dreh-

zahlregelung von elektromotorisch betriebenen Systemen und durch die Substitution von druckluftbetriebenen Werkzeugen und Antrieben durch neue Servomotoren hohe wirtschaftliche Einsparpotenziale realisiert werden.

Im Industriesektor ist im Bereich der energieintensiven Industrieprozesse ein hoher FuE-Bedarf zu verzeichnen. Hierbei sind besonders „radikale“ Prozessinnovationen notwendig. Allein mit inkrementellen Verbesserungen der bestehenden Produktionsverfahren wird langfristig kaum eine Effizienzverbesserung von mehr als 10% im Vergleich zum aktuellen Anlagenbestand erreichbar sein. Wichtige Prozesse sind unter dem Aspekt der Energieeffizienz die Herstellung von Papier, Chlor, Elektrostahl, Primäraluminium und Walzstahl. In diesen Prozessbereichen gibt es große Abwärme-Mengen als Verluste, die bisher zu wenig von FuE und unternehmerischen Innovationen adressiert wurden (z. B. ORC-Anlagen, Nah- und Fernwärmenutzung mit entsprechenden unternehmerischen Lösungen).

Energieintensive
Industrieprozesse

Insgesamt zeigt sich bei den meisten Effizienztechniken in diesem Bereich ein ähnliches Muster, welches die Effizienzpotenziale und den FuE-Bedarf beeinflusst: Die lange Lebensdauer des Kapitalbestandes von häufig 20-40 Jahren führt zu langen Reinvestitionszyklen und einer langsamen Verbreitung neuer Verfahren. Gesättigte Märkte mit geringem Wachstumspotenzial in Europa lassen wenig Marktpotenzial erwarten. Die Branchen haben einen hohen Energiekostenanteil, daher wurde bereits in der Vergangenheit ein starker Fokus auf Energieeffizienz gelegt. Es bestehen Befürchtungen, neue Verfahren könnten den Fertigungsprozess negativ beeinflussen. Teilweise erfordern neue Technologien in diesen Bereichen sehr lange Entwicklungszeiten (häufig schon seit 30-40 Jahren ohne Markterfolg). Zudem bestehen starke Hemmnisse bei ihrer Markteinführung, da diese Anlagen sehr kapitalintensiv sind und Fehlinvestitionen den wirtschaftlichen Ruin für ein Unternehmen bedeuten können. Trotz dieser vielen Hemmnisse gibt es immer wieder Beispiele für radikal neue Verfahren bzw. Produkte, wie das „Celitement“, ein Zement, bei dessen Herstellung deutlich weniger Energie verbraucht wird. Hier sind neue Methoden erforderlich, um erfolgversprechende technische Innovationen zu identifizieren und zur Marktreife zu führen.

Lange
Reinvestitionszyklen

3.3.3 Energiesystem

Der schnell gewachsene Anteil von Strom aus den fluktuierenden Quellen Sonne und Wind auf gegenwärtig etwa 15% der Stromerzeugung (in Deutschland mit den sich daraus ergebenden Konsequenzen, z. B. Fallen der Strompreise an der Börse mit teilweise negativen Strompreisen zu bestimmten Zeiten des Überangebots) zeigt die Bedeutung der Betrachtung des gesamten Energiesystems (Stromerzeugung und -nutzung) angesichts eines angestrebten Anteils von 80% bis 100% erneuerbaren Stroms.

Stromnetze	Es gibt eine breite Palette an Optionen. Wichtig sind vor allem die Verteilung durch die Stromnetze und die Steuerung einer flexiblen Stromnachfrage und dezentraler Eigenerzeugung zum Ausgleich der zu erwartenden starken zeitlichen Schwankungen. Zudem können neben regelbaren erneuerbaren Energien auch Speichersysteme zur Sicherung der Systemstabilität und vor allem zum Ausgleich längerer meteorologisch bedingter Angebotsausfälle beitragen.
Speichersysteme	
Veränderungen der Erzeugungs- und Nachfragemuster	Die aktuellen und zukünftig zu erwartenden Veränderungen der Erzeugungs- und Nachfragemuster stellen die elektrischen Energieversorgungsnetze und ihre Komponenten vor wachsende Herausforderungen. Die Transportnetze müssen große und stark volatile Leistungen teils über weite Strecken transportieren. Aufgrund eines erweiterten europäischen Stromhandels müssen die elektrischen Netze vermehrt Transite im pan-europäischen Bereich tragen. Die Verteilungsnetze und ihre Komponenten erhalten mit der verstärkten Aufnahme dezentraler Erzeuger neue Aufgaben im Hinblick auf die Lastflussoptimierung und die Vorhaltung von Systemdienstleistungen, z. B. Regelenergiebereitstellung.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Zur temporären Überbrückung von Engpässen in Übertragungsnetzen steht eine Reihe von Technologien zur Verfügung. Dabei geht es um Maßnahmen zur Erhöhung der Übertragungskapazität vorhandener Leitungen ohne einen wirklichen Netzausbau. Zu den Möglichkeiten gehören der Einsatz von Hochtemperaturleiterseilen oder das Freileitungsmonitoring.

Hochspannungs-
Gleichstrom-
Übertragung

Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Technologien (HGÜ) werden häufig im Kontext pan-europäischer Netz-Szenarien genannt. Sogenannte *Overlay*-Netze oder auch *Super-Grids* bilden eine weitere, oberhalb der heutigen Übertragungsnetze liegende Spannungsebene und ermöglichen einen Stromtransport über den gesamten Kontinent. Der Aufbau auf Gleichstromtechnologie basierende *Overlay*-Netze ist derzeit noch nicht möglich und erfordert die Überwindung technischer Hürden sowie die Entwicklung in Teilen auch völlig neuer Steuerungs- und Schutzkonzepte. Veränderungen in den Anforderungen an die heutigen Verteilnetze durch stärker volatile und dezentrale Erzeugung führen zu einem Anstieg der Bedeutung von lastflusstuernden Elementen in den Stromnetzen. Hinzu kommt ein höherer Flexibilitätsbedarf durch neue Marktkonzepte. Eine große Bedeutung haben steuerbare Elemente wie FACTS (*Flexible AC Transmission System*) auch im Kontext von neuartigen Netzsteuerkonzepten, die z. B. auf Prinzipien der Selbstorganisation beruhen.

Für eine Flexibilisierung der Nachfrage, vor allem in der Industrie, bestehen erhebliche technische Potenziale. Darüber hinaus wird die Integration neuer Verbraucher aus den Sektoren Wärme, Kälte und Verkehr weitere Flexibilisierungspotenziale erschließen. In welchem Umfang diese

Potenziale erschlossen werden können, ist jedoch in hohem Maße ungewiss und hängt teilweise auch von der weiteren Ausgestaltung der Schnittstellen zwischen den Sektoren Strom, Wärme, Kälte und Verkehr ab. Im Bereich des Haushalts- und Gewerbe-Handel-Dienstleistungs-Sektors sind weitere Kosten-Nutzen-Analysen nötig, um festzustellen, in welchem Maße die erforderlichen Anfangsinvestitionen wirtschaftlich sind. Um die in diesem Bereich vielfältigen, aber nur in ihrer Summe relevanten Lastverlagerungspotenziale nutzen zu können, sind die oft diskutierten *Smart Grids* unabdingbar, die auch für die Integration kleiner dezentraler Strom- (und Wärme-) Erzeuger wie Blockheizkraftwerke auf Basis von Verbrennungsmotoren, Mikro-Turbinen oder zukünftig von Brennstoffzellen erforderlich sind, sowie für die Steuerung von Speichern im Netz.

Flexibilisierung der Nachfrage

Speicher können vor allem zur Lösung von zwei Herausforderungen beitragen: Zum einen sind sie in der Lage, eine mengenmäßig größere und längerfristige Differenz zwischen Stromangebot und -nachfrage auszugleichen. Bei einer weitgehend auf erneuerbaren Energien basierenden Stromversorgung ist die Nutzung von Speichern unentbehrlich, insbesondere um Perioden mit geringem Wind- und Sonnenangebot zu überbrücken. Langfristig müssen daher Speicherkapazitäten aufgebaut werden, die für eine Langzeitspeicherung im Tage- und Wochenbereich geeignet sind (darunter Pumpspeicher, Druckluftspeicher, Batteriespeicher und Wasserstoffsysteme). Zum anderen können sie Systemdienstleistungen unabhängig von konventionellen Kraftwerken bereitstellen, beispielsweise Momentan-Reserve, Regelleistung, Blindleistung und Schwarzstartfähigkeit.

Speicher

Bei den elektrochemischen Speichern sind Blei-Säure-Batterien, nickelbasierte Systeme, Hochtemperaturbatterien und Lithium-Ionen-Batterien, *Redox-Flow*-Batterien und Zink-Luft-Batterien zu unterscheiden. Bislang sind elektrochemische Speicher aufgrund ihrer relativ geringen Energiedichte und der hohen Kapitalkosten noch nicht wirtschaftlich einsetzbar. Kostensenkungen sind allerdings bei allen Technologien zu erwarten, insbesondere bei den Lithium-Ionen-Batterien. Hier werden große Hoffnungen im Zusammenhang mit der Elektromobilität gesetzt, die über ihre Nachfrage zu einer deutlichen Kostendegression beitragen könnte. Batterien, die auf Grund der begrenzten Ladezyklenfestigkeit nach einem Einsatz im mobilen Bereich für diesen nicht mehr weiter infrage kommen, könnten danach noch in stationären Anlagen Verwendung finden.

Elektrochemische Speicher

Elektrochemische Speicher eignen sich auch für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen. Besonders reaktionsschnelle Batterien können eingesetzt werden, um den Rückgang von Schwungmassen in einem auf erneuerbaren Energien basierenden Stromsystem zu kompensieren (Momentan-Reserve) und zur Frequenzstabilität beizutragen. Grundsätzlich sind Batteriespeicher auch für den kurz- und mittelfristigen Lastausgleich geeignet. Aufgrund begrenzter Speicherkapazitäten und Selbstentladung

sind Batteriespeicher für einen langfristigen Ausgleich in der Regel nicht geeignet.

Power-to-Gas

Power-to-Gas (PtG)-Technologie ist teurer und stärker verlustbehaftet als andere Speichertechniken. Der Einsatz von PtG zur Rückverstromung ist wirtschaftlich erst dann sinnvoll, wenn effizientere Techniken zum Lastausgleich ausgeschöpft sind. PtG bietet aber vielfältige andere Verwendungsmöglichkeiten, z. B. kann das damit erzeugte Gas ins Erdgasnetz eingespeist werden und somit fossiles Erdgas substituieren, es kann als Grundstoff (*feedstock*) in chemischen Prozessen eingesetzt werden oder als Treibstoff für mobile Anwendungen. Die Kostenstruktur von PtG liegt deutlich über den Kosten anderer Lastausgleich-Optionen. PtG-Anlagen können aufgrund der hohen Kapitalkosten nur mit hohen Volllaststunden wirtschaftlich betrieben werden, gleichzeitig werden aber nur in einer begrenzten Zeit des Jahres Überschüsse aus erneuerbaren Energien vorhanden sein. Dieses Spannungsverhältnis ist insbesondere für die Übergangszeit problematisch, in der noch erhebliche Anteile an fossiler und nuklearer Erzeugung am Netz sind. Insgesamt ist es aufgrund der geringen Wirkungsgrade energetisch nicht sinnvoll, Strom aus erneuerbaren Energien mit hohen Verlusten in Gas umzuwandeln, bevor nicht weitestmöglich fossiles Erdgas mit sehr viel geringeren Verlusten durch erneuerbaren Strom substituiert worden ist (z. B. durch *Power-to-Heat*).

Power-to-Liquid

Die Erzeugung synthetischer Kraftstoffe für den Mobilitätssektor – *Power-to-Liquid* genannt – vermindert den Wirkungsgrad des Systems auf Grund hoher Umwandlungsverluste ebenfalls deutlich, er wird mit etwa 50% angenommen. Jedoch befindet sich dieses Verfahren noch in der Entwicklungsphase.

3.3.4 *Enabler*

Neben den oben beschriebenen speziellen Technologien im Energiebereich gibt es querschnittshafte Technologien, Verfahren und Methoden, die überwiegend aus anderen technischen Gebieten stammen, aber essenziell für den zukünftigen verlässlichen und kosteneffizienten Betrieb des Energiesystems sind.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Sowohl für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und dezentralen Einheiten (z. B. Photovoltaik, Windkraftanlagen, Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen) als auch für die optimale Leistungsregelung von elektrischen Antrieben und Systemen (z. B. für Kompressoren, Pumpen, Hybrid- und Elektrofahrzeuge) sowie für die Stromübertragung, wird effiziente, robuste und kostengünstige Leistungselektronik benötigt.

Leistungselektronik

Elektrochemie wird für die sehr stromintensive Elektrolyse von Grundstoffen wie Aluminium, Kupfer, Chlor sowie den auch energetisch einsetzbaren Wasserstoff benötigt, aber auch für Batteriesysteme und Brennstoffzellen. Die Verfügbarkeit preiswerter Speicher für elektrische

Energie wäre eine große Erleichterung beim Management von fluktuierendem Angebot und Nachfrage. Wenn diese Speicher zusätzlich über eine hohe spezifische Speicherdichte verfügten, wäre der Einsatz von Elektrofahrzeugen äußerst lukrativ. In den Forschungsfeldern der Elektrochemie besteht gegenwärtig ein sehr hoher Forschungsbedarf, der auch auf mittlere bis lange Sicht erhalten bleibt.

Elektrochemie

Informations- und Kommunikationstechnologien, Mess-Steuer-Regel-Technik und mathematische Verfahren spielen auch im Energiebereich eine wichtige Rolle: Viele Prozesse im Energiesystem werden nicht optimal ausgelegt und betrieben, da die numerischen Verfahren zu komplex sind, die Rechnerleistung bzw. -geschwindigkeit nicht ausreicht (z. B. bei verfahrenstechnischen Prozessen oder der Geometrie- und Strömungsoptimierung bei Turbinenschaukeln, Verbrennungsprozessen in Verbrennungsmotoren) oder die Online-Erfassung und Weiterleitung der Betriebsparameter nicht kostengünstig ermöglicht werden kann. Viele Fehlfunktionen und -bedienungen können durch Automatisierung bzw. Fernüberwachung vermieden bzw. frühzeitig erkannt werden. Auch die mithilfe dieser Technologien mögliche Optimierung von Stromangebot und Nachfrage, z. B. bei „virtuellen Regelkraftwerken“, kann die ökonomische und ökologische Effizienz des gesamten Systems erhöhen.

IKT

Mess-Steuer-Regel-
TechnikMathematische
Verfahren

Die Bedeutung der Energiesystemanalyse und -modellierung wird mit zunehmender Durchsetzung von dezentralen Stromerzeugungstechniken und fluktuierenden Energiequellen steigen. Die bisherigen Methoden bedürfen einer permanenten Anpassung an neue Technologien; die zunehmende Bedeutung verteilter Systeme erfordert die Integration von Geo-Informationssystemen (GIS) in die Energiesystem-Modelle. Aber auch neue methodische Erkenntnisse müssen berücksichtigt werden, insbesondere neue Theorien zum Verhalten von Personen, die über den Einsatz neuer Techniken entscheiden, die sich häufig rational verhalten, die Entscheidungen bei begrenzten Informationen treffen müssen und sich auch strategisch verhalten können. Beeinflusst wird dieses Verhalten zudem von sich ändernden Wertesystemen der Investoren und Nutzer. Doch vor der Umsetzung solcher Modelle in die Praxis ist eine umfangreiche empirische Forschung nötig.

Energiesystemanalyse
und -modellierung

Neue Werkstoffe und Materialien steigern die Energieeffizienz: Höhere Temperaturen bedeuten bei den meisten Energieumwandlungsverfahren eine Verbesserung des Umwandlungswirkungsgrades, z. B. bei Dampf- und Gasturbinenprozessen. Hochwarmfeste Materialien, etwa keramische Werkstoffe, bieten hier noch erhebliche, nicht ausgeschöpfte Potenziale.

Neue Werkstoffe und
Materialien

Bei bewegten Teilen bedeutet eine Gewichtsreduktion einen geringeren Energieaufwand zur Beschleunigung. Dies gilt insbesondere für den Verkehrssektor, aber auch bei bewegten Teilen in stationären Anwendungen, z. B. Industrierobotern. Da geringere Massen zudem weniger kinetische Energie speichern, können die mechanischen Konstruktionselemente häufig für geringere Kräfte gestaltet werden, was zu einer weiteren Ge-

wichtsreduktion führt. Die Gewichtsreduktion kann auf vielfältige Weise erreicht werden, z. B. durch sehr leichte, hochfeste oder geschäumte Materialien oder Verbundwerkstoffe. Da die Konstruktionselemente in der Regel aus energieintensiven Materialien bestehen, führt ihre leichtere Konstruktion zu weniger Nachfrage nach diesen Materialien und damit zu einem geringeren Energiebedarf.

Materialien zur
Steigerung der
Energieeffizienz

Materialien mit verbesserten oder völlig neuen Eigenschaften bieten eine Reihe von Ansatzpunkten zur Steigerung der Energieeffizienz: Durch supraleitende Eigenschaften bei „hohen“ Temperaturen können die Verluste in Generatoren, Leitungen und Elektromotoren deutlich gesenkt werden. Materialien, die bei sehr hohen Prozesstemperaturen mechanisch stabil sind, würden eine bessere Wärmedämmung an Hochtemperaturprozessen zur Herstellung von metallischen und nicht metallischen Werkstoffen ermöglichen und so die dabei entstehenden Energieverluste senken. Thermisch superisolierende Materialien lassen deutlich geringere Dämmstoffdicken zu und ziehen mithin deutlich niedrigere Wärmeverluste nach sich. Dies ist bei allen Anwendungen wichtig, bei denen aus Platz- oder ästhetischen Gründen die Wanddicke eine Rolle spielt.

Preiswerte Material-
ien zur Speicherung
thermischer Energie

Preiswerte Materialien, die zur Speicherung thermischer Energie ihre latente Energie nutzen, können zum Durchbruch bei der Nutzung von Solar- oder Abwärme führen. Mit Materialien, die für Strom aber nicht für Wärme leitend sind, können Thermogeneratoren konstruiert werden, die aus Abwärme direkt Strom produzieren können. Preiswerte Materialien, die wie Silizium aus Strahlungsenergie im sichtbaren oder Infrarotbereich direkt Strom erzeugen, bieten große Potenziale für die Nutzung von Solarenergie bzw. zur Kraft-Wärme-Kopplung.

Neue Verfahrens-
techniken

Neue Verfahrenstechniken, z. B. neue Anwendungsfelder für Membranen, ermöglichen die Trennung von Stoffen mit einem deutlich niedrigeren Energieaufwand als thermische Trennverfahren. Lasertechniken bei der Fertigung hochqualitativer Teile ermöglichen einen niedrigeren Energiebedarf. Ebenso mag Ultraschall für Zerkleinerungstechniken oder Infrarot- bzw. Mikrowellentechnik für Trocknungsprozesse neue Effizienzpotenziale eröffnen.

Biotechnologische
Verfahren

Biotechnologische Verfahren können sowohl zur Substitution konventioneller chemischer Produktionsverfahren, als auch zur Herstellung neuer Produkte genutzt werden. Dabei werden Enzyme und Mikroorganismen eingesetzt, um Produkte für verschiedene Industriezweige herzustellen, z. B. die Chemie-, Nahrungs- und Futtermittel-, die Papier- und Zellstoff- sowie die Energieindustrie. Hierbei werden niedrigere spezifische Energiemengen als bei konventionellen Verfahren benötigt, da biotechnologische Verfahren bei niedrigen Drücken und moderaten Temperaturen ablaufen. Allerdings sind in diesen Prozessen die Konzentrationen gering, sodass neue energieeffiziente Separationstechniken erforderlich sind. Mithilfe biotechnologischer Verfahren ist die Produktion von Biomasse für eine stoffliche Nutzung möglich, wodurch andere energieintensiv

hergestellte Produkte substituiert werden können. Auch kann Biomasse mit biotechnologischen Verfahren in flüssige und gasförmige Energieträger umgewandelt werden. Neben Bio-Ethanol und Biogas könnte auch biologisch erzeugter Wasserstoff produziert werden. Durch den Einsatz von Gentechnik lässt sich die Biotechnologie voraussichtlich in einer Reihe von Fällen schneller wirtschaftlich machen (siehe 3.1.1 Biomassebasierte, nachhaltige biotechnische Produktion).

Vielfach werden neue Anlagen zwar grundsätzlich für gut befunden, aber nur, wenn sie nicht im eigenen Umfeld errichtet werden – seien es Windkraftanlagen, Hochspannungsleitungen, Umspannstationen, Biogasanlagen, Stauseen etc. Die Transformation des Energiesystems kann nur gelingen, wenn sie von einer breiten Mehrheit der Bevölkerung, insbesondere von den Nachbarn derartiger Anlagen, getragen wird. Hier existieren langfristig noch große Herausforderungen für die Forschung zur Nutzerpartizipation sowie zu den sich daraus ableitenden geeigneten Beteiligungsverfahren, z. B. mittels Dialogprozessen und Bürgerkapitalfonds.

Forschung zur
Nutzerpartizipation



3.4 Gesundheit und Ernährung

Forschung, um
Gesundheit zu
fördern, Krankheiten
zu bekämpfen und
Versorgung zu
gewährleisten

Vielfältige Wechsel-
wirkungen zwischen
Gesundheit und
Ernährung

Die Gesundheitsforschung nutzt die Potenziale der medizinischen und naturwissenschaftlichen Forschung, um Gesundheit zu fördern, Krankheiten zu bekämpfen und die Versorgung zu gewährleisten. Eine leistungsfähige Gesundheitsforschung ist die Voraussetzung für eine effektive und qualitativ hochwertige medizinische Versorgung, den medizinischen Fortschritt und die Sicherung des erreichten hohen Niveaus der gesundheitlichen Versorgung in Deutschland. Weiterhin trägt die Gesundheitsforschung wesentlich zur Wirtschaftsleistung wichtiger Branchen, zur Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit sowie zum Erhalt und zur Schaffung von Arbeitsplätzen bei. Zwischen Gesundheit und Ernährung bestehen vielfältige Wechselwirkungen. Daher werden beide Themenfelder gemeinsam bearbeitet, wobei für die Ernährung Schwerpunkte auf Ernährungsinformationssysteme sowie Nahrungsmittelallergien gelegt werden, da sich bei diesen Unterthemen die deutlichsten Querbezüge zwischen beiden Bereichen abzeichnen.

Die folgenden sieben Teilgebiete des Forschungs- und Technologiefelds „Gesundheit und Ernährung“ haben neben der im Forschungs- und Technikfeld „Biotechnologie“ bereits angesprochenen Epigenetik besonders hohe Relevanz bis zum Jahr 2030:

1. Ansätze für ein zukunftsfähiges Gesundheitswesen
2. Antworten auf neue Krankheitsherausforderungen
3. Molekulare Analytik und Diagnostik
4. Medizintechnik und *E-Health*
5. Individualisierte Medizin
6. Ernährungsinformationssystem
7. Antworten auf Nahrungsmittelallergien und Unverträglichkeiten

3.4.1 Ansätze für ein zukunftsfähiges Gesundheitswesen

Die Leistungsfähigkeit und Effizienz des deutschen Gesundheitswesens, seiner Strukturen, Finanzierungs- und Steuerungsinstrumente, aber auch die Güte seiner gesundheitsbezogenen Ergebnisse werden immer wieder infrage gestellt.⁸ Gleichzeitig steht das Gesundheitswesen vor enormen Herausforderungen, die in Zukunft zu bewältigen sind: Seien es der demografische Wandel, die allgemeine Zunahme chronischer und psychischer Krankheiten, die Finanzierbarkeit oder der Fachkräftemangel. Entsprechend streiten unterschiedliche Akteure aus Politik, Medizin, Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft seit Jahren mit zum Teil bemer-

⁸ Vgl. die Gutachten des Sachverständigenrates zur Begutachtung der Entwicklung im Gesundheitswesen. URL: www.svr-gesundheit.de. Abgerufen am 17.04.2014.

kenswerter Vehemenz über die Zukunftsfähigkeit und Reformbedürftigkeit des Gesundheitswesens. Klar ist: Um das deutsche Gesundheitswesen in seiner Leistungs- und Zukunftsfähigkeit zu verbessern bzw. den genannten Herausforderungen zu begegnen, bedarf es neuer Ansätze und Lösungskonzepte. Diesbezüglich großes Potenzial und damit hohe Zukunftsrelevanz haben neben a) der medizinisch-naturwissenschaftlichen Gesundheitsforschung, auf die sich die weiteren Teilgebiete des Forschungs- und Technologiefelds „Gesundheit und Ernährung“ mehrheitlich beziehen, und der entsprechenden Translationsforschung, insbesondere b) die Versorgungsforschung sowie c) die System- bzw. Gesundheitssystemforschung. Tatsächlich sind es nicht nur (bio-)medizinisch-technische Innovationen in den Bereichen Diagnostik, Therapie, Prävention, Rehabilitation und Pflege, die das Gesundheitswesen zukunftsfähiger machen (a). Genauso wichtig und bislang stark vernachlässigt ist die Analyse der realen Versorgungswirklichkeit, um daraus Informationen und damit Ansatzpunkte zur Optimierung der Versorgung zu erhalten (b). Von gleichrangiger Bedeutung sind nicht zuletzt auch organisatorische und andere soziale Innovationen zur effizienten und effektiven Gestaltung des Gesundheitswesens, insbesondere des Versorgungssystems (c).

Medizinisch-naturwissenschaftliche Gesundheitsforschung

Versorgungsforschung

System- bzw. Gesundheitssystemforschung

Die (medizinisch-naturwissenschaftliche) Gesundheitsforschung weist spätestens seit dem neuen „Rahmenprogramm Gesundheitsforschung“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung eine hohe Dynamik auf. Diese wird angesichts der zunehmenden Bedeutung, die Gesundheit sowohl aus gesellschaftlicher als auch aus wirtschaftlicher Perspektive zugewiesen wird, weiterhin anhalten. Denn mehr und mehr wird Gesundheit als wichtige Ressource und als ein zentraler Standortfaktor angesehen, der Wachstum, Produktivität und gesellschaftliches Wohlbefinden nachhaltig positiv beeinflusst. So gesehen sind Ausgaben für Gesunderhaltung und Gesundheitsförderung keine Kosten, sondern Zukunftsinvestitionen. Ein solches insbesondere durch den *Public-Health*-Ansatz entwickeltes (neues) Verständnis von Gesundheit bedeutet auch, dass Gesundheit zu einer politischen Querschnittsaufgabe, also in allen Politikfeldern, Thema werden muss (*Health in All Policies*). Vor dem Hintergrund dieses neuen Gesundheitsverständnisses wird auch die Dynamik in der Versorgungs- und Systemforschung in den nächsten Jahren steigen müssen, gerade wenn das Gesundheitswesen insgesamt effizienter und effektiver gestaltet werden soll.⁹ Hier liegen noch enorme Innovationspotenziale verborgen.

Gesundheit als wichtige Ressource

⁹ Vgl. auch Sachverständigenrat zur Begutachtung der Entwicklung im Gesundheitswesen: Koordination und Integration – Gesundheitsversorgung in einer Gesellschaft des längeren Lebens. Gutachten 2009. In: Deutscher Bundestag, 16. Wahlperiode: Drucksache 16/13770, S. 514f., sowie das Querschnittsthema „Versorgungsforschung“ in der Roadmap des Gesundheitsforschungsrates für das Gesundheitsforschungsprogramm der Bundesregierung von 2007, S. 115ff. URL: www.bmbf.de/de/10953.php. Abgerufen am 17.04.2014.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Innovationspotenzial

Die folgenden Anwendungen tragen bereits heute zu einem zukunftsfähigen Gesundheitswesen bei, haben darüber hinaus auch künftig großes Innovationspotenzial. Dabei wird zwischen medizinisch-technischen Innovationen auf der einen („medizinisch-naturwissenschaftliche Gesundheitsforschung“, Definitionsteil a) und organisatorisch-sozialen Innovationen auf der anderen Seite (Definitionsteil (b) „Versorgungsforschung“ und (c) „Gesundheitssystemforschung“) unterschieden. Beispielhaft für medizinisch-technische Innovationen sei hier nur die genetische Diagnostik (mit Differenzialdiagnostik, Pränataldiagnostik, prädiktiver Gendiagnostik) genannt, da in allen anderen Teilgebieten des Forschungs- und Technologiefelds „Gesundheit und Ernährung“ weitere medizinisch-technische Innovationen aufgeführt werden. Wichtige organisatorisch-soziale Innovationen sind etwa neue Versorgungskonzepte wie die integrierte Versorgung (z. B. Gesundes Kinzigtal), neue Kooperationen zwischen Industrie und Krankenkassen (z. B. Initiative Demenzversorgung in der Allgemeinmedizin, IDA) und eine neue Aufgabenverteilung bzw. neue Gesundheitsberufe (z. B. die Delegation ärztlicher Tätigkeiten; Berufe an der Schnittstelle von ärztlicher und nicht ärztlicher Tätigkeit wie der operationstechnische (OTA), anästhesie-technische (ATA) oder chirurgisch-technische Assistent (CTA).

Medizinisch-technisch

Organisatorisch-
sozial

Im Teilgebiet „Ansätze für ein zukunftsfähiges Gesundheitswesen“ ist es wenig sinnvoll, zukünftige Anwendungen nach verschiedenen Branchen zu unterscheiden. Zum einen kann das Gesundheitswesen bzw. die Gesundheitswirtschaft selbst als Branche angesehen werden, zum anderen sind selbst bei einer weiteren Unterteilung die einzelnen Branchen in höchstem Maße von anderen Akteuren und den Rahmenbedingungen im Gesundheitswesen abhängig, man denke nur an die hohe Regulierungsdichte bezüglich Zulassung und Kostenerstattung im Gesundheitswesen.

Beispiel Gentherapie

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial zur Problemlösung bis 2030 verspricht beispielsweise der Bereich der Gentherapie, eine erste wurde in der EU gerade zugelassen.¹⁰ Allerdings bedarf es hier noch erheblicher Forschungsanstrengungen. Das gilt, wie schon erwähnt, auch für die Versorgungs- und für die Systemforschung, will man die vorhandenen Potenziale zur Verbesserung der Versorgung und Strukturierung des Gesundheitswesens ausschöpfen. Hierfür erforderlich sind etwa neue Messinstrumente und Bewertungstools, um die Systemleistung im Hinblick auf Krankenversorgung und Gesundheitsförderung messbar und vergleichbar zu machen. Zudem gilt es, neue Anreiz- und Finanzierungsinstrumente zu entwickeln, die nicht nur für die Krankenbehandlung Im-

¹⁰ uniQure (2012): uniQure's Glybera® First Gene Therapy Approved by European Commission. URL: www.uniqure.com/news/167/182/. Abgerufen am 17.04.2014.

pulse auslösen, sondern auch für die Gesunderhaltung und Gesundheitsförderung.

3.4.2 Antworten auf neue Krankheits Herausforderungen

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts sehen sich auch die Gesundheitssysteme der westlichen Welt, darunter das deutsche Gesundheitswesen, neuen Krankheits Herausforderungen gegenüber. Sie stellen sich in ganz verschiedenen Bereichen der Gesellschaft: Da sind erstens Krankheiten wie Demenz oder Alzheimer, die im Zuge des demografischen Wandels an Bedeutung gewinnen. Zweitens sind neue Krankheits Herausforderungen aufgrund der Globalisierung zu nennen, z. B. internationale Pandemien bzw. Erreger, zunehmend verbreitete Antibiotika-Resistenzen oder neue Verbreitungswege von Krankheiten durch neue Handelswege (etwa der in Zukunft wichtiger werdende Landweg nach Asien). Drittens stellen sich neue Herausforderungen aufgrund des Klimawandels, durch den etwa Infektionskrankheiten neue Chancen zur Ausbreitung erhalten. In der Öffentlichkeit bislang nur wenig wahrgenommen, wird dies in den kommenden Jahren voraussichtlich zum Mega-Thema werden. Viertens entstehen neuartige Krankheits Herausforderungen aufgrund von Lebensstil und Umwelt, als Stichworte seien hier nur das Burnout-Syndrom, ADS/ADHS, Lärm oder Schadstoffe genannt. Fünftens schließlich tragen auch soziale Entwicklungen zur Entstehung von neuen Krankheits Herausforderungen bei, beispielsweise finden sich bei sozial benachteiligten Gruppen andere Krankheitsbilder oder bestimmte Krankheiten deutlich häufiger (z. B. Adipositas) als bei Gruppen mit höherem sozialen Status. Forschung und neue Technologien können in allen Bereichen entscheidende Beiträge dazu liefern, adäquate Antworten auf die neuen Krankheits Herausforderungen zu entwickeln.

Demografischer Wandel

Globalisierung

Klimawandel

Krankheits Herausforderungen aufgrund von Lebensstil und Umwelt

Die skizzierten neuen Krankheits Herausforderungen können je nach Ausmaß enorme – auch volkswirtschaftliche – Konsequenzen nach sich ziehen, man denke nur an die schnelle Ausbreitung von Pandemien, an das gerade bei sozioökonomisch besser gestellten Menschen verbreitete Burn-out-Syndrom oder an den zunehmende Pflegebedarf von Demenzkranken. Allein dadurch ist bereits eine hohe FuT-Relevanz gegeben – ein entsprechendes Engagement der Forschungsförderung vorausgesetzt. Da auch andere westliche Volkswirtschaften mit ähnlichen Problemen konfrontiert sind bzw. manche Probleme (z. B. Pandemien) vor nationalen Grenzen nicht Halt machen, ist eine internationale Zusammenarbeit hier besonders wichtig. Dabei besteht in den genannten Bereichen das Potenzial, dass Deutschland durch früh gesetzte Forschungsimpulse und daran gegebenenfalls anknüpfende Technologieentwicklung in eine internationale Vorreiterrolle hineinwächst.

Internationale Zusammenarbeit wichtig

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Kampf gegen
Antibiotika-
Resistenzen

Erst in diesem Jahr (2013) hat die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina den Staat und die pharmazeutische Industrie aufgerufen, den Kampf gegen die zunehmenden Antibiotika-Resistenzen wieder aufzunehmen.¹¹ Die meisten Pharma-Unternehmen hätten ihre Antibiotika-Forschung mittlerweile eingestellt, da die Gewinnmargen eher gering seien. Bei von staatlicher Seite veränderten Rahmenbedingungen ist es durchaus vorstellbar, dass Pharma-Unternehmen in der Antibiotika-Forschung wieder aktiv werden – das Potenzial, teilweise mit methodisch neuen Forschungsansätzen¹² bis 2030 neue Antibiotika-Wirkstoffe zu entwickeln, ist dann sehr hoch. Diese könnten die Gesundheitsversorgung deutlich verbessern. Die pharmazeutische Industrie ist darüber hinaus angesprochen, wenn es um Arzneimittel gegen neue Infektionskrankheiten geht.

Kampf gegen
Pandemien

Für den Kampf gegen Pandemien, die immer wieder von viralen Pathogenen ausgelöst werden, zeichnen sich in der Synthetischen Biologie vielversprechende Ansätze ab. Damit gerät auch die Biotechnologie-Industrie in den Blick. Mithilfe der Synthetischen Biologie gelang es zum Beispiel kürzlich, die viralen Genome mehrerer entsprechender Pathogene synthetisch zu rekonstruieren und so Mutationen zu identifizieren, die für die Infektiosität der Viren verantwortlich sind. Auf einer solchen Basis könnten dann in einem nächsten Schritt Abwehrstrategien entwickelt werden, etwa Impfstoffe und dabei vor allem nukleinsäurebasierte Impfstoffe, die bei Pandemieausbrüchen schneller als herkömmliche Impfstoffe bereitgestellt werden können. Hierfür gilt es, besser zu verstehen, wie virale Pathogene entstehen und sich verbreiten. Bei saisonalen Grippewellen und auch bei der SARS-Pandemie wurde ein solcher Ansatz bereits verfolgt.

*Ambient Assisted
Living*

Angesichts des demografischen Wandels werden AAL-Techniken (*Ambient Assisted Living*) in der Versorgung zunehmend eine große Rolle spielen (vgl. Abschnitt unten). Auf der einen Seite wächst die Anzahl der Pflegebedürftigen rasant und damit auch der Markt für entsprechende technische Produkte, die Pflegebedürftigen – etwa Demenzkranken – das Leben erleichtern, vor allem, wenn technische Hilfen eine persönliche Betreuung in einem bestimmten Bereich obsolet machen. Auf der anderen Seite sind in Zukunft weitere Fortschritte und Erfolge der zugrunde liegenden Mikrosystemtechnik zu erwarten, zumal ihre Anwendungspotenziale längst nicht ausgeschöpft sind und sich vielfältige Schnittstellen

¹¹ Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina (2013): Akademien empfehlen neue Maßnahmen in der Antibiotika-Forschung. URL: www.leopoldina.org/de/presse/nachrichten/stellungnahme-zur-antibiotika-forschung/. Abgerufen am 17.04.2014.

¹² Lewis, K. (2013): Platforms for antibiotic discovery. In: *Nature Reviews*, Bd.12/Nr.5, S. 371-387.

zum Technologietreiber *Smart Living* (Intelligentes Wohnen) ergeben. Die Herausforderung besteht freilich darin, die technischen Entwicklungen an die spezifischen Bedarfe in der Versorgung anzupassen.

3.4.3 Molekulare Analytik und Diagnostik

Die molekulare Analytik und Diagnostik hat das Ziel, das Vorhandensein, die Ursachen und die Mechanismen von Krankheiten durch In-vivo- und In-vitro-Methoden zu analysieren und zu diagnostizieren. Dafür kommen biotechnologische Verfahren zum Einsatz, die das Vorhandensein von charakteristischen Nukleinsäuren (DNA oder RNA), Proteinen oder Metaboliten (Bestandteilen des (Zell-)Stoffwechsels) nachweisen oder diese Moleküle zum Untersuchungsgegenstand haben. Dabei ist eine Verschiebung von proteinbasierten Tests (sogenannte Immunassays) hin zu nukleinsäurebasierten Nachweisverfahren zu beobachten. Diese sind meist in ihrer Sensitivität und mitunter in ihrer Spezifität den Proteinbasierten Testverfahren überlegen. Das nachgewiesene Molekül oder dessen Veränderung dient im molekularen Analyseverfahren als sogenannter Biomarker¹³. Ein Biomarker kann neben einer Krankheitsdiagnose eine Aussage über eine Krankheitswahrscheinlichkeit oder eine Prognose zum Krankheitsverlauf treffen. Die diagnostische Forschung im Bereich der Biotechnologie zielt auf die Beschreibung und Validierung von Biomarkern sowie die Entwicklung robuster Diagnostik von Krankheiten oder Krankheitsdispositionen mithilfe von Biomarkern ab. Die sogenannten „-omics“-Technologien¹⁴ (*Genomics*, *Proteomics*, *Metabolomics*) bilden dabei die Grundlage für die Weiterentwicklung der biotechnologischen Komponente von analytischen und diagnostischen In-vitro- und In-vivo-Methoden.

Im Rahmen der molekularen Analytik und Diagnostik werden die eben beschriebenen biotechnologischen Nachweisverfahren meist mit technischen Entwicklungen aus der Nanotechnologie, der Mikrosystemtechnik, der Bildgebung und der Informationstechnik kombiniert. Die zukünftigen technologischen Herausforderungen in diesem Teilgebiet bestehen vor allem in der Weiterentwicklung von Messplattformen für parallele Hochdurchsatzanalysen (Chiptechnologien) und Hochdurchsatzdiagnostiken (*Lab on a Chip*-Technologien). Auch dem *Isotope Profiling* (Isotope werden als Marker eingesetzt) wird ein großes

Ursachen und
Mechanismen von
Krankheiten
analysieren und
diagnostizieren

Genomics
Proteomics
Metabolomics

Nanotechnologie
Mikrosystemtechnik
Bildgebung
Informationstechnik

Hochdurchsatz-
analysen

¹³ Biomarker sind nach der Definition der „Biomarker Definitions Working Group“ des „National Institute of Health“ (USA) „charakteristische biologische Merkmale, die objektiv gemessen werden können und als Indikatoren eines normalen biologischen oder krankhaften Prozesses im Körper sowie als Indikator einer pharmakologischen Antwort auf eine therapeutische Intervention dienen können“ (eigene Übersetzung, siehe The Biomarker Definitions Working Group (2001): Biomarkers and surrogate endpoints: preferred definitions and conceptual framework. In: Clinical Pharmacology & Therapeutics, Bd. 69/Nr.3, S. 89-95).

¹⁴ „-omics“ bedeutet, dass jeweils die Gesamtheit bestimmter biologischer Funktionsmoleküle (alle Gene, alle Proteine, alle Metaboliten) aufgeklärt wird.

Potenzial z. B. für die Metabolomik zugesprochen (*Isotope Labelling Assisted Metabolomics*). Ein weiterer limitierender Faktor könnte die nachfolgende informationstechnische Analyse der zum Teil komplexen Daten darstellen.

Diagnoseverfahren

Insgesamt erscheinen Weiterentwicklungen bezüglich der Leistungsfähigkeit, der Miniaturisierung, der Automatisierung, der Geschwindigkeit und der Kosten von Diagnoseverfahren erforderlich. Ebenso sollte bei der Entwicklung von molekularer Diagnostik darauf geachtet werden, die Technik stärker auf den Benutzer abzustimmen, sodass diese von medizinischem Personal oder gar Patienten in routinemäßigen Anwendungen (*Point of Care*) bis hin zu Fachpersonal in Speziallaboren genutzt werden kann.

Insgesamt zeigt die deutsche Diagnostika-Branche mit etwa 10% Ausgaben für FuE am Gesamtumsatz eine ähnliche Forschungsintensität wie die Medizintechnik-Branche (vgl. Abschnitt 3.4.4), liegt aber unter der Forschungsintensität der pharmazeutischen Industrie, die im Durchschnitt etwa 16% für Forschung und Entwicklung aufwendet.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Infektionsdiagnostik

Bisher nimmt die Infektionsdiagnostik einen großen Anteil in der molekularen Analytik ein. Dabei hat der vermehrte Einsatz der sensitiven Nukleinsäure-Analytik für virale Erkrankungen zu einer Verringerung oder Vermeidung der sogenannten „diagnostischen Lücke“ zwischen Infektion und Diagnostizierbarkeit geführt. Auch bei bakteriellen Infektionen kann durch solche Verfahren schnell und zuverlässig abgeklärt werden, ob bei dem Erreger Resistenzen gegen gängige Antibiotika vorliegen, was zum Beispiel bei einer Sepsis von entscheidender Bedeutung sein kann.

Mobile Diagnostik-Anwendungen

Die fortschreitende Miniaturisierung und zunehmende Leistungsfähigkeit findet sich in mobilen Diagnostik-Anwendungen realisiert, die als *Lab-on-a-Chip* eine schnelle und zuverlässige Krankheitsdiagnose in Patientennähe möglich machen. Neben zum Teil schon existierenden Anwendungen zur Diagnose von Infektionskrankheiten werden für die nächsten Jahre Lösungen unter anderem im Bereich der kardiologischen Erkrankungen erwartet.

Kombination von molekularer Diagnostik und bildgebenden Verfahren

Auch findet für einige Krankheiten schon eine Kombination von molekularer Diagnostik und bildgebenden Verfahren Verwendung, vor allem für die Diagnose von Krebserkrankungen und für die Differenzialdiagnose bei Demenzen (d. h. die Unterscheidung von verschiedenen Demenzformen).¹⁵ Im Folgenden sind einige Anwendungsbereiche aufgeführt, die

¹⁵ Dabei werden mithilfe eines radioaktiven Tracers, der an ein für die zu diagnostizierende Krankheit „charakteristisches“ Molekül bindet, krankheitsspezifische Veränderungen „sichtbar“ gemacht.

bereits erste realisierte Anwendungen hervorgebracht haben, bei entsprechenden FuE-Anstrengungen aber auch künftig ein sehr hohes Problemlösungspotenzial aufweisen:

- mobile Diagnostik-Systeme für Infektionskrankheiten, bereits realisiert ist z. B. ein nukleinsäure-basierter Nachweis des Tuberkulose-Erregers sowie einer möglichen Rifampicin-Resistenz (GeneXpert MTB/RIF)¹⁶,
- die Kombination von bildgebenden Verfahren und molekularer Diagnostik, bereits realisiert ist z. B. die PET¹⁷ für das „Sichtbarmachen“ von Plaques bei der Alzheimer-Krankheit mittels eines radioaktiv markierten Tracers, der an die Plaques bindet (Florbetapir von Avid Radiopharmaceuticals/Eli Lilly),
- spezialisierte DNA-Analytik, bereits realisiert ist z. B. eine pränatale DNA-Diagnostik aus dem Blut der Mutter (Praena-TestTM von Lifecodexx; derzeit Trisomie 13, 18 und 21)¹⁸,
- Companion Diagnostics für bestimmte Krebserkrankungen (z. B. mit FISH¹⁹), bereits realisiert ist z. B. ein Test auf Vorhandensein der Amplifikation des HER2/Neu-Gens bei Brustkrebs.

Bei der gendiagnostischen Analyse lag der Fokus bisher auf der Diagnose von monogenetischen Krankheiten²⁰. Mit der Zunahme des Verständnisses der Funktion von Proteinen und der Rolle von genetischen Varianten werden künftig komplexe, multifaktorielle Krankheiten²¹ analysiert werden können. Zudem besteht das Potenzial, dass sich der Schwerpunkt weg von der Krankheitsdiagnose zur Prognose einer Krankheitswahrscheinlichkeit entwickelt. Zum Fortschritt dieser Verfahren werden die „-omics“-Technologien einen bedeutenden Beitrag leisten können. Denkbar ist zudem, dass nicht nur genetische, sondern auch epigenetische Veränderungen analysierbar werden.

Gendiagnostische
Analyse

¹⁶ WHO (2010): WHO endorses new rapid tuberculosis test. London/Genua. URL: www.who.int/mediacentre/news/releases/2010/tb_test_20101208/en/index.html. Abgerufen am 17.04.2014.

¹⁷ Positronen-Emissions-Tomografie; der erwähnte Tracer wurde 2012 von der FDA zugelassen (siehe Garber, K. (2012): First FDA-approved beta-amyloid diagnostic hits the market. In: Nature Biotechnology, Bd. 30/Nr. 7, S. 575).

¹⁸ Scharf, A. (2012): Der PraenaTest aus pränatalmedizinischer Sicht. In: Frauenarzt Bd. 53/Nr.8, S. 2-4.

¹⁹ Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung: eine bereits etablierte Technik, bei der mithilfe eines Fluoreszenz-markierten Moleküls das Vorhandensein von Nukleinsäure nachgewiesen wird. Im Falle von HER2-positivem Brustkrebs soll das vermehrte Vorkommen dieses Gens in der Zelle nachgewiesen werden.

²⁰ Dies sind Krankheiten, die maßgeblich auf Veränderungen in einem einzelnen Gen zurückzuführen sind.

²¹ Das sind Krankheiten, an deren Entstehung eine Vielzahl von Genen beteiligt sind, bei denen Varianten separat nur eine geringe prädisponierende Wirkung aufweisen. Dazu lassen sich z.B. Diabetes mellitus oder koronare Herzerkrankungen rechnen.

Chipbasierte Hochdurchsatzverfahren

Chipbasierte Hochdurchsatzverfahren besitzen das Potenzial, die molekulare Analytik und Diagnostik durch simultane Multiparameteranalytik stark zu verändern. Weitere technische Verbesserungen könnten ultrasensitive Nukleinsäure-Diagnostik möglich machen bis hin zur Sequenzierung von Einzelgenomen, d. h. Einzelmolekül-Analyse. Dies ist zum Beispiel denkbar für die genetische Analyse von Zell-Subpopulationen eines Tumors oder einer befruchteten Eizelle im Rahmen einer künstlichen Befruchtung.

Als visionär sind schließlich implantierte molekulare Diagnostiksysteme einzuschätzen, die In-vivo-Analytik „in Echtzeit“ liefern könnten.

3.4.4 Medizintechnik und *E-Health*

Medizinprodukte

Medizinprodukte decken eine beeindruckende Bandbreite unterschiedlicher Instrumente, Apparate, Geräte, Vorrichtungen und Stoffe ab, die von vergleichsweise einfachen Verbrauchsmaterialien wie Kanülen und Verbandsmaterialien über Implantate und Prothesen bis hin zu hochkomplexen bildgebenden Diagnostik-Systemen reichen. Entsprechend vielfältig sind die Anwendungsbereiche der Medizintechnik. Dazu gehören unter anderem Diagnostik, Hygiene und Sicherheit, Laborausstattungen und -bedarf, Chirurgie, Zell- und Gewebetechnik, Therapiesysteme, Rehabilitation sowie *E-Health*.

E-Health als Oberbegriff

E-Health wird häufig als Oberbegriff für die verschiedenen Anwendungen von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) im Gesundheitsbereich verwendet. Laut WHO kann zwischen drei Anwendungskontexten unterschieden werden²²: 1. die Übertragung von Gesundheitsinformationen über IKT an Fachpersonal und Patienten, 2. die Nutzung von IKT zur Verbesserung der Gesundheitsversorgung und 3. die Anwendung von *E-Commerce* und *E-Business* zum Management im Gesundheitswesen. Damit umfasst *E-Health* unter anderem medizinische Informationssysteme, elektronische Patientenakten, Lebensunterstützung im Alter oder bei Behinderung (*Ambient Assisted Living*, Telemedizin, Online-Dienstleistungen (z. B. Diagnostik, Beratung) und Informationsportale).

Insgesamt spielt die Medizintechnik eine wichtige und in Zukunft weiter wachsende Rolle in der Gesundheitsversorgung. Dabei ist die wissenschaftlich-technische Basis der medizintechnischen Forschung und Entwicklung (FuE) in Deutschland in vielen Bereichen international herausragend. Als Branche sind die deutschen Medizintechnikhersteller sehr gut positioniert und nehmen neben den USA und Japan einen führenden Platz auf dem Weltmarkt ein. Obwohl es sich bei der deutschen Medizintechnik um eine eher kleine Branche innerhalb des verarbeitenden Ge-

²² WHO (2013): E-Health. URL: www.who.int/trade/glossary/story021/en/. Abgerufen am 17.03.2014.

werbes handelt, wird sie aufgrund ihrer hohen FuE-Intensität, ihrer bemerkenswerten Innovationsdynamik und ihrer Beiträge zur medizinischen Versorgung der Bevölkerung als eine wichtige Zukunftsbranche betrachtet.

Tatsächlich weist die Medizintechnik-Branche eine sehr hohe FuT-Relevanz auf: Ihre Forschungsintensität (FuE-Aufwendungen am Umsatz) liegt bei knapp 10% und ist damit etwa doppelt so hoch wie im gesamten verarbeitenden Gewerbe. Hinzu kommt eine starke Exportorientierung der deutschen Medizintechnik, die sich in einer Exportquote von 66% (im Jahr 2011) widerspiegelt.²³ Die vielen innovativen Produkte – „rund ein Drittel des Umsatzes wird mit Produkten erzielt, die jünger als drei Jahre sind“²⁴ – bilden dabei die Grundlage für den wirtschaftlichen Erfolg der Branche im In- und Ausland. Sie können als Indiz für das hohe technologische Problemlösungspotenzial der Medizintechnik gelten.

Medizintechnik-
Branche

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Viel versprechende Entwicklungsmöglichkeiten liegen unter anderem in der Verbindung von Diagnostik und Therapie (sog. *Companion Diagnostics*) mit deutlichen Querbezügen zu einer auf die Medizintechnik bezogenen individualisierten Medizin sowie in Hightech-Prothesen und Bioimplantaten. Zudem schafft die zunehmende IT-Vernetzung auch im Gesundheitswesen neue Möglichkeiten zur Unterstützung der Arbeitsabläufe. Allerdings verläuft die Diffusion von IKT-Anwendungen im Gesundheitswesen im Vergleich zu anderen Sektoren wesentlich langsamer und unterscheidet sich in den einzelnen Anwendungsgebieten teilweise recht stark.

Verbindung von
Diagnostik und
Therapie

Während zum Beispiel der Einsatz von Informationssystemen weit verbreitet ist, stagniert die Anwendung telemedizinischer Anwendungen seit Jahren und ist vor allem auf Forschungsprojekte beschränkt. Dabei ist das Potenzial von *E-Health* zur effizienteren Gestaltung von Prozessen, Vernetzung von Akteuren, zum schnelleren Zugriff auf Daten und deren Übermittlung sowie zur Wissensgenerierung und Qualitätskontrolle und damit letztendlich für mehr Qualität in der Gesundheitsversorgung sowie dem effizienteren Einsatz der zur Verfügung stehenden Mittel unbestritten. Allerdings wirken sich Fragen der Datensicherheit, der Abrechenbarkeit, rechtliche Rahmenbedingungen, mangelnde Interoperabilität sowie unzureichende Passfähigkeit zu bestehenden Prozessen und Arbeitsweisen (*Innovation System Fit*) noch hindernd auf die Umsetzung aus. Während also die technologische „Reife“ als gut einzuschätzen ist und im Forschungsbereich eine relativ große Dynamik herrscht, hängt die

Telemedizinische
Anwendungen

²³ Lenkungskreis für den Nationalen Strategieprozess „Innovationen in der Medizintechnik“ (Hrsg.) (2012): Schlussbericht. Berlin. URL: www.strategieprozess-medizintechnik.de/. Abgerufen am 17.04.2014.

²⁴ Ebd.

Games for Health

zukünftige Diffusion von *E-Health*-Anwendungen im Gesundheitswesen noch stark von der Entwicklung der Rahmenbedingungen ab. In Zukunft könnten auch spielerische Ansätze (*Games for Health*), z. B. als Lösungsansatz für Veränderungen des Gesundheitsverhaltens, eine Rolle spielen.

Kostendruck im
Gesundheitswesen
prägend

Für die Entwicklungen in der Medizintechnik insgesamt wird in den kommenden Jahren der Kostendruck im Gesundheitswesen prägend sein. Das heißt, aus technologischer Sicht sind viele Neuentwicklungen denkbar, jedoch wird die tatsächliche Dynamik auch von Fragen der Kostenerstattung abhängen, da im Gesundheitswesen stärker als bisher nach dem Mehrwert neuer Lösungen gefragt wird. Gerade die Unternehmen reagieren hierauf, indem sie Kostenerwägungen stärker in der Entwicklung berücksichtigen.

Bereits existente Anwendungen mit langfristig großem Ausbaupotenzial sind:

- Implantate aus biologischen Materialien, z. B. ein Implantat aus Hydrogel zum Einsatz in den Bandscheiben der Halswirbelsäule,
- *Point of Care Testing* (POCT), z. B. die mobile Bestimmung von Blutglukose, Metaboliten und Enzymen, Blutgas- und Elektrolytanalytik sowie Allergie- und Erregerdiagnostik,
- Hightech-Prothesen, z. B. Hightech-Beine und Hightech-Greifarme,
- Apps zur OP-Unterstützung, z. B. eine Tablet-App zur Planung und Unterstützung von Leber-Operationen,
- digitale Bildkommunikations- und Archivierungssysteme zur Speicherung und zum Austausch von Bildern der bildgebenden Diagnostik zwischen Leistungserbringern,
- Teleradiologie, z. B. bildgebende Untersuchung, bei der sich der Radiologe nicht am Ort der Durchführung befindet.

Implantate

Bildgebende
Verfahren

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial zur weiteren Problemlösung bis 2030 versprechen dementsprechend Forschungsbemühungen unter anderem im Bereich der Implantate, beispielsweise neuartige Schrauben-Implantate aus künstlichem (biokeramischem) Knochenmaterial anstatt aus nicht vom Körper abbaubarem Titan. Auch im Bereich bildgebender Verfahren werden Innovationen erwartet. So erlaubt etwa die Multiphotonen-Mikroskopie die Darstellung subzellulärer Strukturen mit einer Auflösung von wenigen Mikrometern in allen drei Achsen. Damit können dreidimensionale Bilder ohne Kontrastmittelgabe – etwa bei einer Darmspiegelung – rekonstruiert werden, was mit anderen Techniken in dieser Form nicht möglich ist. Darüber hinaus könnte eine weiterentwickelte moderne Laser-Chirurgie die Überlebenschancen durch die vollständige Entfernung von Gehirntumoren erheblich verbessern.

Großes Problemlösungspotenzial haben zudem Hightech-Prothesen. Dazu zählen auch Sehprothesen, zu deren Entwicklung Neurowissenschaften und Elektrotechnik bereits zusammenarbeiten, denn eine zentrale klärungsbedürftige Frage lautet, wie künstlich erzeugte elektrische Signale direkt ins Gehirn eingespeist und dort verarbeitet werden können. Die immensen Fortschritte in der Hirnforschung werden die Medizintechnik langfristig stark bereichern, z. B. in der Verbindung von Nervenzellen, Steuerung von Implantaten oder auch der künstlichen Steuerung von Stoffwechselprozessen.

Hightech-Prothesen

Auch die auf die Medizintechnik bezogene individualisierte Medizin verspricht hohes Potenzial zur Problemlösung. Ansätze, die Innovationen erwarten lassen, finden sich nicht nur im Bereich der biomarkerbasierten In-vitro-Diagnostik zur Stratifizierung von Patientenkollektiven, sondern auch in Bezug auf maßgeschneiderte medizintechnische Lösungen etwa für Herz-Kreislauf-Patienten und im Bereich der sogenannten *Companion Diagnostics*; hier wird versucht, die Gabe eines „individuellen“ Wirkstoffs direkt mit dem entsprechenden molekulargenetischen Nachweis zu verknüpfen. Dabei spielen sowohl die Entwicklung von geeigneten Biomarkern als auch von robusten und oftmals dezentral einsetzbaren mobilen Diagnostik-Systemen eine wichtige Rolle (*Point of Care Testing*, POCT).

Medizintechnik und individualisierte Medizin

Zu den *E-Health*-Anwendungen schließlich, von denen ein hohes Problemlösungspotenzial zu erwarten ist, gehören Telemedizin und Telemonitoring in der Versorgung chronisch Kranker. Während einerseits mehr Menschen an chronischen Erkrankungen leiden, sind andererseits Mittel und Fachkräfte für ihre Versorgung begrenzt. Die technischen Entwicklungen im Bereich Telemedizin und Telemonitoring bieten da zunehmend vielversprechende Ansätze, etwa für die Betreuung zu Hause, die fachübergreifende Betreuung und die Aktivierung und Einbindung der Ressourcen des Patienten. Auch die Entwicklung neuer Software und Tablet-Apps wird rasant voranschreiten. Und während elektronische Patientenakten bisher vor allem organisationsintern geführt werden, bietet die anvisierte sogenannte „Elektronische Gesundheitskarte (EGK)“ die Chance, den Zugang zu einer umfassenden organisationsübergreifenden Patientenakte herzustellen. Bislang werden auf der elektronischen Gesundheitskarte lediglich administrative Daten erfasst, diese sollen jedoch sukzessive um zusätzliche Informationen erweitert werden.²⁵ Dazu gehören zum Beispiel Notfalldaten, Patientenverfügungen, Arzneimitteldokumentation, elektronische Arztbriefe, Laborbefunde, Krankengeschichte etc. So können Zeitersparnisse realisiert, Doppeluntersuchungen reduziert und im Notfall auf umfassende Informationen zurückgegriffen werden.

Telemedizin und Telemonitoring in der Versorgung chronisch Kranker

²⁵ Diese Daten werden nicht auf der EGK selbst gespeichert; die Karte stellt vielmehr einen Zugangs-„Schlüssel“ zu einer Datenbank dar.

3.4.5 Individualisierte Medizin

Postgenomforschung

Jedes Lebewesen ist mit einer individuellen genetischen Information ausgestattet. Aus der Totalsequenzierung des menschlichen Genoms und der sich anschließenden Postgenomforschung zur Aufklärung von Struktur und Funktion des menschlichen Genoms erwachsen Kenntnisse und Methoden zur diagnostischen und therapeutischen Nutzung dieser individuellen Information für eine individualisierte Medizin²⁶. Die individualisierte Medizin zielt darauf ab, durch neuartige Biomarker eine feinere, klinisch relevante Unterteilung (Stratifizierung) von zunächst einheitlich erscheinenden Patientengruppen vorzunehmen, um diese Untergruppen differenziert zu behandeln²⁷. So kann beispielsweise schon vor einer Medikamentengabe untersucht werden, ob eine bestimmte Patientengruppe (bzw. in der Versorgung ein einzelner Patient) auf die Therapie ansprechen und sie vertragen wird. Die hierzu eingesetzten molekularen Biomarker können auf Ebene des Genoms, Transkriptom, Proteoms und Metaboloms genutzt werden. Dabei dienen sie nicht nur als Marker für eine stratifizierte Therapie, sondern können fallweise auch in der Diagnostik sowie als molekulare Risikoprädiktoren mit dem Ziel einer verbesserten Früherkennung und Prävention zum Einsatz kommen.

Stratifizierung

Genom
Transkriptom
Proteom
Metabolom

Nutrigenomik und
Nutrigenetik

Durch Kombination mit neuen Erkenntnissen der Ernährungsforschung wird das Prinzip der individuellen Anpassung auch auf Ernährungskonzepte übertragbar (vgl. Abschnitt 3.4.6). Nutrigenomik und Nutrigenetik liefern Aufschlüsse über genetische Prädispositionen und Wirkung spezieller Nahrungsmittel im menschlichen Organismus (vgl. Abschnitt 3.4.7). Die Hirnforschung wird weitere Erkenntnisse liefern, wie die Steuerung des Stoffwechsels abläuft. Aus all diesen neuen Kenntnissen können individualisierte Ernährungskonzepte abgeleitet werden. Ebenso können mithilfe des neuen Wissens aus der Nutrigenomik individualisierte Nahrungsmittel zugeschnitten auf individuelle und/oder situative Anforderungen (z. B. genetische Prädispositionen, Allergien, altersbedingte Anforderungen) entwickelt werden.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Zu den wesentlichen Problemen der heutigen Medikamentenentwicklung und Therapieansätze zählen die unzureichende Wirksamkeit und Sicherheit von Medikamenten, geringe Effizienz bei der Medikamentenentwicklung, lange Entwicklungszeiten sowie damit verknüpft hohe Kosten aufseiten der pharmazeutischen Industrie. Eine individualisierte Medizin

²⁶ Trusheim, M. R. et al. (2007): Stratified medicine: strategic and economic implications of combining drugs and clinical biomarkers. In: Nature Reviews Drug Discovery, Bd. 6/Nr. 4, S. 287-93; Hüsing, B. et al. (2008): Individualisierte Medizin und Gesundheitssystem. TAB Arbeitsbericht Nr. 126. Berlin.

²⁷ Hüsing, B. (2010): Individualisierte Medizin – Potenziale und Handlungsbedarf. In: Zeitschrift für Evidenz, Fortbildung und Qualität im Gesundheitswesen, Bd. 104/Nr. 10, S. 725-729.

kann nicht nur zu einer qualitativen Verbesserung der Gesundheitsversorgung und zur Verringerung von Fehlversorgung und unerwünschten Nebenwirkungen beitragen, sondern auch die Innovationsprozesse in der Pharma- und Diagnostika-Industrie deutlich fördern.

Die Grundidee einer individualisierten Medizin beruht auf der Erfassung des individuellen Gesundheitszustandes von Patienten. Hierfür werden geeignete Biomarker benötigt. Bislang liegt – vor allem technologisch bedingt – der Fokus auf genetischen Biomarkern, doch sind Biomarker auf Ebene des Transkriptoms, Proteoms oder Metaboloms möglicherweise für die Charakterisierung des aktuellen Gesundheitszustandes aussagekräftiger. Nach wie vor stellt die Identifizierung und klinische Validierung von Biomarkern eine zentrale Herausforderung der individualisierten Medizin dar²⁸. Zudem müssen durch translationale Forschung und *Health Technology Assessment* der klinische Nutzen dieser Biomarker für eine an den Patienten optimal angepasste Therapie nachgewiesen und Strukturanpassungen in der Gesundheitsversorgung für die klinische Anwendung individualisierter Interventionen vorgenommen werden. Dazu zählt auch, dass im klinischen Bereich eine leistungsfähige IT-Infrastruktur zum effizienten Management der im Zuge einer individualisierten Medizin anfallenden enormen Datenmengen zur Verfügung steht. Bei Anwendungen der individualisierten Medizin im Bereich der Neurologie besteht außerdem Forschungs- und Methodenentwicklungsbedarf, um die interindividuelle Variabilität von Gehirnstrukturen und -funktionen besser zu erfassen und für Forschung und klinische Anwendung nutzbar zu machen. Auch der Einfluss von Umweltfaktoren, darunter Ernährung, auf den Gesundheitszustand ist mit dem der individualisierten Medizin zugrunde liegenden konzeptionellen und methodischen Ansatz bislang erst ansatzweise untersucht.

Biomarker

Klinischer Nutzen
der Biomarker

Die individualisierte Medizin kann prinzipiell über den gesamten Verlauf einer Krankheit von der prädiktiven Ermittlung individueller Erkrankungsrisiken über Prävention, Frühdiagnose und Diagnose, Therapie, Rehabilitation und Nachsorge zum Einsatz kommen und hat somit ein sehr großes Problemlösungspotenzial bis 2030 und darüber hinaus²⁹. Schon realisiert sind eine Reihe von „Paketangeboten“ aus Medikament und begleitendem Labortest, die im Sinne einer individualisierten Arzneimitteltherapie zugelassen sind: Abacavir (Behandlung von HIV/AIDS, begleitender Gentest zur Überwachung von Nebenwirkungen) und jeweils als Test auf Wirksamkeit Arsentrioxid (Leukämie), Bosutinib (Leukämie), Brentuximab (Lymphome), Crizotinib (Lungenkrebs),

Individualisierte Medizin über den
gesamten Verlauf
einer Krankheit

²⁸ Ebd.; European Science Foundation (2012): *ESF Forward Look Personalized Medicine for the European Citizen*. Strasburg.

²⁹ Hüsing, B. (2010): Individualisierte Medizin – Potenziale und Handlungsbedarf. In: *Zeitschrift für Evidenz, Fortbildung und Qualität im Gesundheitswesen*, Bd. 104/Nr. 10, S. 725-729.

„Paketangebote“ aus
Medikament und
begleitendem
Laborfest

Dasatinib (Leukämie), Erlotinib (Lungenkrebs), Everolimus (Brustkrebs), Exemestan (Brustkrebs), Fulvestrant (Brustkrebs), Gefitinib (Lungenkrebs), Imatinib (Leukämie), Ivacaftor (Mukoviszidose), Lapatinib (Brustkrebs), Maraviroc (HIV/AIDS), Nilotinib (Leukämie), Panitumab (Darmkrebs), Pertuzumab (Brustkrebs), Ponatinib (Leukämie), Toremifen (Brust- und Magenkrebs), Trastuzumab (Brustkrebs), Vemurafenib (Melanom). Mitte 2013 waren in Deutschland insgesamt 25 Wirkstoffe zugelassen, für die jeweils ein begleitender diagnostischer Test vorgeschrieben ist,³⁰ die mit Abstand meisten davon für die Krebstherapie. Trotz der dynamischen Entwicklung der letzten Jahre handelt es sich hierbei um einen Nischenmarkt, der weniger als 1% der zugelassenen Medikamente umfasst.

Effizienzsteigerungen

Von der individualisierten Medizin werden erhebliche Problemlösungsbeiträge für das Gesundheitswesen erwartet. Insbesondere sollen sich die Versorgungsqualität verbessern und Fehlversorgungen und Nebenwirkungen verringern. Dies kann zu einer Verbesserung der Kosteneffizienz im Gesundheitswesen führen. Für die pharmazeutische Industrie werden Effizienzsteigerungen in der FuE sowie die Erschließung neuer Wirkstoffe, Zielstrukturen sowie neuer Wirk- und Therapieprinzipien erwartet. Zudem können Diagnostik und Therapie als Paketlösungen angeboten werden. Für die medizintechnische und die diagnostische Industrie birgt die Entwicklung das Potenzial, diagnostische Verfahren und Produkte auf allen Stufen der medizinischen Leistungserbringung zu etablieren und damit gegenüber dem derzeitigen Stand deutlich auszuweiten. Die hohen Erwartungen an die individualisierte Medizin beispielsweise für die künftige Krebsbehandlung werden auch durch folgendes Zitat³¹ deutlich: „Developing personalized medicine in oncology is not an option – it is now considered as an irreversible trend“.

Prävention und Früh-
erkennung

Derzeit absehbare Anwendungspotenziale umfassen folgende Bereiche:³² Identifizierung von noch gesunden Personen mit erhöhtem Erkrankungsrisiko für eine bestimmte Krankheit mit dem Ziel, Präventionsmaßnahmen zu ergreifen; Früherkennung von Krankheiten mit dem Ziel, durch Intervention bereits in einem frühen Stadium den Krankheitsverlauf günstig zu beeinflussen; Erhöhung der Genauigkeit von Krankheitsdiagnosen und -prognosen, indem Krankheiten zusätzlich auf molekularer Basis klassifiziert werden; Einsatz therapiebestimmender und -begleitender Diagnostik mit dem Ziel, Auswahl und Dosierung von

³⁰ Eigene Recherchen Fraunhofer ISI in der Datenbank Phmaprojects. URL: www.vfa.de/de/arzneimittel-forschung/datenbanken-zu-arzneimitteln/individualisierte-medizin.html. Abgerufen am 17.04.2014.

³¹ Andre, F. et al. (2013): Personalized medicine in oncology. In: *Pharmacogenomics* 14, S. 931-939, hier S. 936.

³² Ebd. S. 931-939; Hüsing, B. (2010): Individualisierte Medizin – Potenziale und Handlungsbedarf. In: *Zeitschrift für Evidenz, Fortbildung und Qualität im Gesundheitswesen*, Bd. 104/Nr. 10, S. 725-729.

Arzneimitteln im Hinblick auf Wirksamkeit, Nebenwirkungen, Krankheitsverlauf und Adhärenz patientengruppenspezifisch zu optimieren („individualisierte Arzneimitteltherapie“); Einsatz im Nachsorge-Monitoring mit dem Ziel, eine Veränderung des Gesundheitszustands frühzeitig erkennen und geeignete Maßnahmen ergreifen zu können.

Multiskalenmodelle, die mithilfe vielfältiger Biomarker, unter Nutzung der Konzepte der Systembiologie bzw. -medizin und der Bioinformatik, den menschlichen Gesundheitszustand adäquat abbilden und den Einfluss von Lebensstil bzw. medizinischer Intervention in silico adäquat simulieren können, befinden sich noch in der Grundlagenforschung.

Multiskalenmodelle

Durch die sehr dynamische Entwicklung auf dem Gebiet der Hochdurchsatz-DNA-Sequenzierung gelangen Anwendungen in den Bereich der technischen Machbarkeit (z. B. Totalgenom-Sequenzierungen von Neugeborenen), die wissenschaftlich noch unzureichend erforscht, ihr medizinischer Nutzen und ihre gesellschaftliche Wünschbarkeit kaum diskutiert und deren ethische und rechtliche Aspekte erst ansatzweise reflektiert worden sind³³.

Hochdurchsatz-DNA-Sequenzierung

3.4.6 Ernährungsinformationssystem

Die Auswirkungen der Ernährung auf die Gesundheit sind sehr vielfältig und bedeutend, häufig sind sie umstritten oder der neueste Stand der Forschung ist den Konsumenten im Detail unbekannt. Ernährungsinformationssysteme könnten in Zukunft einen Beitrag zu einer gesunden Ernährung der Bevölkerung leisten.

Sowohl die Auswahl von gesunden Lebensmitteln als auch ein gesundes Ernährungsverhalten haben zentrale Bedeutung für die menschliche Gesundheit und das Wohlbefinden. Mittels neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse und Messmethoden, aber auch durch die gezielte Anwendung, Weiterentwicklung und Verknüpfung bestehender Techniken kann ein Informationssystem gestaltet werden, das Konsumentinnen und Konsumenten mit relevanten Informationen über eine gesunde Ernährung versorgen kann und bei der Gestaltung einer individuellen gesunden Ernährungsweise unterstützt. Hier spielt die Erfassung von Informationen und Verhaltensweisen eine Rolle als Voraussetzung für das Ernährungsinformationssystem. Hinzu kommen die Möglichkeiten der Verknüpfung dieser Daten mit weiteren Informationen. Aus dieser Zusammenführung und Verarbeitung resultieren die individuellen oder auch allgemein relevanten Ernährungsinformationen.

Auswahl von gesunden Lebensmitteln

Gesundes Ernährungsverhalten

Ein Ernährungsinformationssystem könnte nicht nur für den Endkunden gesundheitlich relevante Informationen bereitstellen, sondern auch an einzelnen Stationen entlang der Nahrungsmittelversorgungskette sowie

³³ Projektgruppe EURAT (2013): Stellungnahme Eckpunkte für eine Heidelberger Praxis der Ganzgenomsequenzierung. Marsilius-Kolleg der Universität Heidelberg.

für Multiplikatoren, wie zum Beispiel Ernährungsberater oder Ärzte, die dann mit individuell spezifischen Informationen und Empfehlungen weiter arbeiten könnten.

Steigende Inzidenz
ernährungsbedingter
Erkrankungen

Grundsätzlich ist die Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln und Nährstoffen in ausreichender Qualität und Quantität für eine gesunde Ernährung in Deutschland gegeben. Dennoch steigt die Inzidenz ernährungsbedingter Erkrankungen an.³⁴ Die Lücke, die sich hier zeigt, kann unterschiedliche Ursachen haben: Eine davon sind Informationen, die Verbraucher benötigen, oft aber nicht in geeigneter Form oder am relevanten Zeitpunkt oder Ort verfügbar sind. Ein Erfordernis für eine gesunde Ernährung ist daher die Versorgung der Bürger mit relevanten Informationen bzgl. der Nahrungsmittel. Die Kenntnis über das Lebensmittel, seine Zusammensetzung, ernährungsphysiologisch relevante Informationen, die Herkunft, Verarbeitung und gegebenenfalls die Ermittlung der aktuellen Qualität kann immer mehr durch technische und technologische Möglichkeiten unterstützt werden. Hier kann mit Techniken, zum Beispiel über RFID-Chips, eine geschlossene Nachverfolgung sichergestellt werden und zudem die Information darüber dem Kunden verfügbar gemacht werden. Andererseits könnte zum Beispiel mit optischen Methoden oder Bio-Chips die aktuelle Qualität eines Lebensmittels bestimmt werden.

RFID-Chips

Individuell optimal
angepasste
Zusammenstellung
der
Nahrung

Ein weiterer Aspekt, der durch ein Ernährungsinformationssystem unterstützt werden könnte, ist das individuelle Ernährungsverhalten und eine optimal angepasste Zusammenstellung der Nahrung, was eine hohe gesundheitliche Relevanz hat. Hier könnten ernährungsbezogene und gesundheitlich relevante Informationen einen positiven Beitrag zu geeignetem Verhalten leisten. Technische Anwendungen wie zum Beispiel Apps für Smartphones existieren bereits, sie ermöglichen es Konsumentinnen und Konsumenten, Informationen über das individuelle Verhalten zu erfassen. Dies kann eine Unterstützung sein, um das Ernährungsverhalten objektiviert zu erfassen und auch Verknüpfung zu gesundheitlich relevanten, hinterlegten Informationen herzustellen.

„omics“-Technologien

Ein vergleichsweise junges Gebiet der Wissenschaft, die sogenannten „omics“-Technologien, könnten völlig neue Perspektiven für ein Ernährungsinformationssystem eröffnen. Diese Ansätze ermöglichen Einblicke in die individuellen physiologischen Anforderungen von Konsumenten und Konsumentinnen an Nahrungsmittel und Ernährung.

Nutrigenomik und
Nutrigenetik

Die Nutrigenomik und Nutrigenetik verbinden die Genomforschung mit der Ernährungsforschung, der pflanzlichen Biotechnologie sowie mit der Medizin und erforschen das Zusammenspiel zwischen Genen und Ernährung. Es geht dabei vor allem darum, Zusammenhänge zwischen indivi-

³⁴ BMBF (2013): Fördermaßnahme „Kompetenzcluster der Ernährungsforschung“ im Rahmen der Hightech-Strategie 2020, BMBF URL: <http://www.bmbf.de/foerderungen/22014.php>. Abgerufen am 17.04.2014.

duellen genetischen Anlagen, Reaktionen auf Nahrungsmittel und Einflüsse der Ernährung auf die Expression von Genen zu untersuchen³⁵. Dies zielt auch darauf ab, das Auftreten von Erkrankungen wie Krebs oder Diabetes aufzuklären. In der Epigenetik wurde bereits argumentiert, dass die Nahrungsaufnahme den Phänotypen des Menschen oder seine Krankheitsanfälligkeit (für Diabetes Mellitus etc.) beeinflusst. Ebenfalls mit Fragestellungen der Anwendung der „omics“-Technologien auf Nahrung und Ernährung befassen sich Wissenschaftler im Forschungsbereich *Foodomics*.³⁶ Das Research Institute NUTRIM beispielsweise erforscht aktuell im Bereich der Nutrigenomik das Zusammenspiel der Gene mit der Umwelt und Ernährung, um diese in Beziehung zu Krankheit oder Gesundheit stellen zu können.³⁷

Foodomics

Es sind mehrere bestehende technische Möglichkeiten und wissenschaftliche Methoden, auf denen das Ernährungsinformationssystem basieren würde. Gerade eine zweckmäßige Gestaltung und Verknüpfung könnte solch ein System ermöglichen und Konsumenten eine angemessene Übersetzung in das eigene Ernährungsverhalten erlauben.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Im Ansatz existieren Anwendungen, die in Zukunft Bestandteile eines Ernährungsinformationssystems sein könnten, bereits (z. B. Smartphone Apps), allerdings ohne Bezug zu individuellen Ernährungsansprüchen. Solche Apps zeigen dem Nutzer enthaltene Nährwerte nach dem Einscannen des Barcodes an. Entwicklungen gehen einerseits in Richtung anderer Technologien wie RFID-Tags, die von Smartphones gelesen werden können und weitaus mehr Informationen zum Lebensmittel enthalten als Barcodes, andererseits in Richtung personalisierter Apps, die Ernährungsansprüche oder Allergien des Nutzers kennen und ihn automatisch vor unverträglichen Lebensmitteln warnen sollen bzw. die Alarm schlagen, wenn bestimmte Nahrungsmittelbestandteile in zu großer Menge verzehrt werden.

RFID-Tags

Personalisierte Apps

Eine weitere Möglichkeit, vor oder bei dem Erwerb Informationen über die Nahrungsmittel verfügbar zu machen, sind handliche mobile Geräte, mit deren Hilfe direkt die aktuelle Qualität eines Lebensmittels bestimmt werden kann und so zum Beispiel natürliche Abbauvorgänge und möglicher Verderb erkannt werden können. Schon länger wird darüber diskutiert, ob und wie RFID (*Radio Frequency Identification*) in Form von Tags in der Lebensmittelindustrie eingesetzt werden kann. Verschiedene Ideen kristallisieren sich heraus, so wird überlegt, ob die Tags eine höhe-

Handliche
mobile Geräte

³⁵ Chadwick, R. (2004): Nutrigenomics, individualism and public health. In: Proceedings of the Nutrition Society, Bd. 63/Nr. 1, S. 161-166.

³⁶ Cifuentes, A. (2013): Foodomics: Advanced Mass Spectrometry in Modern Food Science and Nutrition. New York, Wiley.

³⁷ Mariman, E. (2006): Nutrigenomics and nutrigenetics: the „omics‘ revolution in nutritional science. In: Biotechnol Appl Biochem, Bd. 44, S. 119-28.

re Rückverfolgbarkeit von Lebensmitteln sicherstellen können. Außerdem gibt es Ideen, mittels dieser Tags beispielsweise Kühlsysteme zu steuern. Smartphones können bekanntlich Tags auslesen und dem Kunden Informationen bereitstellen.

Die beschriebenen relevanten Technologien betreffen somit einerseits die Erfassung von Informationen über die Nahrungsmittel und individuelle Informationen über die Konsumentinnen und Konsumenten. Andererseits betreffen sie die Verarbeitung und Verwaltung dieser Informationen sowie ihre individuelle Verknüpfung. In diesen genannten Bereichen werden im Folgenden mögliche Entwicklungen aufgezeigt.

Lebensmittelqualität, RFID-Tags

Mittels RFID-Tags kann neben der automatischen Identifizierung und Lokalisierung auch die Erfassung und die Bereitstellung von Daten erheblich erleichtert werden:

Intelligente Warenbegleiter für Informationen bzgl. Herkunft, Transport, Zwischenlagerung, Verarbeitung, Händler

Sogenannte intelligente Warenbegleiter (RFID-Label) können zum Beispiel Informationen bzgl. Herkunft, Transport, Zwischenlagerung, Verarbeitung, Händler usw. bereitstellen. Solche Labels könnten darüber hinaus automatisch geortet und der durchgehende Weg von Lebensmitteln entlang der ganzen Nahrungsmittelversorgungskette verfolgt werden. Dies eröffnet somit neue Optionen für die Rückverfolgbarkeit oder die Sicherstellung einer geschlossenen Kühlkette. Neue Entwicklungen gehen dahin, auch Daten zu den Inhaltsstoffen zu speichern, die so mit bestimmten Ernährungsprogrammen verbunden werden können. Gerade diese Daten könnten, verknüpft mit weiteren Informationen, zur Erstellung individueller Ernährungsinformationen dienen.

Ein neues Verfahren bringt RFID-Tags nicht außen an der Ware an, sondern integriert essbare RFID-Chips in die Lebensmittel selbst.³⁸ Solche, direkt im Essen enthaltene RFID-Chips können genutzt werden, um die Nahrungsmittelkette besser zu überwachen. Die Lebensmittel mit den Chips könnten mit einem geeigneten Lesegerät auch vom Konsumenten ausgelesen werden. Der Nutzer erfährt so alles Wesentliche über das entsprechende Produkt, einschließlich der Information, wie viel man davon essen sollte. Durch Verknüpfung mit weiteren individuellen Daten könnte eine individuell gesunde Ernährung unterstützt und ein ungeeignetes Konsumverhalten vermieden werden.

Hohe Kosten
Fehlende
Standardisierung

Trotz der positiven Tests von RFID-Systemen hat sich bisher eine flächendeckende Anwendung nicht durchsetzen können. Das liegt zum einen an den noch hohen Kosten, zum anderen an fehlender Standardisierung sowie technischen Problemen.

³⁸ Fox, B. (2007): Invention: Edible RFID. URL: www.newscientist.com/article/dn11162-invention-edible-rfid.html. Abgerufen am 17.04.2014.

Technische Möglichkeiten zur Erfassung des eigenen Ernährungszustandes und Ernährungsverhaltens

Seit einigen Jahren formiert sich, bislang vor allem in den USA, ein neuer Trend unter dem Namen *Quantified Self*. Dabei erfassen Menschen mithilfe beispielsweise von Smartphones ihre täglichen Aktivitäten und Zustände (z. B. den Puls) selbst. Dieses Konzept ist sowohl auf eine Erfassung des individuellen, aktuellen Ernährungszustandes übertragbar als auch auf die individuelle Erfassung der Nahrungsmittelauswahl und -aufnahme.

Quantified Self

Die Erfassung des Ernährungszustandes könnte durch Messung der aktuellen, individuellen Verfügbarkeit wichtiger Stoffe im Organismus Rückschlüsse auf den aktuellen Bedarf der Zuführung von Nahrungsmitteln liefern. So könnte beispielsweise auch der Hydratierungszustand älterer Menschen mobil erfasst werden um Rückschlüsse auf den Flüssigkeitsbedarf abzuleiten. Dies könnte sowohl bei Menschen mit besonderen Anforderungen (z. B. aufgrund von Mangelernährung) als auch für die reguläre Nahrungsaufnahme punktgenau den Bedarf nach Nahrungsmitteln im Allgemeinen oder nach speziellen Nährstoffen aufzeigen.

Hydratierungszustand
älterer Menschen

Weiterhin kann dieses Konzept auch auf das Ernährungsverhalten übertragen werden. Hier ist beispielsweise eine Erfassung der konsumierten Nahrungsmittel und des individuellen Ernährungsverhaltens möglich (z. B. mit einer Kamera, die in eine Brille o.ä. integriert ist). Dadurch kann das eigene Verhalten einerseits gut überblickt werden, andererseits können durch Verknüpfung der erhobenen Daten mit vorliegenden Informationen zu den Nahrungsmitteln und individuellen Anforderungen Empfehlungen für eine gesunde Ernährung abgeleitet werden. Die technischen Grundlagen für die neuen Anwendungen auf Smartphones und später möglicherweise neuartiger Hardware werden zunehmend und noch über einen langen Zeitraum erweitert. Beiträge zu Verhaltensänderungen hierzu werden von der Psychologie erwartet.

Beiträge
der Psychologie
erwartet

Verfahren zur Ermittlung der Lebensmittelqualität

Für die Schnelldetektion von qualitätsrelevanten Parametern von Lebensmitteln werden verschiedene Messmethoden und -systeme entwickelt. Hier liegt der Fokus oft auf kostengünstigen und robusten Systemen (z. B. Gas-Sensorarray, Frischescanner zur Analyse der Bakterienanzahl auf dem Fleisch, leistungsfähige Biosensoren). Eine Fortentwicklung und weitere Miniaturisierung könnte solche Anwendungen künftig auch für den Endkunden nutzbar machen. Möglich wäre hier zum Beispiel der Einsatz kleiner optischer Scanner, die mobil in Smartphones integriert sind und jederzeit eine Bestimmung der aktuellen Produktqualität ermöglichen.

Kleine optische
Scanner, in
Smartphones
integriert

*Designer Food
Functional Foods*

Nutrigenomik

Ein zentrales Ziel der Nutrigenomik ist es, differierende Effekte von Nahrungsbestandteilen und/oder Diäten auf die Expression des Genoms zu untersuchen. Die Nutrigenetik befasst sich mit der individuellen genetischen Situation und der durch diese bedingten Reaktionen von Konsumentinnen und Konsumenten auf die Ernährung. Diese Erkenntnisse sollen genutzt werden, um Risiken für ernährungsassoziierte Erkrankungen präziser zu bestimmen. Sowohl Nutrigenomik als auch Nutrigenetik könnten einen wichtigen Beitrag leisten, um künftig Nahrungsmittel zu entwickeln, die sich für eine individuell gesunde Ernährung, aber auch in der medizinischen Prävention und Behandlung einsetzen lassen. Dazu gehören die Entwicklung spezieller Typen von *Designer Food* oder *Functional Foods* (wie die „Impfbanane“), *Nutraceuticals* (Nahrungsmittel mit pharmazeutischer Wirkung) und von Nahrungszusatzstoffen.

Wichtige Erkenntnisse für Übergewichtigkeit und Diabetes erwartet

Die Nutrigenomik könnte künftig die individuelle Verträglichkeit, aber auch Anforderungen an die Ernährung allgemein oder die Ernährung in speziellen Lebenssituationen (z. B. bei einer Diät) klären. Für Übergewichtigkeit und Diabetes beispielsweise werden von dieser jungen Wissenschaftsdisziplin wichtige Erkenntnisse erwartet.³⁹ Die dafür notwendigen Entscheidungsgrundlagen zu erarbeiten erfordert aber weiterhin und über lange Zeit noch sehr viel Forschung.

Businessmodelle

Service-Innovationen

Die beschriebenen Aspekte Lebensmittelqualität und Ernährungsverhalten sowie der individuelle Bedarf an Nährstoffen könnten durch Kombination mit den Erkenntnissen aus der Nutrigenomik und Nutrigenetik individualisierte Beiträge zur Ausgestaltung einer personalisierten Ernährung liefern. So könnten individuelle Ernährungspläne die optimalen Lebensmittel (Qualität und Quantität) für ein angepasstes und gesundes Ernährungsverhalten gewährleisten. Sowohl die Erhebung der individuellen genetischen Prädisposition als auch die Bereitstellung der grundlegenden wissenschaftlichen Erkenntnisse sowie deren Vernetzung mit den individuell erhobenen Informationen könnten durch zahlreiche Service-Innovationen und Dienstleistungen erfolgen.

In Summe könnte mit dem Ernährungsinformationssystem eine individualisierte und situativ angepasste Ernährung unterstützt werden. Die Herstellung und Erzeugung der individualisierten Nahrungsmittel erfordert die Anwendung und weitere Entwicklung innovativer Technologien. Durch die Bereitstellung der individuellen Daten an Lebensmittelhersteller könnten dort die Nahrungsmittel individualisiert produziert werden. Bei solchen Produzenten oder längerfristig auch dezentral bei jedem

³⁹ Ärzte Zeitung (2009): Dem Geschmack der Gene auf der Spur. URL: www.aerztezeitung.de/medizin/fachbereiche/sonstige_fachbereiche/ernaehrung/article/556918/geschmack-gene-spur.html. Abgerufen am 17.04.2014.

Konsumenten könnten neue Technologien z. B. das *3-D-Printing* unter Verwendung spezieller Rohstoffe die Herstellung individuell zugeschnittener Lebensmittel erledigen.

3-D-Printing

Das Forschungsgebiet *Medical Food* verfolgt ebenfalls das Ziel, Nahrungsmittel für spezielle Konsumenten bereitzustellen. *Medical Foods* gehen jedoch über die positive gesundheitliche Wirkung verschiedener Lebensmittel hinaus und adressieren spezielle Krankheiten. Sie sollen eine spezifische Versorgung gewährleisten, die mit konventionellen Nahrungsmitteln nicht erfüllt werden kann, d. h. durch den Konsum von *Medical Foods* sollen Menschen mit konkreten Erkrankungen mit Stoffen versorgt werden, die die Erkrankung positiv beeinflussen. Solche *Medical Foods* werden bereits für verschiedene Erkrankungen entwickelt und untersucht, z. B. für Alzheimer⁴⁰ oder Angina⁴¹. Künftige Erkenntnisse aus den Forschungsbereichen der „omics“-Technologien könnten es künftig ermöglichen, für viele weitere Erkrankungen geeignete *Medical Foods* zu entwickeln.

Forschungsgebiet
Medical Food

Medical Foods könnten in Kombination mit der oben beschriebenen Erfassung der individuellen Bedürfnisse die personalisierte Ernährung noch erweitern hin zu einer individualisierten Ernährung mit *Medical Foods* bei speziellen Erkrankungen.

3.4.7 Antworten auf Nahrungsmittelallergien und -unverträglichkeiten

Seit einigen Jahren wird in Deutschland eine Zunahme der Nahrungsmittelunverträglichkeiten und Nahrungsmittelallergien vor allem bei Kleinkindern und Kindern festgestellt. Teilweise werden diese „ausgewachsen“, das heißt nach einer gewissen Zeit verschwinden die Symptome wieder. Dies ist jedoch nicht immer der Fall.

Aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Richtungen gibt es neue Ansätze, wie der zunehmenden Inzidenz von Nahrungsmittelallergien und -unverträglichkeiten begegnet werden kann. Hier wird einerseits erforscht, wie und warum diese entstehen, andererseits werden konkrete Maßnahmen für den Umgang mit diesen entwickelt. Einige sind indirekte Maßnahmen, die sich auf die Qualität der Lebensmittel und die Auslöser der Allergien beziehen. Es werden aber auch Methoden entwickelt, die auf eine direkte Behandlung betroffener Bürger abzielen. Wie bei dem Ernährungsinformationssystem könnten hier die „-omics“-Technologien Aufschlüsse liefern – sowohl bezüglich der Entstehung als auch einer

Methoden für eine
direkte Behandlung

⁴⁰ Scheltens, P. et al. (2010): Efficacy of a medical food in mild Alzheimer's disease: A randomized, con-trolled trial. In: Alzheimer's & Dementia, Bd. 6/Nr. 1, S. 1-10.

⁴¹ Maxwell, A. et al. (2002): Randomized trial of a medical food for the dietary management of chronic, stable angina. In: The Journal of the American College of Cardiology, Bd.39/Nr. 1, S. 37-45.

Anpassung (z. B. der Ernährung) und möglicher Behandlung von Nahrungsmittelallergien und -unverträglichkeiten.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

„Antisense-Strategie“

Hinsichtlich der Qualität der Nahrungsmittel stehen insbesondere Lebensmittel und Ernährungspläne im Fokus, das heißt, es wird der Ansatz verfolgt, Nahrungsmittel so zu gestalten, dass diese die Allergie auslösenden Stoffe nicht enthalten. Neue Entwicklungen sind hier speziell gezüchtete Pflanzen, die ein geringes Allergiepotenzial haben (z. B. Erdnüsse ohne ein allergieauslösendes Protein). Weitere gentechnische Methoden werden verfolgt, z. B. eine „Antisense-Strategie“ zur Reduzierung allergener Bestandteile in Kartoffeln.⁴² Auch Kuhmilch ohne allergenes Eiweiß existiert (die gentechnisch veränderte Kuh erzeugt Milch ohne das Eiweiß Beta-Laktoglobulin.⁴³).

Mikrobiom-Forschung, Probiotika und Prebiotika

Darmflora

Das Mikrobiom bezeichnet die Gesamtheit aller auf und im Menschen vorkommenden Mikroorganismen. Forschungen deuten darauf hin, dass das Mikrobiom, speziell die Darmflora, einen Einfluss auf die Entwicklung von Nahrungsmittelallergien hat.⁴⁴ Das Mikrobiom des Verdauungstrakts scheint in der frühen Entwicklung des Immunsystems eine große Rolle zu spielen. Bei voranschreitendem Verständnis des Zusammenhangs zwischen Mikrobiom und Allergieentstehung ergibt sich eine mögliche präventive Therapie zur Vermeidung von erworbenen Allergien in der frühen, gezielten Beeinflussung der Diversität und Zusammensetzung der Darmflora. Dabei könnten zwei Strategien zum Einsatz kommen, um die Zusammensetzung der Darmflora hin zu nützlichen Kommensalen zu beeinflussen: einerseits die Gabe bestimmter nützlicher Mikroorganismen, sogenannter Probiotika⁴⁵. Diese sollen durch ihren günstigen Einfluss auf die Magen-Darm-Flora das Risiko verringern, Allergien zu entwickeln oder allergisch zu reagieren, aber auch Allergien überwinden helfen. Andererseits könnte die Gabe bestimmter nicht verdaubarer Nahrungsbestandteile, sogenannter Prebiotika, die Zusammensetzung des Mikrobioms im Verdauungstrakt indirekt beeinflussen und so positive Effekte bewirken. Allerdings setzt eine effektive Therapie eine genaue Kenntnis der komplexen Abläufe in der frühen Immunsystembildung sowie die Kenntnisse zu den beteiligten Mikroorganismen

Metagenomanalyse

⁴² Initiative Biosicherheit des BMBFs (ohne Jahr): Antisense. URL: www.biosicherheit.de/lexikon/775.antisense.html. Abgerufen am 17.04.2014.

⁴³ Wagner, S. et al. (2012): Targeted microRNA expression in dairy cattle directs production of β -lactoglobulin-free, high-casein milk. In: PNAS, Bd.109/Nr. 42.

⁴⁴ Molloy, J. et al. (2013): The Potential Link between Gut Microbiota and IgE-Mediated Food Allergy in Early Life. In: Int. J. Environ. Res. Public Health, Bd. 10/Nr. 12, S. 7235-7256.

⁴⁵ Castellazzi, A. et al. (2013): Probiotics and food allergy. In: Italian Journal of Pediatrics, Bd. 39, S. 47.

voraus. Metagenomanalysen (d. h. eine gentechnische Analyse eines gesamten Biotops mit dem Ziel, die daran beteiligten Lebewesen zu identifizieren und deren Häufigkeit zu bestimmen) können zur Klärung der letzten Frage einen wichtigen Beitrag leisten.

Die Betrachtung der bisherigen experimentellen Studien zum Thema ergibt hier noch kein einheitliches Bild. Der Hauptgrund hierfür könnte darin liegen, dass noch viele Fragen bestehen bezüglich beteiligter Genera oder Spezies sowie deren Bedeutung.

Nachweismethoden für Allergene in Nahrungsmitteln

Wichtig für Menschen mit Nahrungsmittelallergien ist zunächst ein zuverlässiger Nachweis der Allergene in den Nahrungsmitteln. Wie das Beispiel der Spuren von Nüssen bereits gezeigt hat, ist Verbraucherinnen und Verbrauchern gegebenenfalls schwer ersichtlich, welche Allergene in einem Lebensmittel enthalten sind oder sein könnten. Hier könnten künftig zunehmend molekularbiologische Methoden, die Spuren allergener Nahrungsmittel in zusammengesetzten Lebensmitteln spezifisch und sensitiv nachweisen können, als Routinediagnostik eingeführt und breit zugänglich werden. Sowohl die Optimierung bestehender Systeme als auch die Entwicklung genauerer, zeit- und kostensparender Nachweismethoden, mit denen eine sehr empfindliche Testung auf ein breites Spektrum an Allergenen durchgeführt werden kann, lassen hier auf neue Möglichkeiten hoffen.

Allergene ggf.
schwer ersichtlich

Nachweismethoden für Nahrungsmittelallergien bei Betroffenen

Neben der Kenntnis um Allergene und unverträgliche Stoffe in den Lebensmitteln ist es für einzelne Individuen wichtig, eine genaue Diagnose möglicherweise vorliegender Allergien zu erhalten. Denn oft ist bei Allergien auf Lebensmittel, die zumeist sehr komplexe Stoffgemische darstellen, nicht klar, auf welche Inhaltsstoffe genau die allergische Reaktion erfolgt. So wird aktuell an verschiedenen Tests gearbeitet, die solch eine Diagnose zuverlässig ermöglichen sollen (s.o.).⁴⁶

Lebensmittel zumeist
sehr komplexe
Stoffgemische

Erkenntnisse über die individuelle Prädisposition für Allergien und Nahrungsmittelunverträglichkeiten und die Ursachen des konkreten Auftretens und gegebenenfalls späteren Abklingens von Allergien könnten künftig gerade auch mittels der „omics“-Technologien gewonnen werden. Nach Beantwortung dieser Fragen könnte es langfristig möglich werden, Maßnahmen zur Bekämpfung von Allergien zu identifizieren. Dadurch könnten künftig völlig neue Therapien entwickelt werden, die bei den physiologischen Ursachen der Allergie bzw. Unverträglichkeit ansetzen. Weiterhin könnten so individuell maßgeschneiderte Konzepte für Betroffene bereitgestellt werden.

Individuelle
Prädisposition für
Allergien

⁴⁶ Asero, R. (2007): IgE-Mediated food allergy diagnosis: Current status and new perspectives. In: Mol Nutr Food Res, Bd. 51, S. 135-147.

Reduzierung der Allergenität und Unverträglichkeit von Lebensmitteln durch züchterische und gentechnische Methoden

Da es bislang noch keine an den Krankheitsursachen ansetzende Therapiemethode für Lebensmittelallergien gibt, erscheint der Ansatz zielführend, Pflanzen so zu züchten oder zu modifizieren, dass ihr allergenes Potenzial verringert wird. Dies kann dadurch erfolgen, dass zum Beispiel ein Protein, das zu Allergien oder Unverträglichkeiten führt, in einem Organismus nicht mehr erzeugt (exprimiert) wird und somit in dem daraus gewonnenen Nahrungsmittel nicht enthalten ist.

Biosynthese
allergener Proteine
unterdrücken

Ein spezieller Ansatz zur Reduzierung der natürlichen Allergenität von Pflanzen ist die sogenannte „Antisense-Strategie“. Hierbei soll die Biosynthese von Proteinen unterdrückt werden. Ein genetisch modifizierter Reis ohne die bedeutenden Allergene könnte für Menschen mit Allergien auf dieses Grundnahrungsmittel deutliche Erleichterung bedeuten.

Produktion
hypoallergener Milch
auf züchterischem
Wege

Andere, auch Deutschland weitverbreitete Phänomene sind die Laktoseintoleranz sowie Milchproteinallergien. Während sich für die Erzeugung laktosefreier Milch technische Lösungen anbieten, könnte die Produktion hypoallergener Milch auf züchterischem Wege eine vielversprechende Alternative sein. Bisherige Verfahren, das allergene Milchprotein (Beta-Laktoglobulin) nachträglich aus der Kuhmilch zu entfernen, sind oft aufwändig und nur bedingt erfolgreich. Neuseeländische Forscher verfügen bereits über eine gentechnisch veränderte Kuh, die Milch ohne allergenes Protein liefert.⁴⁷

Erdnüsse

Ein weiteres Beispiel für eine Reduzierung der Allergenität durch gentechnische Methoden sind Erdnüsse. Bei betroffenen Personen können schon winzige Spuren von Erdnüssen ausreichen, um schwere Reaktionen bis hin zu einem allergischen Schock auszulösen. Solche Spuren finden sich in vielen verarbeiteten Lebensmitteln.⁴⁸ Eine neue Erdnuss-Sorte wurde bereits gezüchtet, die sich durch ein verringertes allergenes Potenzial auszeichnet, hier könnte künftig idealerweise eine Erdnuss gezüchtet werden, die kein allergenes Potenzial mehr aufweist.

Neben diesen genannten Beispielen, bei denen bereits erste Schritte zur Gewinnung von Nahrungsmitteln ohne Allergene gemacht wurden aber weitere Fortschritte erzielt werden könnten, könnte künftig einer Vielzahl von Unverträglichkeiten oder Allergien gegenüber pflanzlichen oder tierischen Lebensmitteln mittels züchterischer und/oder gentechnischer Verfahren begegnet werden. Aufgrund der Situation der Gentechnik im

⁴⁷ Wagner, S. et al. (2012): Targeted microRNA expression in dairy cattle directs production of β -lactoglobulin-free, high-casein milk. In: PNAS, Bd.109/Nr. 42.

⁴⁸ Mikitaa, C. et al. (2012): Can we explain the allergenicity of peanuts on the basis of the three-dimensional structure of its allergens and use the information to devise means of eliminating peanut allergy? In: Medical Hypotheses, Bd.79/Nr. 5, S. 585-591.

Lebensmittelbereich (relevant sind hier grüne und rote Gentechnik) in Deutschland könnten hier gerade klassische züchterische Ansätze hilfreich sein, um einer steigenden Inzidenz von Nahrungsmittelallergien und -unverträglichkeiten entgegenzuwirken. Züchterische Maßnahmen können neben der Adressierung von Allergien und Unverträglichkeiten auch eine grundlegende Verbesserung von Nahrungsmitteln ermöglichen durch Optimierung der Gehalte an erwünschten Inhaltsstoffen (z. B. Vitamine, erwünschte Aminosäuren und Fettsäuren) oder Verringerung von wenig wertvollen oder unerwünschten Inhaltsstoffen.

Klassische
züchterische Ansätze

Technische Methoden zur Herstellung von Lebensmitteln ohne Allergene: 3-D-Printing und Bioprinting

Neben der Züchtung oder Modifikation von pflanzlichen oder tierischen Lebensmitteln eignen sich verschiedene Technologien, um künftig Nahrungsmittel so zu gestalten, dass diese kein oder kaum mehr allergenes Potenzial aufweisen. Es könnte so möglich sein, für individuelle Allergikerinnen und Allergiker die Lebensmittel so zu gestalten, dass kein Allergierisiko von ihnen ausgeht. Bereits *Food Fortifying* oder *Functional Foods* gestalten Lebensmittel nach definierten Maßgaben und mit der Absicht, spezielle gesundheitlich relevante Eigenschaften oder Funktionalitäten in Lebensmitteln zu erzielen. Eine Möglichkeit, die weit darüber hinaus geht und in Zukunft die Verfügbarkeit von maßgeschneiderten Lebensmitteln für individuelle Ansprüche (z. B. Allergien und Unverträglichkeiten) gewährleisten könnte, ist das Drucken individualisierter Nahrungsmittel mittels 3-D-Printing. Erste Ansätze, die in diese Richtung weisen, gibt es bereits.

Food Fortifying
Functional Foods

Die Technologie des 3-D-Druckens als additives Verfahren wird bereits für verschiedene Anwendungen genutzt (z. B. im Maschinenbau). Künftig könnten gerade Menschen mit besonderen Ansprüchen an ihre Ernährung hier individuell zusammengesetzte Nahrungsmittel herstellen. Die Möglichkeiten der individuellen Gestaltung, die das 3-D-Drucken bietet, könnten durch die Kombination mit geeigneten Substraten zum Drucken und unter Verzicht auf allergene Bestandteile neue Perspektiven für Allergiker bieten. Versuche, die in diese Richtung weisen, sind z. B. das *Bioprinting* von Fleisch aus lebenden Zellen. Das Fleisch soll hierbei aus einer Biotinte gedruckt werden, in der sich verschiedene Zelltypen befinden.⁴⁹ Das Ziel ist allerdings noch nicht, biologisches Gewebe zu Ernährungszwecken herzustellen. Diese Anwendung zeigt jedoch eine relevante Richtung auf und könnte eine weitere Entwicklung für verschiedene Nahrungsmittel eröffnen.

Bioprinting von
Fleisch aus
lebenden Zellen

⁴⁹ Modern Meadow (ohne Jahreszahl): Solution. URL: modernmeadow.com/about/solution/. Abgerufen am 17.04.2014.



3.5 Informations- und Kommunikationstechnologie

Erfassung, Speicherung, Verarbeitung, Übertragung und Ausgabe von Informationen

Unter dem Begriff „Informations- und Kommunikationstechnologie“ (IKT) werden Techniken verstanden, die für die Erfassung, Speicherung, Verarbeitung, Übertragung und Ausgabe von Informationen aller Art verwendet werden. Aufgegangen sind darin seit Anfang der 1980er-Jahre nach und nach die klassische Telekommunikation, die Datenverarbeitung und die digitalen Medien (Konvergenz). Grob lässt sich die IKT in die Teilbereiche Hardware, Software, Kommunikations-/Übertragungstechnik sowie IT-Services⁵⁰ einteilen; die zukünftig relevanten Teilgebiete liegen jedoch quer dazu. Langfristig über 2030 hinaus könnte IKT auch völlig anders definiert werden.

Innovative Querschnittstechnologie

In den letzten 30 Jahren hat sich die IKT zu einer entscheidenden innovativen Querschnittstechnologie entwickelt, die eine Schlüsselrolle für die Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit vieler Branchen spielt und in alle Bereiche des täglichen Lebens Einzug gehalten hat. Zu Beginn dieser Entwicklung haben teilweise noch die innovativen Funktionen der Basistechnologien wie Mikroelektronik oder Kommunikationstechnik die Entwicklung vorangetrieben.⁵¹ Seit der Verfügbarkeit weitgehend standardisierter Hardware und Kommunikationstechnik werden innovative Funktionalitäten und Anwendungen nicht mehr über Hard- sondern vorwiegend über Software realisiert. Je weiter die IKT als Querschnittstechnologie Einzug in praktisch alle Wirtschafts- und viele private Bereiche gefunden hat, desto mehr liegen die Herausforderungen für die Forschung in der Integration vielfach bereits existierender Technik in großtechnische Systeme und ihre Optimierung.⁵² In der Anwen-

⁵⁰ Gerade die Entwicklung von Übertragungstechniken ist vorwiegend inkrementell orientiert, wobei es um die immer weitere Effizienzsteigerung existierender Technologien geht. Radikale Innovationen werden im Bereich der Infrastrukturtechnologien wegen der erheblichen Investitionsmittel i.d.R. so lange wie möglich hinausgezögert. Beispiel ist der Mobilfunk, bei dem „Beyond LTE“ mit dem Horizont 2020+ als Weiterentwicklung und Zusammenführung verschiedener Techniken vorangetrieben wird. Ebenso zielt die Förderung zu „Future Internet“ mehr auf Infrastrukturen und Anwendungen als auf neue Netzwerkarchitekturen oder Protokolle. Ein vor gut zehn Jahren diskutierter „clean slate“, d.h. der Aufbau eines völlig neuen Internets, das alle Anforderungen bereits im Grunddesign berücksichtigt, wurde zwar als wissenschaftlich reizvoll diskutiert, praktisch aber nicht ernsthaft in Erwägung gezogen, vgl. Rexford, J.; Devrolis, C. (2010): Future Internet Architecture: Clean-Slate Versus Evolutionary Research. In: Communications of the ACM 53, Nr. 9, S. 36-40.

⁵¹ Allerdings haben Innovationsprojekte aus reiner Technologieperspektive auch in der Frühzeit der IKT nicht wirklich überzeugende Ergebnisse hervorgebracht (z.B. Förderung des deutschen Megabit-chips oder Bildschirmtextes/BTX).

⁵² Van Den Ende, J. C. M.; Dolfmsa, W. A. (2005): Technology-push, demand-pull and the shaping of technological paradigms - Patterns in the development of computing technology. In: Journal of Evolutionary Economics Bd. 15/Nr. 1, S. 83-99.

derung werden diese Systeme immer kleiner und „unsichtbarer“, z. B. wird vielfach erwartet, dass die Funktionen von Smartphones langfristig in Kleidung oder Alltagsgegenstände integriert sein werden. Dies erfordert Forschung und Entwicklung der IKT genauso wie der Materialwissenschaften.

Stand und Entwicklung der IKT-Basistechnologien

Prozessoren, Speicher

Lange Jahre folgte die Entwicklung der wichtigsten Bauelemente von Informations- und Kommunikationstechnik (Prozessoren, Speicher) der Logik von Moores Gesetz, nach dem sich die Dichte integrierter Schaltkreise mit minimalen Komponentenkosten alle 12 bis 24 Monate verdoppelt.⁵³ Gleichzeitig wurde lange Zeit die Verarbeitungsgeschwindigkeit durch immer höhere Taktraten gesteigert. Dies verursachte allerdings einen steigenden Energieverbrauch, der über die ebenfalls erhöhte Wärmeentwicklung zu Problemen bei den immer kleineren Endgeräten (Notebooks, Tablets, Smartphones) führte. Dies wird sich bei den in Zukunft immer wichtigeren eingebetteten Systemen und *Wearables*⁵⁴ fortsetzen.

Moores Gesetz

Probleme bei immer kleineren Endgeräten

Seit wenigen Jahren ist man von der Erhöhung der Taktraten abgekommen und setzt stattdessen auf Mehrkernprozessoren, bei denen jeder der Kerne mit vergleichsweise geringen Taktraten auskommt. Die System-Performance steigt durch jeden weiteren Kern und gleichzeitig sinkt – im besten Fall – durch die geringen Frequenzen die Energieaufnahme. Seither liefern sich die Hersteller im Wesentlichen einen Wettbewerb in Bezug auf die höchste Rechenleistung per Watt, da die Entwicklung bei der Kapazität von Energiespeichern (Akkus) langsamer als die Entwicklung der Prozessorleistung voranschreitet. Koomey et al. charakterisieren diesen Trend folgendermaßen: „...the power needed to perform a task requiring a fixed number of computations will fall by half every 1.5 years, enabling mobile devices to become smaller and less power consuming and making many more mobile computing applications feasi-

Mehrkernprozessoren

⁵³ Moores Gesetz ist ein besonders gutes Beispiel für eine sich selbst erfüllende Prognose: Da das „Gesetz“ in der Halbleiterindustrie allgemein akzeptiert wird, setzt diese alles daran, durch gezielte Forschung und Entwicklung diesen Trend auch weiterhin aufrechtzuerhalten; vgl. beispielsweise die jährlichen Technologie-Roadmaps für Halbleiter: itrs.net. URL: www.itrs.net. Abgerufen am 17.04.2014.

⁵⁴ *Wearables* (tragbare Computersysteme) werden vom Menschen während der Benutzung am Körper getragen. Vorboten dieses Trends, die bereits die Marktreife erreicht haben, sind die Datenbrille *Google Glass*, intelligente Armbanduhren (*Smartwatches*) oder Fitnessarmbänder; vgl. Mann, S.; Michael, K. (Hrsg.) (2013): Proceedings of the 2013 IEEE International Symposium on Technology and Society (ISTAS 2013). Social Implications of Wearable Computing and Augmented Reality in Everyday Life. 27 - 29 June 2013, Toronto, Canada. Piscataway: IEEE Press.

ble.⁵⁵ Allerdings steigt wie bei jeder Form der Parallelverarbeitung die Leistung des Gesamtsystems nicht proportional zur Anzahl der Kerne, da sich nicht alle Verarbeitungsschritte einer Software parallel zueinander ausführen lassen.⁵⁶ Dies ist auch der Hauptgrund dafür, dass sich die Leistung herkömmlicher Computersysteme durch die Vervielfachung der Prozessorkerne i.d.R. nicht beliebig steigern lässt.

Speicherkapazität
mit exponentieller
Entwicklung

Ähnlich wie bei den Prozessoren hat die Entwicklung der Leistungsfähigkeit (Speicherkapazität) von Hauptspeichern und externen Speichern eine exponentielle Entwicklung genommen; physikalische Grenzen konnten durch innovative Lösungen immer wieder umgangen werden. Hier gibt es einen Trend zu Festkörperspeichern und statischen magnetischen Speichern mit einer kurzen Latenzzeit. Durch die gleichzeitige Verfügbarkeit immer höherer Übertragungsbandbreiten im Internet wird Speicher zunehmend auch als *Storage as a Service* genutzt. Getrieben wird die Entwicklung von Prozessoren, Speichern und anderen IKT-Halbleiterbauelementen vor allem durch die Industrie außerhalb Europas (vor allem USA, Japan, Südkorea und Taiwan), die momentan versucht, das Potenzial der klassischen Halbleitertechnik so lange wie möglich auszureizen, bis alternative Technologien die notwendige Reife aufweisen⁵⁷, was sukzessive und mittelfristig der Fall sein wird.

Storage as a Service

Im Bereich der IKT-Basistechnologien werden vor allem die für besonders relevant erachteten Teilgebiete Alternative Computer-Architekturen und Hardware-Technologien (Abschnitt 3.5.1) wichtige Forschungs- und Entwicklungsgebiete bleiben.

Netze

All-Over-IP-Netz

Der seit Jahren dominierende Trend im Bereich der Netze ist die Konvergenz von klassischen Telefonnetzen, Daten-, Kabelfernseh- und Mobilfunknetzen zu einem integrierten, universellen *All-Over-IP-Netz*, bei dem die zugrunde liegende Übertragungstechnik für den Nutzer weitgehend irrelevant ist. Die Technologie der Netzzugangsschicht (OSI-Schichten 1 und 2) mit der höchsten Innovationsdynamik sind dabei Glasfaserkabel und drahtlose Netze (insbesondere zellulare Netze wie LTE, drahtlose lokale Netzwerke wie die IEEE 802.11-Familie oder drahtlose Personal Area Network wie die IEEE 802.15-Familie). Weitere Übertragungstechniken werden von den Anwendungen getrieben, z. B.

⁵⁵ Koomey, J. G. et al. (2011): Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing. In: IEEE Annals of the History of Computing, Bd. 33/Nr. 1, S. 46-54.

⁵⁶ Dies ist insbesondere bei der Vielzahl der in der Praxis verwendeten Altsysteme (*legacy software*) ein Problem, die nicht mit Blick auf Parallelverarbeitung entwickelt wurden und damit das Potenzial der Mehrkernprozessoren gar nicht nutzen können.

⁵⁷ Powell, J. R. (2008): The Quantum Limit to Moore's Law. In: Proceedings of the IEEE, Bd. 96/Nr. 8, S. 1247-1248.

der automatisierte Informationsaustausch zwischen Endgeräten, die sogenannte Maschine-zu-Maschine-Kommunikation⁵⁸, der jetzt in den Anfängen möglich ist, aber erst um 2030 volle Relevanz erreichen wird.

Ein grundlegendes FuE-Thema ist die Frage nach der Architektur des künftigen Internet, das sich bis 2030 zur Grundlage einer Vielzahl von neuen Anwendungen in allen Wirtschaftsbranchen und im öffentlichen Sektor weiterentwickeln wird. Für diese Aufgabe ist die bisherige Architektur, die sich nur wenig von den Forschungsnetzen der 1980er Jahre unterscheidet, nicht optimal geeignet. Sie war vor allem mit Blick auf Anforderungen des (amerikanischen) Militärs und der universitären Informatik ausgelegt und orientierte sich an den Datenverarbeitungspraktiken der 1980er Jahre. Eine private und kommerzielle Nutzung, das Wachstum der Netze zu einer globalen Infrastruktur und die Vielzahl der heutigen Anwendungen waren in diesem Entwurf nicht vorgesehen.⁵⁹

Die weitere Zunahme des Datenvolumens und die Ausdifferenzierung der Endgeräte sowie der übertragenen Datentypen hat das bisherige Internetprotokoll (IPv4) an seine konzeptionellen Grenzen gebracht.⁶⁰ Deswegen wurde um 2005 von amerikanischen Wissenschaftlern ein sauberer Schnitt (*Clean Slate*) vorgeschlagen, der einen vollständigen Neuentwurf der Internetarchitektur zum Ziel hatte, um die grundlegenden Begrenzungen der bisherigen Internetarchitektur zu überwinden, neue Technologie sauber zu integrieren sowie neue Klassen an Anwendungen und Diensten zu ermöglichen.^{61,62}

Da ein solcher Schritt die Entwertung der Investitionen in die heutige Infrastruktur zur Folge gehabt hätte, werden heute vor allem evolutionäre Ansätze verfolgt, um eine bessere Unterstützung von Mobilität, Dienstgüte und Sicherheit zu gewährleisten. Kernelement dieser Strategie ist IPv6, mit dem es möglich ist, viele der o.g. Eigenschaften (insbesondere die Übertragungsgeschwindigkeit) individuell nach Nutzer und Anwendung zu steuern. Dies ist allerdings weniger eine technische als eine öko-

Architektur des
künftigen Internet

Clean Slate

Evolutionäre
Ansätze

⁵⁸ Li, X. et al. (2009): The Future of Mobile Wireless Communication Networks. In: Chai, S. et al. (Hrsg.): Proceedings of the International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN 2009), 27-28 February 2009. Macau, China, IEEE Computer Society, S. 554-557.

⁵⁹ Abbate, J. (2010): Privatizing the Internet: Competing Visions and Chaotic Events, 1987-1995. In: IEEE Annals of the History of Computing, Bd.32/Nr. 1, S. 10-22.

⁶⁰ Zu den drängenden Problemen gehören u.a. die Größe des Adressraums, die minimalistische Dienstgüte-Zusicherung (*Best Effort*), fehlende Unterstützung von Echtzeit-Diensten, vielfältige Sicherheitsmängel (Klartextkommunikation, fehlender Schutz gegen Angriffe).

⁶¹ Clean Slate (ohne Jahr): Clean Slate Program. URL: www.cleanslate.stanford.edu/. Abgerufen am 17.04.2014. Das Clean Slate Projekt wurde 2012 beendet und in eine Reihe von Nachfolgeprojekten überführt. Die EU folgt mit dem *Future Internet* Plänen einer evolutionären Strategie.

⁶² Feldmann, A. (2007): Internet Clean-Slate Design: What and Why? In: ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Bd. 37/Nr. 2, S. 59-64.

Netzwerkneutralität nomische und politische Frage, die davon abhängt, ob auch in der längerfristigen Zukunft Netzwerkneutralität gewährleistet ist bzw. werden soll, d. h. ob alle Datenpakete im Internet *gleich* behandelt werden.⁶³

Vor allem nicht europäische Akteure Die Entwicklung der Netzwerktechnik für das Internet wird ähnlich wie die von Prozessoren und Speichern vor allem von nicht europäischen Akteuren vorangetrieben. Potenziale für europäische Entwicklungen existieren momentan vor allem im Bereich der Technologien für die Mobilfunktechnik (LTE/4G und künftige Generationen) sowie im Bereich der Maschine-zu-Maschine-Kommunikation.

Software

Standardisierung Innerhalb der Softwareentwicklung sind gegenwärtig mehrere, teilweise komplementäre Trends zu beobachten. Dazu zählen Standardisierung, Automatisierung und Wiederverwendung. Einige Autoren sprechen daher von einer zunehmenden Industrialisierung der Softwareentwicklung,⁶⁴ die sich auch in der Übernahme von Begrifflichkeiten wie *Kanban* oder *Lean Development* widerspiegelt. Standardisierung zielt dabei vor allem auf die Verwendung von standardisierten Vorgehensmodellen in Entwicklungsprozessen ab. Bei den Vorgehensmodellen haben sich neben den iterativen Verfahren (z. B. *Unified Process* oder V-Modell) in den letzten Jahren vor allem agile Vorgehensmodelle herausgebildet (z. B. *Extreme Programming*). Im Moment zeigt sich eine Tendenz, diese Modelle miteinander zu verbinden oder anzureichern. Ein Beispiel dafür ist das V-Modell XT, das zunehmend agile Vorgehensweisen aufnimmt. Allerdings beschränkt sich die Standardisierung nicht nur auf Vorgehensmodelle, sondern erstreckt sich auf Prozesse und Organisation der Softwareentwicklung, die Aspekte wie Wartung und Pflege einbeziehen. Dies umfasst zum Beispiel die Verwendung von *Maturity* oder *Capability*-Ansätzen, beispielsweise das *Capability Maturity Model (CMM)* oder *Software Process Improvement and Capability Determination (SPICE)*. Diese Ansätze werden ergänzt durch einen stärkeren Fokus auf soziale Aspekte der Softwareentwicklung und ihre Unterstützungen, etwa im sogenannten *Community Model*.

Wiederverwendung Wiederverwendung bezieht sich prinzipiell ebenfalls auf alle Ebenen (Organisation, Konzepte, Technik). Am weitesten fortgeschritten ist die technische Wiederverwendung in Form der komponentenbasierten Entwicklung. Dabei ist die Grundidee, Software in möglichst klare Einheiten zu unterteilen und damit Komponenten zu erzeugen, aus denen die Anwendung zusammgebaut wird. Ziele sind die leichtere Wartbarkeit von Systemen sowie die Wiederverwendung von Komponenten für weitere

⁶³ Krämer, J. et al. (2013): Net Neutrality: A progress report. In: Telecommunications Policy, Bd. 37/Nr. 9, S. 794–813.

⁶⁴ Achtert, W. et al. (2010): Industrielle Softwareentwicklung. Leitfaden und Orientierungshilfe. Berlin, Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.

Projekte.⁶⁵ Ein weiterführender Ansatz ist die Entwicklung ganzer Softwareanwendungen, sodass auch auf dieser Ebene ein einfaches Zusammenstellen von Softwaresystemen möglich wird, die durch Adaptivität Anpassungen an sich verändernde Umwelten erlauben (emergente Software).⁶⁶

Automatisierung zielt darauf ab, die Vorgehensweisen durch geeignete Tools und Konzepte zu unterstützen. Prinzipiell ist der Einsatz von Werkzeugen nicht wirklich neu, doch geht es heute vor allem um die möglichst sinnvolle Bündelung der Werkzeuge. Ein weiterer Trend der Automatisierung zielt im Bereich der Entwicklung auf die Verwendung von modellgetriebenen Ansätzen und domänenspezifischen Sprachen ab.⁶⁷ Damit soll höhere Flexibilität und bessere Passgenauigkeit als mit Universalsprachen erreicht werden.

Automatisierung

Diese Trends in der Softwareentwicklung haben weiterführende Auswirkungen auf das Testen von Software. So sind im Rahmen der agilen Methoden und Prozesse regelmäßige Tests fester Bestandteil der Softwareentwicklung. Zudem sehen Verfahren wie *Continuous Improvement* (kontinuierliches Qualitätsmanagement), die sich aus der Verwendung von *Maturity*- oder *Capability*-Ansätzen ergeben, für verschiedene Phasen unterschiedliche Validierungsschritte auf verschiedenen Ebenen vor. Ein Beispiel dafür ist die Aufteilung in folgende Schritte: 1. Modul-/Komponententest (*Unit Test*); 2. Integrationstest (z. B. durch *Continuous Integration*), 3. Systemtest und 4. Kundentest (*User Acceptance Test*). Gleichzeitig gibt es Bestrebungen, Tests auf allen Ebenen durch den Einsatz von Tools zu automatisieren,⁶⁸ wobei formale Verifikationsverfahren, insbesondere im *Unit Test*, eine Rolle spielen. Ein erweiterter Tool-Einsatz wird durch zwei Umstände ermöglicht: einerseits durch die Möglichkeiten der Rechnerunterstützung und andererseits durch die Beschränkung auf das *Model Checking*, bei dem nur das Systemmodell verifiziert wird. Dieses Verfahren, das schon verstärkt im *Embedded Systems*-Bereich (Luft-/Raumfahrt, Automobilbau) eingesetzt wird, gewinnt auch in anderen Kontexten an Bedeutung, da es ein grundsätzliches Problem der formalen Verifikationsverfahren begrenzt, nämlich die exponentiell

Testen von Software

⁶⁵ Szyperski, C. et al. (2002): *Component Software – Beyond Object-Oriented Programming*. 2. Aufl. Boston, Addison-Wesley Longman.

⁶⁶ Frischbier, S. et al. (2012): *Emergence as Competitive Advantage - Engineering Tomorrow's Enterprise Software Systems*. In: Maciaszek, L. A. et al. (Hrsg.): *Proceedings of the 14th International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS 2012)*. Wroclaw, SciTePress, S. 181-186.

⁶⁷ Stahl, T. et al. (2007): *Modellgetriebene Softwareentwicklung: Techniken, Engineering, Management*. 2., aktualisierte und erweiterte Aufl. Heidelberg, Dpunkt Verlag.

⁶⁸ Achtert, W. et al. (2010): *Industrielle Softwareentwicklung. Leitfaden und Orientierungshilfe*. Berlin, Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V.

steigenden Kosten bei zunehmend größeren Programmen.⁶⁹ Formale Verifikationen auf Code-Ebene (statische Prüfung, Korrektheitsbeweis) werden daher nur bei kritischen Systemen eingesetzt. Dennoch bleiben grundlegende Probleme ungelöst, z. B. der Umstand, dass nur verifiziert werden kann, was zuvor spezifiziert wurde (Spezifikationsfehler), oder das Verhalten im Zeitverlauf (Robustheit).⁷⁰

„Software-Fabrik“
illusorisch

Insgesamt ergibt sich damit das Bild einer Entwicklung hin zu einer effizienteren, verlässlicheren und damit industriell orientierten Softwareentwicklung. Dennoch sind die in diesem Zusammenhang immer wiederkehrenden Träume der „Software-Fabrik“ illusorisch. Auf der Ebene der einzelnen Teile ist davon auszugehen, dass die gegenwärtigen Entwicklungen sich in den nächsten Jahren fortsetzen und vor allem inkrementell verbessert werden. Beispiele hierfür sind Vorgehensmodelle, bei denen die V-Modelle bereits seit Jahrzehnten durch die Hinzunahme von Elementen der agilen Modelle weiterentwickelt und verfeinert wurden. Auch die komponentenorientierte Entwicklung, die seit den 1960er Jahren beforscht wird, birgt für die Zukunft weitere Potenziale. Der Einbeziehung von weiterführenden Aspekten wie Organisations- und Prozessfragen, die sich in der Verwendung von *Maturity*- bzw. *Capability*-Modellen spiegeln, zeigen, dass viele der Herausforderungen in der Softwareentwicklung über die Technik im engeren Sinne hinausgehen. Kommunikation im Team, mit den Kunden oder die Integration in existierende (betriebliche) Strukturen stellen hier entscheidende Herausforderungen dar und sind eher mittel- bis langfristig zu lösen. Dennoch werden in Teilbereichen durch sich verändernden Technologien und Anwendungsgebiete wie *Cloud* oder *Mobile Computing* immer wieder einzelne kleinere Trends auch in der näheren Zukunft angestoßen. Beispiele dafür sind Infrastruktur-Modelle wie *Cloud Computing*, deren Auslieferungsmodelle gemeinsam mit *Mobile Computing* (Apps) neue Anforderungen an die Entwicklung stellen, sowie *Big Data*, also datenbasierte Systeme, bei denen durch Kombinationen von neuen Basistechnologien, z. B. *In-Memory*-Datenbanken und *Software-Frameworks* wie *Apache Hadoop* und *MapReduce*, innovative Anwendungen mit neuen Anforderungen an die Softwareentwicklung entstehen. Dementsprechend liegt der Schwerpunkt für Weiterentwicklungen vor allem in diesen Gebieten (Abschnitt 3.5.2).

Organisations- und
Prozessfragen

⁶⁹ Sinz, C. (2010): Software verification: State of the art and challenges. In: Pankratius, V.; Kounev, S. (Hrsg.): Emerging research directions in computer science: Contributions from the young informatics faculty in Karlsruhe. Karlsruhe, KIT Press, S. 69-77.

⁷⁰ Rushby, J. (2009): Software Verification and System Assurance. In: Hung, D. V.; Krishnan, P. (Hrsg.): Proceedings of the 2009 Seventh IEEE International Conference on Software Engineering and Formal Methods. Hanoi, IEEE Computer Society, S. 3-10.

IKT-basierte Produkte und Dienstleistungen

IKT ermöglicht innovative Produkte und Dienstleistungen, z. B. in der Energieversorgung, der Verkehrssteuerung oder dem Gesundheitswesen. In Kombination mit anderen Themenfeldern und Technikentwicklungen hat die IKT viele Trends der letzten Jahre, die auch in naher Zukunft noch relevant sein werden, angestoßen und überhaupt erst ermöglicht. Allerdings ändert sich dies: IKT allein wird langfristig nur noch in wenigen Forschungsgebieten als alleiniger oder hauptsächlicher technischer Treiber wirken. Die neuen Entwicklungen in der Technik sind bereits heute mehr und mehr an den Anforderungen, die sich aus den Anwendungen und Wünschen der Kunden ergeben, orientiert oder ergeben sich erst aus Kombinationen von Technik(en), Anforderungen und Geschäftsmodellen.

Kombinationen von Technik(en), Anforderungen und Geschäftsmodellen

Wegen des Systemcharakters ist allerdings die Entwicklung vieler unterschiedlicher (Einzel-) Techniken in der IKT erforderlich, um die Anpassung und Optimierung der Systeme weiter voranzutreiben.

In der Kommunikations- und Übertragungstechnik ist neben der Forschung der Ausbau der Infrastruktur entscheidend für das Innovationssystem. Der in Zukunft immer stärkere technische Entwicklungsdruck (Wechselspiel aus neuen Anwendungen und neuen technischen Erfordernissen) wird sich zukünftig vor allem in folgenden Sektoren ergeben:

- **Energie:** Mit dem Ausstieg aus der Kernenergie und der Nutzung regenerativer Energien wächst mittel- bis langfristig der Markt für innovative IKT-Anwendungen zum Netzmanagement für die Energieversorgungsunternehmen und zum Energiemanagement für Endkunden. Gleichzeitig steigt der Bedarf, IKT-Technologien selbst energie- und ressourcensparend auszurichten. Damit kann IKT einen direkten und indirekten Beitrag zum Klimaschutz leisten.
- **Mobilität:** Die Entwicklung und Etablierung verkehrstelematischer Systeme zur Erfassung und Steuerung von verkehrsträgerübergreifendem Verkehr sowie entsprechende Anwendungen in Fahrzeugen bis hin zu autonomen Verkehrsmitteln, z. B. zur Erhöhung der Verkehrssicherheit, sind direkt von Entwicklungen der IKT abhängig.
- **Gesundheit:** Langfristig dürfte der Gesundheitsbereich zu den wichtigsten, aber auch anspruchsvollsten Einsatzfeldern gehören. Anwendungen umfassen diagnostische Verfahren (z. B. bildgebende Verfahren), Verfahren zur Behandlung (z. B. *Computer-aided Surgery* und Steuerung der Implantate als Organersatz) sowie die verstärkte Nutzung von datenbasierten Methoden.
- **Industrie:** Vor allem im Investitionsgüterbereich ist die intensive Nutzung von IKT sowohl in der Produktion als auch der Unter-

Energie

Mobilität

Gesundheit

Industrie

nehmenssteuerung einer der wichtigsten Faktoren für die Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen. Dieser Trend wird sich in den kommenden Jahren durch die zunehmende digitale Verknüpfung bisher eher getrennter Bereiche (z. B. Internet der Dinge/Dienste, Industrie 4.0) weiter fortsetzen. Auch die Landwirtschaft ist ein großes Einsatzgebiet neuer Anwendungen, sei es bei großen Maschinen, der Steuerung von Traktoren, der Tierverwaltung, der Robotik (Melkroboter) oder der Präzisionslandwirtschaft (bis 2030 auch autonomes, GPS-gesteuertes Pflügen, Düngen usw.), in der häufig Neues ausprobiert wird.

Digitale Medien,
Kultur, Bildung und
Unterhaltung

- Digitale Medien, Kultur, Bildung und Unterhaltung: Der Bildungs-, Kultur- und Medienbereich erfährt eine grundlegende Transformation durch die Konvergenz der Übertragungswege, Endgeräte und Märkte. Innovative Prozesse zur Erzeugung und Verbreitung von Inhalten sowie neue Benutzerschnittstellen werden durch IKT sowie die Digitalisierung der Wertschöpfungsketten weiter vorangetrieben.

Finanzwelt

- Die Finanzwelt ist ein großes IKT-Anwendungsfeld im Umgang mit großen Datenmengen. Der IKT für Finanzprodukte wird auch weiterhin in der Debatte um *Big Data* sowie einem immer schneller agierenden Weltwirtschaftssystem eine Rolle zukommen.

Im Bereich der IKT-basierten Produkte und Dienstleistungen gibt es drei Teilgebiete mit besonders hoher Relevanz für Forschung und Innovation bis 2030. Diese werden die Entwicklungen und Anwendungen besonders stark antreiben: Datengetriebene Systeme und Verfahren, Wissensbasierte Systeme (Abschnitt 3.5.2), IKT-gestützte Steuerung komplexer Systeme (Abschnitt 3.5.3) und IKT-Sicherheit (Abschnitt 3.5.4)

3.5.1 Alternative Computer-Architekturen und Hardware-Technologien

Physikalische bzw.
Komplexitätsgrenzen

Trotz der exponentiellen Zunahme der Leistungsfähigkeit informationsverarbeitender Systeme in den letzten Jahrzehnten sind die auf einzelnen Maschinen verfügbaren Kapazitäten einer steigenden Zahl von Anwendungen nicht gewachsen (insbesondere im Zusammenhang mit *Big Data*). Konventionelle Elektronik und Computer-Architekturen werden angesichts der stärker wachsenden Anforderungen an die zu verarbeitende Datenmenge und die Verarbeitungsgeschwindigkeit innerhalb weniger Jahre an physikalische bzw. Komplexitätsgrenzen stoßen, die neue radikale Ansätze notwendig machen. Um diese Grenzen wirksam zu überwinden, sind zwei grundsätzliche Wege erkennbar: Der Wechsel zu alternativen Computerarchitekturen jenseits der Von-Neumann-Architektur und üblicher Parallelverarbeitungsansätze oder der Wechsel zu alternativen Hardwaretechnologien, die nicht den physikalischen Begrenzungen der Mikroelektronik unterliegen.

Bei den alternativen Ansätzen der Computer-Architektur gelten Ansätze der Quanteninformatik als höchst aussichtsreich. Bei den Quanteninformatiktechniken geht es darum, die Gesetze der Quantenmechanik für die Durchführung von Berechnungen (Quantencomputer) bzw. zur Absicherung von Kommunikation (Quantenkryptografie) zu nutzen.^{71,72,73} Während Quantenkryptografie bereits heute genutzt werden kann, sind anwendungsreife Quantencomputer erst langfristig zu erwarten.

Quanteninformatik-
technik

Auf gänzlich anderen Prinzipien als bisherige Computer basieren biomolekulare Computer, die auf der Verwendung biomolekularer Stoffe beruhen, z. B. Proteinen oder DNA als Speicher- und Verarbeitungsmedium. Das Ziel der derzeitigen, sich noch in der Grundlagenphase befindenden Forschung ist es, ein Hybridsystem zu schaffen, bei dem Biomoleküle mit herkömmlicher Elektronik gekoppelt werden sollen. Biomolekulare Computer sollen vor allem dort neue Lösungen liefern können, wo es auf Speicherkapazität oder Parallelisierung ankommt oder auf die Interaktion mit einer biologischen Umgebung, etwa bei Anwendungen in der Biologie und Medizin. Das Forschungsgebiet „Biocomputer“ hat in den vergangenen Jahren erheblich an Popularität gewonnen, Experten erwarten eine weiterhin dynamische Entwicklung.^{74,75,76} Diese Ansätze gehören allerdings immer noch zur Grundlagenforschung, sodass bislang nicht abzusehen ist, ob sie tatsächlich konventionelle Architekturen in Gänze ablösen können oder ob sich diese nur für bestimmte Nischenanwendungen eignen.⁷⁷

Biomolekulare
Computer

Ein weiterer vielversprechender Ansatz sind selbstorganisierende rekonfigurierbare Architekturen. Um höhere Verarbeitungsleistungen zu erreichen, werden dabei Komponenten verwendet, deren interne Bausteine in Funktion und Verbindung nicht durch den Produktionsprozess festgelegt werden, sondern während der Laufzeit umprogrammiert werden können. Dadurch können Berechnungen durch spezialisierte Hardware

Selbstorganisierende
rekonfigurierbare
Architekturen

⁷¹ Armstrong, S. (2012): Photonic Computing: Mimicking the brain. In: Nature Photonics, Bd. 6/Nr. 9, S. 573.

⁷² Das, S. (2011): Special issue on Transitioning from Microelectronics to Nanoelectronics. In: IEEE Computer, Bd. 44/Nr. 2.

⁷³ Martinenghi, R. et al. (2012): Photonic Nonlinear Transient Computing with Multiple-Delay Wavelength Dynamics. In: Physical Review Letters, Bd. 108/Nr. 244101.

⁷⁴ Bonnet, J. et al. (2013): Amplifying genetic logic gates. In: Science, Bd. 340/Nr. 6132, S. 599-603.

⁷⁵ Miyamoto, T. et al. (2012): Rapid and orthogonal logic gating with a gibberellin-induced dimerization system. In: Nature Chemical Biology, Bd. 8, S. 465-470.

⁷⁶ Sainz de Murieta, I. et al. (2011): Biomolecular Computers. In: Current Bioinformatics, Bd. 6/Nr. 2, S. 173-184.

⁷⁷ Steffen, M. et al. (2011): Quantum computing: An IBM perspective. In: IBM Journal of Research and Development, Bd. 55/Nr. 5.

ausgeführt werden, die schneller arbeitet als eine entsprechende Softwarelösung, aber nicht für jede Anwendung ausgetauscht werden muss.⁷⁸

Exascale Computing

Zur Erzielung höchster Verarbeitungsgeschwindigkeiten (sog. *Exascale Computing*), wie sie für bestimmte Forschungsfragen benötigt werden (z. B. Simulation des menschlichen Gehirns im *Human Brain Project*), werden neue Supercomputeransätze verfolgt. Einer dieser Ansätze ist die horizontale Skalierung (*Scale-out Computing*), bei der die Steigerung der Leistung des Systems durch das Hinzufügen zusätzlicher Ressourcen erreicht wird, die die sich auch physisch an ganz unterschiedlichen Orten befinden können (*Grid Computing*). In Zukunft wird dies sogar ohne menschliche Eingriffe möglich sein: Die IT-Infrastruktur der Power-User besteht dann aus einer Vielzahl von Komponenten, die sich den Bedürfnissen entsprechend selbst konfigurieren und fehlertolerant sind.^{79,80} Die Effizienz dieser Art der Skalierung ist jedoch stark von der Implementierung der Software abhängig, da nicht jede Software gleich gut parallelisierbar ist.

Bottom-up- Nanoelektronik

Bei den neuen Hardwaretechnologien sind vor allem Aspekte der *Bottom-up*-Nanoelektronik sowie der Photonik als physikalischer Grundlagentechnologie der IKT von großer Bedeutung, da die Miniaturisierung bei der herkömmlichen Siliziumhalbleiter-Technik als Basistechnologie innerhalb der nächsten 20 Jahre an physikalische Grenzen gelangen wird.⁸¹ Die Nanotechnologie (neue Materialien, Strukturen und physikalisch alternative elektronische Bauelemente auf Grundlage von Quanteneffekten) hat langfristig das Potenzial, eine weitere Miniaturisierung und Leistungssteigerung der Hardware zu ermöglichen. Ergänzend hierzu werden bei der organischen Elektronik elektronische Schaltungen aus leitfähigen Polymeren oder anderen organischen Verbindungen statt aus Silizium hergestellt. Spezielle Druckverfahren, Rolle-zu-Rolle-Beschichtungs- und Strukturierungsmethoden sollen eine extrem preiswerte Herstellung ermöglichen. Anwendungen in der mobilen Elektronik (Einbettung in Produktverpackungen, „Wegwerfelektronik“) oder in Verbindung mit dünnen, flexiblen Displays für flexible Endgeräte und elektronisches Papier werden auf diese Weise möglich.

Organische Elektronik

Ein Technologie- bzw. Architekturwechsel könnte disruptiven Charakter haben, da eine Kompatibilität mit bestehenden Systemen und Produktionsverfahren erst geschaffen werden muss.

⁷⁸ Berekovic, M. et al. (2008): Rekonfigurierbare Architekturen. In: Informatik Spektrum, Bd. 31/Nr. 4, S. 344-347.

⁷⁹ Fuller, S. H.; Millett, L. I. (2011): Computing Performance: Game Over or Next Level? In: IEEE Computer, Bd. 44/Nr. 1, S. 31-38.

⁸⁰ Ranganathan, P. (2011): From Microprocessors to Nanostores: Rethinking Data-Centric Systems. In: IEEE Computer, Bd. 44/Nr. 1, S. 39-48.

⁸¹ ITRS (2012): International Technology Roadmap for Semiconductors. URL: www.itrs.net/Links/2012ITRS/Home2012.htm. Abgerufen am 24.04.2014.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Hardwaretechnologie und Systemarchitekturen sind die Basis aller IKT-Systeme. Die Entwicklung neuer (Software-)Anwendungen wird durch Leistungszuwächse bei der Hardware ermöglicht, gleichzeitig definieren die Charakteristika erfolgreicher Anwendungen die Anforderungen an neue Hardware und Architekturen. Nachdem viele Jahrzehnte die Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Prozessoren (entweder durch Erhöhung der Verarbeitungsgeschwindigkeit oder durch Parallelisierung) Hauptstrategie bei der Weiterentwicklung der Hardware war, sind heute bestimmte Anforderungen (etwa im Bereich *Big Data*) durch diese Strategie allein nicht zu erfüllen. Hier sind neue Computer-Architekturen notwendig, die nicht notwendigerweise dem Von-Neumann-Prinzip folgen.

Anforderungen im
Bereich *Big Data*

Die folgenden Beispiele aus verschiedenen Anwendungsbereichen unterstreichen die enorme Bedeutung von Hardwaretechnologien und alternativen Computer-Architekturen. Die Potenziale werden sowohl für Anwendungen skizziert, die heute nur in Ansätzen realisiert sind, deren Weiterentwicklung und damit Bedeutung aber bis 2030 anhalten wird, als auch für zukünftige Anwendungen, die bis 2030 erst noch entwickelt werden müssen.

Zu bereits teilweise realisierten Ansätzen zählen die Nanoelektronik (z. B. Mainstream integrierte Schaltungen) oder die Quantenkryptografie, in der Prototypen für verschlüsselte Kommunikation in besonders sicherheitsrelevanten Bereichen existieren. Die längerfristigen Potenziale bis 2030 und darüber hinaus finden sich bei

- Biomolekular-Computern mit Potenzial für die Verarbeitung großer Datenmengen, Schnittstelle zu biologischen Systemen, und
- Quantencomputern mit Potenzial für die Verarbeitung großer Datenmengen, hohe Rechenleistung für komplexe Probleme (z. B. Kryptanalyse).

3.5.2 Daten- und wissensbasierte Systeme und Verfahren

Daten- und wissensbasierte Systeme umfassen zwei miteinander verbundene Teilgebiete, deren wesentliches gemeinsames Merkmal ihre Unterstützungsfunktion für den Menschen ist. Die Formen reichen von Systemen, die durch verbesserte Verfahren zur Informationsgewinnung und -analyse Entscheidungsunterstützung anbieten, bis hin zu Systemen, die autonom ganze Tätigkeiten für den Menschen übernehmen. Ein weiteres wesentliches Merkmal ist, dass oftmals verschiedene Technologien aus beiden Teilgebieten kombiniert werden. Beispiele dafür sind der Einsatz des Computerprogramms Watson von IBM in der Diagnostik⁸², wobei

Unterstützungs-
funktion für den
Menschen

⁸² Ferucci, David A. (Hrsg.) (2012): Special Issue This is Watson. In: IBM Journal of Research and Development, Bd. 56/Nr. 3/4.

verschiedene Analysetechniken, Spracherkennung und Expertensystem zusammen genutzt werden, oder die Nutzung von großen Datenmengen zur Simulation von Standorten für Solar- oder Windkraftwerke. Der übergreifende Charakter der Technologieansätze ist in Verbindung mit dem Querschnittscharakter der Anwendungen der wesentliche Grund, beide gemeinsam zu behandeln.

Datenbasierte
Systeme und
Verfahren

Die datenbasierten (*data driven*) Systeme und Verfahren beschreiben vor allem Anwendungen, die sich mit der Akquisition, Integration und Analyse von unterschiedlichen Daten beschäftigen. Diese reichen von Verfahren zur Integration großer, heterogener Datenmengen bis zur Extraktion und Analyse einzelner Daten für hoch spezialisierte Simulationen. Besondere Herausforderungen liegen hier bei den Verfahren zur Integration verschiedener Ansätze insbesondere unter Echtzeitanforderungen sowie in den Analysefähigkeiten (Entwicklung neuer Ansätze zum Verstehen und Verknüpfen von Informationen). Grundsätzliches Ziel ist es dabei, die Entscheidungsprozesse zu unterstützen und die Qualität der Entscheidung durch die Bereitstellung relevanter Informationen zu verbessern. Aus diesem Grund spielen auch Systeme und Verfahren zur Visualisierung komplexer Ergebnisse eine wesentliche Rolle in diesem Feld (*Visual Analytics*). Hierbei entstehen verstärkt multidisziplinäre Verfahren, die sich auf Ansätze aus der Informatik, den Sozialwissenschaften oder den Kognitionswissenschaften stützen. Ziel ist es dabei, die Grenzen der menschlichen Informationsverarbeitung zu verstehen sowie Systeme zu entwickeln, die in der Lage sind, komplexe Informationszusammenhänge, beispielsweise bei der Analyse großer Datenbestände, automatisiert aufzubereiten. Alle Ansätze zu datenbasierten Verfahren erfordern dauerhafte Strategien und Lösungen zur langfristigen Speicherung von Daten. Die Schwierigkeiten liegen vor allem in der Entwicklung langfristiger Strategien, die sowohl die steigenden Datenmengen und unterschiedlichen Formate als auch die Notwendigkeit zur Selektion angemessen berücksichtigen.

Visual Analytics

Wissensbasierte
Systeme

Wissensbasierte Systeme zielen darauf ab, Wissen, das unter anderem durch datenbasierte Verfahren gewonnen wurde, durch Repräsentation und Modellierung nutzbar zu machen. Dazu zählt eine Vielzahl von verschiedenen Technologien, beispielsweise aus der Forschung zur künstlichen Intelligenz (KI). Dies umfasst Expertensysteme, die z. B. als Unterstützung in der medizinischen Diagnostik eingesetzt werden, ebenso wie Spracherkennungssysteme, die der Erkennung menschlicher Fragen oder Anweisungen dienen. Semantische Technologien werden dazu eingesetzt, relevantes Wissen aus Datenbeständen durch die Analyse von Zusammenhängen zu gewinnen. Großer Forschungsbedarf besteht noch im Bereich der Erkennung komplexer Zusammenhänge unter Echtzeitbedingungen (beispielsweise beim *Complex Event Processing*). Adaptive, kontextsensitive Systeme wiederum passen sich fortlaufend durch verschiedene Möglichkeiten der Wahrnehmung (Sensorik) an die Umwelt und

Aktionen der Nutzerinnen und Nutzer an. Ein besonders prominentes Teilgebiet liegt in der Erkennung und angemessenen Berücksichtigung von Emotionen (*Affective Computing*), die eine Verbindung zwischen Informatik, Kognitionswissenschaften und Sozialwissenschaften erfordert und sich noch zahlreichen technischen Herausforderungen (natürliche Stimmerkennung, mangelhafte Gesichts- oder Gestenerkennung) und grundlegenden Problemen wie der Integration der Methoden miteinander als auch der anderer Daten gegenübersteht. Damit verbunden sind Entwicklungen in der Mensch-Computer-Interaktion, die von neuen Formen der Steuerung von Computern, erweiterten Darstellungsmöglichkeiten, z. B. *Augmented Reality*, bis zu neuen Schnittstellen wie dem *Brain Computer Interface* reichen – alle sind in Ansätzen vorhanden, aber erst in 10 bis 20 Jahren auf dem Markt verbreitet.

Berücksichtigung von Emotionen

Ein weiteres wichtiges Teilgebiet ist das der Simulationen, das immer weiter an Bedeutung gewinnt. Beispiele sind Verhaltensprognosen auf Basis großer Datenmengen, die Simulation natürlicher Prozesse (beispielsweise in der Systembiologie) oder gar die Simulation komplexer biologischer Strukturen wie des Gehirns in der Neuroinformatik. Ein wesentlicher Zweig sind insbesondere agentenbasierte Simulationen, beispielsweise Multiagentensysteme, deren Anwendungsmöglichkeiten in den letzten Jahren enorm gestiegen sind. Hierzu gehören auch Verfahren und Systeme zur Vorhersage von politischen oder ökonomischen Krisen. Die Erfahrungen, beispielsweise mit dem *Integrated Conflict Early Warning System* (ICEWS), zeigen allerdings, dass hierzu noch erheblicher Forschungsbedarf besteht, da sowohl die theoretischen als auch die technischen Grundlagen noch gelegt werden müssen. Auch im anderen Zweig, der Multiskalensimulation, die auf Simulationen über verschiedene Granularitätsstufen hinweg abzielt, gibt es noch großen Forschungsbedarf. Ein abschließend genanntes Feld umfasst autonome Systeme, beispielsweise in der Luftfahrt oder Automobilbranche. Das Spektrum reicht dabei von einfachen Assistenzsystemen bis hin zu autonom agierenden Maschinen, die in der Produktion, Medizin oder Pflege eingesetzt werden können.

Simulationen

Gerade diese Breite der Anwendungsfelder unterstreicht nochmals den Querschnittscharakter der IKT, der für daten- und wissensbasierte Systeme kennzeichnend ist. Aufgrund sowohl der vielfältigen Einsatzgebiete, die auch sensible Bereiche umfassen, als auch der Menge der verwendeten Daten sind gleichzeitig weitere Entwicklungen zu IT-Sicherheit und Privatsphäre/Datenschutz erforderlich.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Zentrale Beispiele sind das *Big Data*-Programm des amerikanischen OSTP, die Flaggschiff-Projekte der EU sowie weitere zahlreiche nationale Initiativen, die neben einer Vielzahl kommerzieller Anbieter gerade sowohl die Diffusion der gegenwärtigen Technologiegeneration, beispielsweise *Big Data* oder *Complex Event Processing*, als auch die weite-

Simulation von Materialeigenschaften	<p>re Entwicklung von neuen Systemen und Verfahren für eine Vielzahl von Anwendungsfeldern forcieren. All dies ist ein klares Zeichen für die erwarteten Erkenntnisgewinne, zu denen unter anderem verbesserte Analysemöglichkeiten existierender Datenbestände, die Verknüpfung größerer Datenbestände, verbesserte Simulationen von komplexen Systemen und verbesserte Verfahren zur Entscheidungsunterstützung gehören. Die Dynamik des Feldes spiegelt sich in einer Vielzahl von Produktankündigungen wider. Es handelt sich allerdings in den meisten Fällen nur um erste, ansatzhafte Realisierungen. Ein Beispiel ist die Simulation von Materialeigenschaften, bei der erste Verbundprojekte Ergebnisse vorweisen können; diese Ergebnisse konstatieren allerdings noch erheblichen Verbesserungsbedarf.</p>
Pandemievorhersage	<p>Ähnlich ist die Situation im Bereich der Pandemievorhersage, bei der durch Verwendung von Suchanfragen Verbesserungen sowohl in der Zeitnähe der Vorhersage als auch in der regionalen Verteilung erreicht wurden. Dennoch stellen die Echtzeitbedingungen sowie die Differenzierung, beispielsweise zwischen verschiedenen Grippetypen, Herausforderungen dar. Diese können etwa durch die Einbindung neuer Datenquellen, verbesserte Algorithmen und Modellierung gelöst werden. Hier wird es bis 2030 sukzessive Lösungen geben.</p>
<i>Predictive Analytics</i>	<p>In anderen Bereichen wie den <i>Predictive Analytics</i> sind zwar einige Anwendungen – beispielsweise die Echtzeiterkennung von Kreditkartenmissbrauch – schon zur Reife gebracht worden, es handelt sich jedoch um sehr begrenzte Anwendungsgebiete. Eine Übertragung der Ansätze auf weitere Anwendungsgebiete, z. B. Verhaltensvorhersagen in komplexen sozialen Strukturen, scheidet immer noch an grundsätzlichen Problemen der Datenanalyse und -integration sowie der Modellierung. Ebenfalls weit entwickelt sind einige Anwendungen im Bereich <i>Complex Event Trading</i>, beispielsweise beim Militär oder beim Hochfrequenzhandel, wo neben Kursdaten heute auch unstrukturierte Informationen wie Textnachrichten mit einfließen können. Auch hier sind sowohl die Anwendungsbereiche als auch die Fähigkeit zu größerer Komplexität noch nicht ausgeschöpft. Ähnliches gilt für die Autonomik, bei der ein hoher Reifegrad von Assistenzsystemen erreicht wurde, aber noch große Anstrengungen notwendig sind, um Systeme autonom in unbekanntem, sich rasch wandelnden Umgebungen agieren lassen zu können. In den nächsten zehn Jahren werden massive Fortschritte erwartet.</p>
	<p>Daher wird es aus drei Gründen mittel- und langfristig weiterhin eine große Dynamik in diesem Bereich geben: Erstens besteht ein hoher Bedarf, die existierenden Systeme zu verbessern und zu optimieren. Zweitens ergeben sich durch die Möglichkeit, die verschiedenen existierenden Technologien miteinander zu kombinieren, neue Anwendungen, die ihrerseits weiteren Optimierungs- und Forschungsbedarf auslösen können. Drittens gibt es auch zukünftig Bedarf an weiterführender wissenschaftlicher Forschung, welche auf die Entwicklung neuer Technologien und</p>

darauf aufbauender Systeme und Verfahren abzielt, da eine Vielzahl von möglichen Anwendungsgebieten neuartige Ansätze erfordern. Ein typisches Beispiel sind autonome Systeme, die selbstständig in sich verändernden Umgebungen agieren können, z. B. in Produktionsumgebungen, Krankenhäusern oder im Straßenverkehr. Jede dieser Aufgaben wird bis zum breiten Einsatz noch einige Jahre benötigen; jede der Aufgaben und Umgebungen stellt dabei ein eigenes Set von Anforderungen, z. B.:

Autonome Systeme

- autonome Systeme: autonom agierende Fahrzeuge, die sich selbstständig im Verkehr bewegen, Roboter oder Drohnen,
- Simulation sozialer Systeme: Nutzung von Multiagentensystemen zur Simulation komplexer gesellschaftlicher Strukturen und Entwicklungen,
- *Predictive Analytics*: Analyse von Massendaten zur Vorhersage von Eigenschaften/Wirkungen von Stoffen gegen Erkrankungen.

3.5.3 IKT-gestützte Steuerung komplexer Systeme

Komplexe Systeme zeichnen sich durch eine Vielzahl unterschiedlicher Elemente aus, die sich gegenseitig in nicht linearer Weise beeinflussen. Dies bedeutet, dass sich je nach Aggregatzustand des einen Elements die Reaktionen der anderen Elemente verändern, wobei nicht nur eine Vielzahl von Wenn-Dann-Beziehungen, sondern zudem Rückkopplungseffekte zu berücksichtigen sind. Komplexe Systeme weisen eine hohe Variabilität und eine große Vielzahl an Reaktionsmöglichkeiten auf, die in ihrer Gesamtheit nicht mehr von einzelnen Personen überblickt oder gesteuert werden können. Die Lernprozesse und Anpassungsleistungen IKT-basierter komplexer Systeme werden zwar im Hinblick auf ihren jeweiligen Output von Menschen vorgegeben und gesteuert, der Abgleich von Zustandsdaten aus den Teilsystemen und die möglichen Reaktionsmuster können allerdings nur noch von entsprechend leistungsfähiger IKT vorgenommen werden.

Weil immer mehr gesellschaftliche Teilsysteme über Daten gesteuert werden (Energie, Verkehr, Gesundheit, öffentliche Sicherheit, industrielle Produktion usw.) und sich die Teilsysteme immer stärker gegenseitig beeinflussen, wird das Thema „IKT-gestützte Steuerung komplexer Systeme“ in Zukunft noch wichtiger werden als es heute schon ist.

Immer mehr gesellschaftliche Teilsysteme werden über Daten gesteuert

Neben dem „Internet der Dinge“⁸³ und den „Smart Cities“^{84,85} sind es heute vor allem die „Intelligenten Netze“, die das Feld der IKT-basierten Steuerung komplexer Systeme beschreiben. Intelligente Netze werden als

⁸³ OECD (2012): Machine-to-machine communications: Connecting billions of devices. Paris, OECD Digital Economy Papers 192.

⁸⁴ Helal, S. (2011): Special issue on Smart Cities. In: IEEE Computer, Bd. 44/Nr. 6.

⁸⁵ IDATE (2012): Smart Citites. Digital technology behind the smart city. Market Research Report. Montpellier, Institut de l'Audiovisuel et des Télécommunications en Europe.

Weiterentwicklung des Breitband-Internets gesehen, wobei die Weiterentwicklung darin besteht, dass immer mehr Prozess- und Zustandsdaten verfügbar sind, die kontextbezogen und meist automatisch erhoben, übertragen und verarbeitet werden. Aus dem reinen Übertragungsnetz wird durch die Analyse und Kombination von Daten aus unterschiedlichen Bereichen ein „intelligentes“ Netz.⁸⁶

Intelligente Netze
als große
Infrastrukturprojekte

Tatsächlich könnte man Intelligente Netze als große Infrastrukturprojekte begreifen, bei denen es neben der technischen Vernetzung um die intelligente Verknüpfung und Steuerung anhand automatisch erhobener Daten geht. Das Konzept der Intelligenten Netze geht auf den Branchenverband BITKOM zurück und hat inzwischen Eingang in die IT-Politik der Bundesregierung erhalten. Im Jahr 2014 wird ein Strategieplan der Bundesregierung für Intelligente Netze erwartet. Vorangetrieben wird das Konzept insbesondere von der Arbeitsgruppe „Digitale Infrastrukturen“ des IT-Gipfelprozesses. Im Jahrbuch 2013/2014 dieser Arbeitsgruppe werden Intelligente Netze folgendermaßen definiert: „Als Intelligente Netze werden Lösungen bezeichnet, die netzbasiert eine Regelung oder Koordination unterschiedlichster technischer Geräte ermöglichen. Dies geschieht zumeist kontextbezogen und über einen automatisierten Austausch von Daten. (...) Intelligente Netze beginnen/ende bei Sensoren/Aktoren, denen sie Daten entnehmen bzw. zuführen, werden über Kommunikationskanäle verschiedener, meist breitbandiger Accesstechnologien aggregiert und münden in zentralen Plattformen zur Speicherung bzw. Weiterverarbeitung über anwendungsbezogene Dienste“⁸⁷.

Intelligente Netze
mit einer
Vielzahl neuer,
vernetzter
Anwendungen

Intelligente Netze ermöglichen eine Vielzahl neuer, vernetzter Anwendungen innerhalb der Bereiche Energie (*Smart Grids*), Verkehr (*Smart Mobility*), Gesundheit (*E-Health*), Bildung (*E-Education*) und Verwaltung (*E-Government*)⁸⁸. Große Potenziale gibt es aber auch in den Überschneidungsbereichen, z. B. durch neuartige Kombinationen von *Smart Grids* mit *Smart Mobility*-Lösungen oder durch die Kombination von *E-Health* mit *E-Government*⁸⁹. Über die genannten Bereiche hinaus wird die intelligente Produktion weiterhin als relevantes zukünftiges Anwen-

⁸⁶ Hischke, S.; Knauth, P. (Hrsg.) (2011): Digitale Infrastrukturen. Jahrbuch 2011/2012 der Arbeitsgruppe 2 des Nationalen IT-Gipfels. Berlin, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, S. 115.

⁸⁷ Hischke, S.; Knauth, P. (Hrsg.) (2013): Digitale Infrastrukturen. Jahrbuch 2013/2014 der Arbeitsgruppe 2 des Nationalen IT-Gipfels. Berlin, S. 25.

⁸⁸ BITKOM (Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.) (2012): Der Staat als Gestalter der digitalen Welt. Industriepolitisches Grundsatzpapier. Berlin. URL: www.bitkom.org/de/publikationen/38338_71972.aspx. Abgerufen am 24.04.2014.

⁸⁹ Beckert, B.; Bühler, J. (2012): Gesamtwirtschaftliche Potenziale Intelligenter Netze in Deutschland. Langfassung der Studie für den BITKOM. Berlin, Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien. URL: www.bitkom.org/files/documents/Studie_Intelligente_Netze%282%29.pdf. Abgerufen am 24.02.2014.

dungsfeld gesehen (siehe Kapitel 3.9 Produktion). Die unter der Überschrift „Industrie 4.0“ anvisierte vielfältige Maschine-zu-Maschine-Kommunikation hat Echtzeit-Steuerung von Prozessen zum Ziel.⁹⁰

Insgesamt wird den Intelligenten Netzen das Potenzial zugeschrieben, Wirtschaft und Gesellschaft grundlegend zu verändern und der Informationsgesellschaft eine neue Qualität zu verleihen. Ihr gesamtwirtschaftliches Potenzial liegt bis zum Jahr 2022 bei über 55 Mrd. Euro.⁹¹

Intelligente Netze mit dem Potenzial, Wirtschaft und Gesellschaft grundlegend zu verändern

Wegen des bereichsübergreifenden Charakters und der unterschiedlichen Digitalisierungsgeschwindigkeiten in den verschiedenen Bereichen werden die Chancen der Intelligenten Netze heute aber noch nicht überall wahrgenommen. Ihr Aufbau ist kein „Selbstläufer“; neue Infrastrukturen und Anwendungen auf Basis heterogener Datenbestände entstehen zunächst nicht aus sich selbst heraus.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Im Hinblick auf die Intelligenten Netze und die IKT-basierte Steuerung komplexer Systeme besteht weiterhin ein großer FuE-Bedarf. Dieser bezieht sich neben der Verbesserung der Sensorik insbesondere auf die Konversion, die Kompatibilität und das übergreifende Management heterogener Datenbestände sowie auf die Echtzeitsteuerung zeitkritischer Prozesse, z. B. bei der Energieversorgung aus erneuerbaren Energiequellen.

Weil ein Großteil der erwarteten wirtschaftlichen Effekte erst durch eine intelligente Kombination von Datenbeständen aus den verschiedenen Bereichen realisiert werden kann, sind Interdisziplinarität und bereichsübergreifendes Denken erforderlich. Derzeit ist aber noch nicht hinreichend ersichtlich, welche Disziplinen und Teilbereiche konkret ihren Beitrag leisten werden bzw. sollten und welche Themenfelder vorrangig bearbeitet werden sollen.

Interdisziplinarität und bereichsübergreifendes Denken erforderlich

Welches aus FuE-Sicht die zentralen Herausforderungen beim Aufbau von Intelligenten Netzen sind, wurde bisher nicht systematisch erfasst. Allerdings wird beim Blick in die einzelnen Teilsysteme deutlich, dass sich künftige FuE insbesondere mit der Frage beschäftigen muss, an wel-

⁹⁰ Münchner Kreis; Fraunhofer ISI (2012): Intelligente Netze: Potenziale und Herausforderungen. Metastudie des Fraunhofer ISI und Orientierungspapier des Münchner Kreises. Zusammenfassung der Ergebnisse anlässlich des Nationalen IT-Gipfels in Essen 13. November 2012. Berlin, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.

URL: www.muenchner-kreis.de/pdfs/IN/BMWi_IT_Gipfel_Intelligente_Netze.pdf. Abgerufen am 24.04.2014.

⁹¹ Beckert, B.; Bühler, J. (2012): Gesamtwirtschaftliche Potenziale Intelligenter Netze in Deutschland. Langfassung der Studie für den BITKOM. Berlin: Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien. Seite 5. URL: www.bitkom.org/files/documents/Studie_Intelligente_Netze%282%29.pdf. Abgerufen am 24.04.2014

chen Stellen die zentrale Verwaltung von Datenbeständen möglich, notwendig und sinnvoll ist, um neue, bereichsübergreifende Anwendungen konzipieren und realisieren zu können. Hintergrund ist, dass es in allen Anwendungsbereichen der Intelligenten Netze ähnliche softwaretechnische Funktionen gibt. Überall geht es darum, Daten zu speichern, Nutzerinnen und Nutzer zu identifizieren bzw. zu autorisieren, und es geht um das Kundenmanagement im weitesten Sinne, um Empfehlungsfunktionen, Abrechnungssysteme usw. Hier gibt es ein großes Potenzial für standardisierte Datenhaltung und Datendienste, die die Grundlage für neue Anwendungen bilden. Softwaretechnisch handelt es sich um die sogenannte *Middleware*. Auch die Sensorik und die automatisierte Verarbeitung von Sensordaten besitzen übergreifende Bedeutung. Prinzipiell ist dabei zu bedenken, dass eine gemeinsame Speicherung, z. B. von Energieverbrauchsdaten und Verkehrsdaten, – so wünschenswert sie auch wäre – gravierende datenschutzrechtliche Probleme mit sich bringt.⁹²

Middleware

Gestaltung von
rechtlichen
Rahmenbedingungen

Zentrale FuE-Themen der Intelligenten Netze beziehen deshalb Fragen der Gestaltung von rechtlichen Rahmenbedingungen mit ein und behandeln darüber hinaus mögliche Geschäftsmodelle sowie Fragen der Akzeptanz von konvergenten intelligenten Infrastrukturen. Weiterhin ist zu fragen, welche Rolle Standards bzw. Interoperabilitätsanforderungen spielen und wie Informationssicherheit und Verlässlichkeit der Systeme sicherzustellen ist.

Beispiel *Smart Grids*

Am Beispiel von *Smart Grids* lässt sich das Prinzip der Intelligenten Netze illustrieren: Durch die Vernetzung im Energiesektor wird es möglich, die schwankende Produktion von Strom durch Solar- und Windkraft mit herkömmlichen Energiequellen zu koordinieren und darüber hinaus mit dem individuellen Verbrauch abzugleichen, der sich über digitale Messgeräte in Echtzeit verfolgen und verlässlich prognostizieren lässt. Andere Beispiele für derartige Netze sind Verkehrsleitsysteme, die Echtzeitdaten über Verkehrsflüsse verarbeiten, oder Smartphone-Apps, die auf Echtzeitdaten von Körpersensoren basieren und entsprechende Fitness- und Ernährungstipps geben.

Insgesamt ist zu konstatieren, dass es bereits heute pilothafte Beispiele für die IKT-gestützte Steuerung komplexer Systeme gibt, bei denen es für künftige Forschungsanstrengungen darauf ankommt, die Effizienz weiter zu optimieren und den *Scale-up* der Systeme auf praktisch relevante Ausmaße in den kommenden zehn Jahren zu realisieren.

⁹² Beckert, B.; Bühler, J. (2012): Gesamtwirtschaftliche Potenziale Intelligenter Netze in Deutschland. Langfassung der Studie für den BITKOM. Berlin, Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien. URL: www.bitkom.org/files/documents/Studie_Intelligente_Netze%282%29.pdf. Abgerufen am 24.04.2014.

Energie/Intelligente Stromnetz-Steuerung: Hier gibt es bereits wenige regionale Projekte, in denen eine intelligente Netzsteuerung Angebot und Nachfrage nach Strom abgleicht und einen intelligenten Mix aus erneuerbaren Energien und herkömmlicher Stromerzeugung ermöglicht.

Verkehr/*e-call*-System: Das *e-call*-System wurde 2012 europaweit eingeführt und gilt für Neufahrzeuge. Im Falle eines Unfalls wird automatisch eine Notfallmeldung an die Rettungsleitstelle abgesetzt. Voraussetzung ist eine entsprechende Fahrzeugsensorik und ein Funkmodul.

Verkehr

Gesundheit/Die elektronische Patientenakte: Pilotprojekte mit der elektronischen Patientenakte für effiziente Abläufe im Gesundheitswesen oder eine Verbesserung von Behandlungen: Behandlungsteams und Leistungserbringer tauschen Daten über Behandlung, Vorerkrankungen und Ergebnisse aus. Für einen flächendeckenden Einsatz sind noch nicht alle Voraussetzungen erfüllt.

Gesundheit

Bildung/*E-Learning*: Es existieren einzelne Plattformen für *E-Learning*, Online-Vorlesungen und das digitale Studium, das studiengangsspezifische Verwaltungsprozesse ebenso wie Seminarinhalte in einem Online-System integriert.

Bildung

Verwaltung/*E-Government*: Vielfältige *E-Government*-Anwendungen (Verwaltungsdienstleistungen der öffentlichen Verwaltung online) sind verfügbar.

Verwaltung

Anwendungsbereiche von IKT-gestützter Steuerung komplexer Systeme, in denen noch sehr lange – mindestens bis 2030 – Forschung notwendig sein wird, finden sich in folgenden Sektoren:

Energie/Konvergenz von IKT- und Stromnetz: Die Konvergenz von IKT- und Stromnetz soll in Zukunft in allen Stromnetzen eine vollständig selbstorganisierte Koordination bis auf die Ebene der Erzeuger- und Verbraucheranlagen ermöglichen. Diese sollen dann, über eigene intelligente Steuermodule vernetzt, mit dem Netzleitsystem und dem Markt verbunden sein.

Energie

Verkehr/*Smart Traffic*: Entsprechend aktueller Verkehrszustände, die mithilfe umfangreicher Sensorik in Fahrzeugen und am Straßenrand erhoben werden, können Verkehrsströme umgeleitet, verlangsamt oder beschleunigt werden. Es können Prioritäten festgelegt werden, z. B. die flexible Reservierung von Fahrspuren für Elektrofahrzeuge, die Definition von Umweltzonen und eines partiellen Fahrverbots auf Basis aktuell gemessener CO₂- oder Feinstaub-Messwerte.

Verkehr

Gesundheit/*Home*-Telemonitoring-Systeme: Telemonitoring-Systeme basieren u. a. auf sensorgestützten Informationen, die in einer zentralen Leitstelle oder einem Gesundheitszentrum überwacht werden.

Gesundheit

Bildung/Übergreifende *E-Learning*-Plattformen für Deutschland: Eine aufeinander abgestimmte und miteinander kompatible digitale Bildungs-

Bildung

landschaft ermöglicht allen Lernenden den Zugang zu den für den jeweiligen Bildungskontext optimalen Bildungsinhalten.

Verwaltung

Verwaltung/Einheitliche und integrierte öffentliche Verwaltung: *E-Government*, *Open Data* und E-Partizipation werden in einem kohärenten System vereint, greifen auf gemeinsame Datenbestände zu und bieten den Bürgerinnen und Bürgern einen entsprechenden Mehrwert.

Eine wichtige Querschnittsaufgabe bei der Realisierung Intelligenter Netze ist es, die Verlässlichkeit und Integrität der jeweiligen Systeme zu gewährleisten. Hier bestehen inhaltliche Parallelen zur IT-Sicherheit im Allgemeinen, die im folgenden Abschnitt behandelt werden.

3.5.4 IKT-Sicherheit

Biometrische
Verfahren

Die Abwicklung von Geschäftsprozessen über Netzwerke setzt hohe Sicherheitsvorkehrungen voraus. Daten dürfen nur von autorisierten Benutzerinnen und Benutzern gelesen bzw. modifiziert werden (Vertraulichkeit) und nicht unbemerkt verändert werden (Integrität). Änderungen und ihre Urheberschaft müssen rechtsverbindlich erkennbar sein. Der Einsatz aktueller Schutzmechanismen, die Verfügbarkeit, Verbindlichkeit und Authentizität gewährleisten, wird von zunehmender Bedeutung für innovative Geschäftsmodelle sein. Techniken zur Verschlüsselung, Authentifizierung und Autorisierung auf Basis biometrischer Verfahren und hochleistungsfähiger Kryptografie-Methoden werden hier den Weg weisen. Darüber hinaus gibt es eine ganze Reihe zukunftsweisender Technologien (u. a. mobile Endgeräte, *Cloud Computing*, Internet der Dinge), bei denen Sicherheit ein entscheidender Erfolgsfaktor ist und eine Entwicklung angepasster Verfahren erfordert (siehe auch Technikfeld „Sicherheit“).

Kryptografie

Security by Design

Auf der anderen Seite sind IT-Systeme heute umfänglich vernetzt und somit verletzlich bei Angriffen. Insbesondere Geheimdienste, Wirtschaftsspionage und organisiertes Verbrechen stellen das IT-Ökosystem vor erhebliche Herausforderungen, auf die mit Forschung und Entwicklung in einer Reihe von Bereichen geantwortet werden muss. Obwohl eine 100%ige Sicherheit nicht erreicht werden kann, muss durch geeignete Entwurfsverfahren (*Security by Design*) sowie durch wirksame Verfahren und Werkzeuge ein möglichst hoher Sicherheitsgrad erreicht werden. Andererseits ist dafür zu sorgen, dass (kritische) Systeme und Infrastrukturen auch bei Angriffen in gewissem Umfang sicher und funktionsbereit bleiben.^{93,94,95,96}

⁹³ Brandl, S.; Scharioth, S. (2013): IT-Sicherheitslage im Mittelstand 2013. Update zur Studie Deutschland sicher im Netz aus dem Jahr 2012. Berlin, Deutschland sicher im Netz e.V.

⁹⁴ European Commission (2011a): Workshop on „Network and Information Security: Research Ideas“. Workshop report. Brüssel. URL:

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

So wie Unternehmen und Verwaltungen ein Interesse haben, ihre Daten zu sichern, haben auch die Bürgerinnen und Bürger ein Interesse am Schutz ihrer Privatsphäre. Die Wichtigkeit dieser Fragen zeigt nicht nur der aktuelle Skandal um die Abhöraktivitäten der Geheimdienste, sondern auch die lang anhaltende Debatte um die Datensammlung und -vermarktung durch Internetanbieter. Forschungsthemen in diesem Kontext umfassen:

- die Entwicklung von Verfahren und Werkzeugen zum Identitätsmanagement in wechselnden Kontexten,
- die Entwicklung von effektiven und nutzerfreundlichen Werkzeugen zum Schutz bestimmter Aspekte von Privatheit (*Privacy Enhancing Technologies/PETs*; *Transparency Enhancing Technologies/TETs*),
- der Entwurf von Verfahren, die eine systematische Berücksichtigung von Privatheits- und Datenschutzerfordernungen schon im Entwurfsstadium erlauben (*Privacy by Design*).

Darüber hinaus ist (interdisziplinäre) Forschung notwendig, die sich mit den veränderten Privatheitsvorstellungen und ihren Konsequenzen auseinandersetzt. Dazu gehören u. a. die Fragen nach einem alternativen ökonomischen Modell der Privatheit bzw. überzeugenden Geschäftsmodellen sowie die Frage nach Möglichkeiten einer Vereinbarkeit von Sicherheit und Privatheit in vielen Technologien (Videoüberwachung, Biometrie etc.).

Schließlich sind insbesondere die Themen im Bereich „Daten- und wissensbasierte Systeme und Verfahren“ mit Herausforderungen an Datensicherheit sowie Daten- und Privatheitsschutz verbunden (*Big Data*, ubiquitäre Sensorsysteme).^{97,98,99}

Skandal um die
Abhöraktivitäten der
Geheimdienste

Veränderte Privat-
heitsvorstellungen

Daten- und Privat-
heitsschutz

<http://cordis.europa.eu/fp7/ict/security/workshop22092011.pdf>. Abgerufen am 24.04.2014.

⁹⁵ Fraunhofer-Verbünde IuK-Technologie, Verteidigungs- und Sicherheitsforschung (2014): Cyber-Sicherheit 2020: Herausforderungen für die IT-Sicherheitsforschung. Positionspapier. München, Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.

⁹⁶ Eadally, S. et al. (2013): Special issue on Securing Cyberspace in the 21st Century. In: IEEE Computer, Bd. 46/Nr. 4.

⁹⁷ Buchmann, J. (Hrsg.) (2012): Internet Privacy: Eine multidisziplinäre Bestandsaufnahme/A multidisciplinary analysis. Heidelberg, Berlin, Springer Verlag (acatech Studie).

⁹⁸ European Commission (2011b): Workshop on „Privacy Protection and ICT: Research Ideas“. Workshop report. brüssel. URL: <http://cordis.europa.eu/fp7/ict/security/workshop-report-privacy-research-ideas-public.pdf>. Abgerufen am 24.04.2014.

⁹⁹ Reed, D. A. et al. (2012): Imagining the Future: Thoughts on Computing. In: IEEE Computer, Bd. 45/Nr. 1, S. 25-30.

IT-Forensik	<p>Falls es dennoch zu Verletzungen der Informations- und Netzwerksicherheit kommt, spielt die IT-Forensik (digitale Forensik) im Zusammenspiel mit der Erkennung und Abwehr von Cyberangriffen eine wesentliche Rolle, da es hier das Ziel ist, Angriffe zu erkennen, Beweise sicherzustellen und – wenn möglich – Angreifende zu identifizieren. Neben der schon fast traditionellen Computerforensik gewinnen durch zunehmende Vernetzung von Infrastrukturen sowie den Trend mobiler Geräte und <i>Cloud</i>-basierter Anwendungen vor allem die Netzwerk-Forensik und die Forensik für mobile Geräte mittel- und langfristig weiter an Bedeutung. In der Netzwerkforensik werden die Forensik bei <i>Cloud</i>-Anwendungen, neue Verfahren zur Sicherstellung von Informationen in verteilten Umgebungen sowie die Forensik bei <i>Control Systems</i> (SCADA u.ä.), die bisher kaum ausgeprägt ist, wichtig werden. Weitere Schwerpunkte sind die möglichst frühe Erkennung von Angriffen sowie die Herausforderung, Inside-Attacken im Netzwerk zu erkennen. Im Bereich der Forensik für mobile Systeme gibt es ebenfalls großen Bedarf an Verfahren und Systemen, die über die klassische Computer-Forensik hinausreichen. Die besondere Relevanz dieser Themen beruht auf einer starken Zunahme von Cyber-Kriminalität in den letzten Jahren. Darüber hinaus werden Themen wie die frühzeitige Erkennung und Identifizierung von ökonomischer, militärischer und politischer Cyber-Spionage oder den Möglichkeiten eines Cyber-Krieges getrieben. Beispiele wie die gegenwärtige NSA-Affäre oder die Attacken auf feindliche IT-Systeme im Rahmen des Georgien-Konfliktes verdeutlichen diese ^{100,101}keit.</p>
Cyber-Kriminalität	
Eindringen von Internetanwendungen in den Alltag breiter Gesellschaftsschichten	<p>IKT-Sicherheit ist eine zentrale Anforderung an IKT-Systeme, deren Bedeutung in Zukunft weiter zunehmen wird. Zum einen besteht der Trend zur weiteren Konvergenz der IKT-Infrastrukturen (siehe 3.5.3), sodass immer mehr kritische Anwendungen auf Grundlage einer gemeinsamen Infrastruktur realisiert werden. Damit haben Angriffe auf diese Infrastruktur tendenziell ein immer größeres Schadenspotenzial. Mit dem Eindringen von Internetanwendungen in den Alltag breiter Gesellschaftsschichten sind darüber hinaus grundlegende Rechte der Bürger (auf Privatsphäre, Datenschutz, Verbraucherrechte, etc.) tendenziell in Gefahr. Solche Angriffe können von Geheimdiensten (Überwachung, Sabotage, Wirtschaftsspionage), Unternehmen (Wirtschaftsspionage), Terrororganisationen und kriminellen Personen ausgeführt werden, wie die Vorfälle der vergangenen Jahre deutlich gemacht haben.</p> <p>Die folgenden Ansätze werden noch langfristig forschungsrelevant bleiben:</p>

¹⁰⁰ Hunt, R.; Zeadally, S. (2012): Network forensics: An analysis of techniques, tools, and trends. In: IEEE Computer, Bd. 45/Nr. 12, S. 36-43.

¹⁰¹ Kessler, G. C. (2013): Special issue on Advancing the Science of Digital Forensics. In: IEEE Computer, Bd. 45/Nr. 12.

Biometrische Verfahren: (Fingerabdruck, Iris, Retina, Gang, Gesichtsforn, Stimme, etc.) zur Authentifizierung (in geringerem Maße Identifikation) von Personen in sicherheitsrelevanten Anwendungen und Bereichen (z. B. ID-Dokumente, *E-Government*, elektronischer Zahlungsverkehr, elektronischer Handel).

Biometrische
Verfahren

Homomorphe Verschlüsselung: Bei der homomorphen Verschlüsselung ist die Verarbeitung von Daten auch ohne vorherige Entschlüsselung möglich. Heutige Prototypen sind einfache mathematische Operationen auf verschlüsselten Daten, in der Zukunft aber auch praktisch relevante Operationen auf verschlüsselten Daten. Dies ist insbesondere bei der immer häufiger dezentralen Speicherung von Daten und Nutzung von *Software as a Service* (SaaS) von Bedeutung, weil es dem Nutzer Sicherheit bieten kann, dass weder der *Cloud*-Anbieter noch Dritte (beispielsweise Nachrichtendienste) im Moment der Verarbeitung auf die unverschlüsselten Daten zugreifen können.

Homomorphe
Verschlüsselung:

IT-Sicherheit-Auditierung: Technische Verfahren und Werkzeuge zur Unterstützung von Audit-Prozessen in Unternehmen (*Compliance*) und IT-Risikomanagement werden zum Standard werden. Forschungsbedarf besteht hier u. a. im Zusammenspiel mit dem *Security Information and Event Management* bei großen, dynamischen Systemen und Infrastrukturen.

IT-Sicherheit-
Auditierung

Privacy Enhancing Technologies (PETS), d. h. technische Werkzeuge und Verfahren zum Selbstdatenschutz, umfassen neben klassischen Verschlüsselungsverfahren (z. B. *Public-key Encryption*) auch Verfahren zur anonymen oder pseudonymen Nutzung des Internets (z. B. TOR). Künftig sind Verfahren des Identitätsmanagements von zunehmender Bedeutung, die berücksichtigen, dass Nutzer in unterschiedlichen Rollen (als Arbeitnehmer, als Verkehrsteilnehmer, als Konsument etc.) und in unterschiedlichen räumlich-situativen Kontexten ein verschieden ausgeprägtes Schutzbedürfnis haben. Neben der Effektivität der Verfahren spielt für die tatsächliche Nutzung die Aufgabenangemessenheit und Benutzbarkeit eine entscheidende Rolle.

*Privacy Enhancing
Technologies*

Kryptografie: Neben den bereits in Abschnitt 3.5.1 erwähnten Themen der Quantenkryptografie ist es für die IT-Sicherheit entscheidend, auch langfristig sichere Verschlüsselungsverfahren zur Hand zu haben. So wird der heute verbreitete *Advanced Encryption Standard* (AES) mit hoher Wahrscheinlichkeit bereits durch den „normalen“ technischen Fortschritt innerhalb der kommenden Jahrzehnte unsicher werden. Ein Durchbruch bei den Quantencomputern würde hingegen viele der heute verwendeten Verschlüsselungs- und Signaturverfahren unmittelbar unbrauchbar machen. Deshalb ist auch die Entwicklung von Algorithmen, die gegen Angriffsversuche durch Quantencomputer resistent sind, für die langfristig nachhaltige IT-Sicherheit wichtig.

Kryptografie

Wesentlich längere Zeiträume (bis 2030 und darüber hinaus) werden für ein Identitätsmanagement (Management von personenbezogenen Daten in unterschiedlichen Anwendungskontexten (mit Teilidentitäten) über die Lebensspanne des Nutzers hinweg, z. B. Digitales Erben) veranschlagt.



3.6 Mobilität

Die räumliche Mobilität des Menschen – realisiert durch Verkehrsmittel in der Verkehrsinfrastruktur¹⁰² – ist zur Überwindung der Distanzen zwischen Tätigkeiten wie etwa Wohnen, Arbeiten, Einkauf, Bildung und Erholung zwingend notwendig und bietet dem Menschen Freiheit sowie Lebensqualität.¹⁰³ Mobilität ist Grundlage für Wirtschaft und Produktion und damit für Wohlstand.

Verkehrsmittel in der
Verkehrs-
infrastruktur

Neben der Entwicklung einer effizienten und umweltschonenden Verkehrsinfrastruktur, also Straßen, Schienenwege, Wasserstraßen/Häfen und Flughäfen, liegt eine vordringliche Aufgabe der Wissenschaft, Politik und Wirtschaft in der Weiterentwicklung von Verkehrsmitteln, etwa Fahr- und Flugzeugen.

Hervorzuheben ist hier die Elektrifizierung des Antriebs von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen.¹⁰⁴ Für Schiffe, Verkehrsflugzeuge und schwere Nutzfahrzeuge kommen vollelektrische Antriebe aufgrund ihres hohen Energieverbrauchs in den nächsten Jahrzehnten nicht in Betracht.¹⁰⁵ Daher liegt der Fokus der Entwicklungsbemühungen in diesem Bereich auf Hybridantrieben, die im Antriebsstrang Elektromotoren und Verbrennungsmotoren kombinieren.

Elektrifizierung

¹⁰² Fußwege werden nachfolgend nicht betrachtet. Ebenfalls ausgeblendet wird der Fahrradverkehr, auch wenn er mit einfachen Maßnahmen Beiträge zur Reduzierung des Pkw-Verkehrs und seiner Umwelt Nachteile in Städten liefern kann (vgl. Baier, R. et al. (2013): Einsparpotenziale des Radverkehrs im Stadtverkehr. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. URL: <http://bast.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2013/697/pdf/V227b.pdf>. Abgerufen am 30.10.2013) und inzwischen über eine Million elektromotorisch unterstützte Fahrräder in Deutschland im Einsatz sind. Der Zweirad-Industrie-Verband e.V. (ZIV) schätzt, dass der Bestand in Deutschland im Mai 2012 bei rund 1 Million Pedelecs/E-Bikes lag, vgl. Zweirad-Industrie-Verband (2012): Wie viele Pedelecs/E-Bikes gibt es in Deutschland? URL: <http://www.ziv-zweirad.de/faq.html>. Abgerufen am 30.10.2013.

¹⁰³ Im vorliegenden Kapitel steht die Mobilität des Menschen im Vordergrund. Die Perspektive Mobilität von Waren wird im Teilgebiet 2.6.5 Logistik und Internet der Dinge angerissen.

¹⁰⁴ Die Besonderheit bei elektrifizierten PKW und LKW liegt darin, dass sie Batterien als Energiespeicher mitführen müssen. Grund hierfür ist die Tatsache, dass die Straßeninfrastruktur – im Gegensatz zur Eisenbahn – keine Stromzufuhr bereithält und eine drahtlose Energieübertragung zwar technisch möglich ist, flächendeckend jedoch große Investitionen voraussetzt.

¹⁰⁵ Grund hierfür ist die Tatsache, dass die Energiedichte von Batterien bei Weitem nicht mit der von Kraftstoffen auf Mineralölbasis mithalten kann und wird. Im Gegensatz zum bekannten „Moore'schen Gesetz“, das die Verdopplung der Leistungsfähigkeit elektronischer Schaltkreise alle zwei Jahre prognostiziert, steigt die Energiedichte von Batterien eher langsam; über große Zeiträume betrachtet sind es etwa 5% pro Jahr, vgl. Estrin, D. et al. (2002): Connecting the physical world with pervasive networks. IEEE Pervasive Computing, Bd. 1/Nr. 1, S. 59-69.

Vernetzter Verkehr

Im Straßenverkehr kann die Informationstechnologie zu einer Effizienzsteigerung des Gesamtsystems, bestehend aus Verkehrsinfrastruktur und Verkehrsmitteln, beitragen. Hier sind in Zukunft weitreichende Veränderungen durch vernetzten Verkehr zu erwarten – im Sinne informationstechnisch vernetzter Straßenfahrzeuge als auch intermodal zurückgelegter Wege.

Vor diesem Hintergrund haben die folgenden fünf Teilgebiete der Technologien für Mobilität und Logistik eine hohe Relevanz für Forschung und Innovation bis 2030:

1. Autonomes Fahren¹⁰⁶ und Verkehrsflussoptimierung
2. IT-Dienste im Fahrzeug und für das Fahrzeug
3. Neue Fahrzeugkonzepte und Antriebstechnologien
4. Multimodaler Verkehr
5. Logistik und Internet der Dinge

3.6.1 Autonomes Fahren und Verkehrsflussoptimierung

embedded-Ebene

Autonomes Fahren, also die Steuerung eines Pkw ohne aktive Beteiligung des Fahrzeugführers, wird durch technische Entwicklungen auf zwei Ebenen getrieben: Zum einen *embedded*, also die weiter fortschreitende Vernetzung und Funktionserweiterung von Sensorik, Aktorik und Steuergeräten im Fahrzeug selbst. Zum anderen *connected*, die Erweiterung des Wahrnehmungshorizontes des Fahrers durch Informationen, die verschiedene Fahrzeuge untereinander austauschen.

Die *embedded*-Ebene erlaubt bereits heute in Pkw mit der entsprechenden Ausstattung teilautonomes, also unterstütztes Fahren, das über zahlreiche Fahrerassistenzsysteme realisiert ist. Diese werden durch zahlreiche Sensoren ermöglicht, die den Fahrzeugzustand ermitteln, hinzu kommen vermehrt Sensoren, die die Fahrzeugumgebung erfassen, z. B. optische Mono- oder Stereo-Kameras, Radar und Ultraschallsensoren.

Heutzutage stehen zur Unterstützung des Fahrers im Straßenverkehr folgende Hilfsmittel zur Verfügung:

- Fahrerassistenzsysteme mit Komfortfunktion wie adaptive Geschwindigkeitsregelung, Spurhalteassistent, Staufolgeassistent, Einparkhilfen, Navigationssysteme mit Verkehrsdatenupdates.

¹⁰⁶ Der Begriff „autonomes Fahren“ ist irreführend und sollte eigentlich „automatisiertes Fahren“ heißen. Autonome Autos fahren nicht selbstbestimmt, sondern nur selbstständig gemäß des Fahrerwillens. DIN V 19233 definiert Automatisierung als „[...] Ausrüsten einer Einrichtung, so daß sie ganz oder teilweise ohne Mitwirkung des Menschen bestimmungsgemäß arbeitet.“ Da sich jedoch die Begrifflichkeit „autonomes Fahren“ allgemein durchgesetzt hat, wird sie auch in diesem Dokument verwendet.

- Fahrassistenzsysteme mit Sicherheitsfunktionen, die die Handlungen des Fahrers überstimmen können, wie Bremsassistent, Kreuzungsassistent, Nothalteassistent, Fahrdynamikregelung (bekannt geworden mit der Produktbezeichnung *Elektronisches Stabilitätsprogramm*, ESP),
- zentral gesteuerte Verkehrsleitsysteme und –lenkung durch dynamische Geschwindigkeitsanzeigen und Anzeigetafeln, Wechselverkehrszeichen und dynamische Fahrstreifenzuweisung.
- Navigationssysteme, die Verkehrsdaten für Bundesautobahnen auswerten und Fahrempfehlungen geben. Verkehrsdaten für Bundes- und Gemeindestraßen werden derzeit nur von Firmen generiert – mittels anonymisierter Auswertung der Bewegungsdaten von Navigationsgeräten mit Mobilfunkschnittstelle oder der Mobiltelefone der Fahrer.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

In Zukunft werden weitere Sensoren im Automobil massentauglich sein, wie Lidar (*Light Detection and Ranging*) als Variante des Radars mit feststehendem Laser, und Laserscanner, deren zweidimensionale Ortsauflösung durch bewegliche Spiegel erreicht wird. Im Fahrzeug müssen die einzelnen Messwerte anhand geeigneter Modelle ausgewertet („Sensor-datenfusion“) und interpretiert werden. Die stetig steigende Rechenleistung von Computern befördert die Interpretation der Daten in Echtzeit, sodass vollständig autonome Fahrzeuge zukünftig auf beliebige Umwelteinflüsse unter allen Umweltbedingungen reagieren können.

Weitere Sensoren im Automobil werden massentauglich

Die beschriebenen Technologien begünstigen vor allem Anwendungen im autonomen Fahren und der Verkehrsflussoptimierung.

Autonomes Fahren

Der Wahrnehmungshorizont eines Fahrzeugführers oder der an Bord installierten Sensorik kann durch den *connected*-Ansatz des vernetzten Verkehrs erheblich vergrößert werden. Im Idealfall bedeutet vernetzter Verkehr, dass die Bewegung (fast) jeden Fahrzeugs erfasst wird und die Rückmeldung über die Verkehrslage in Echtzeit erfolgt. Dabei ist mit Verkehrslage nicht nur der obligatorische Stau auf der eigenen Strecke gemeint, sondern zum Beispiel auch ein einzelnes, uneinsehbares Verkehrshindernis hinter einer Kurve oder das Geschehen auf der Gegenfahrbahn. Da die dafür notwendige Informationsdichte aber kaum durch ortsfeste Sensorik in der Infrastruktur gewonnen werden kann, sollen die Fahrzeuge selbst die nötigen Informationen generieren. Die Auswertung und Interpretation der Verkehrsdaten müssen dabei nicht zwangsweise zentral erfolgen: Die untereinander per Funk vernetzten Fahrzeuge tauschen die Daten aus, man spricht von *Car-to-Car*-Kommunikation.

connected-Ansatz

Car-to-Car-Kommunikation

<i>Car-to-X-Kommunikation</i>	Gerade in der Anfangsphase mit einer geringen Marktdurchdringung von vernetzten Fahrzeugen ist die Integration von zentralen Verkehrsleitstellen oder etwa von ortsfesten Funkbaken, die über Baustellen und Fahrbahnverengungen informieren, eine Option, die mit dem Namen <i>Car-to-Infrastructure-Kommunikation</i> oder <i>Car-to-X-Kommunikation</i> bezeichnet wird – das X steht für verschiedenartige Objekte, die Automobile sein können, aber eben auch Funkbaken, Lichtsignalanlagen und ähnliches. Die <i>Car-to-X-Kommunikation</i> wurde in Deutschland in einem mehrjährigen Feldversuch im Frankfurter Raum bereits getestet. ¹⁰⁷
Google Testflotte	Obwohl die beschriebenen <i>embedded-</i> und <i>connected-</i> Ansätze eine ideale Grundlage für autonome Pkw bilden, soll ein Konzept erwähnt werden, das außerhalb der Fahrzeugindustrie verfolgt wird: Die Firma Google entwickelt und betreibt eine Testflotte von sieben Toyota Prius-Hybridfahrzeugen, die allein mit Informationen aus den bordeigenen Sensoren auf Fern- und Ortsstraßen autonom fahren können. ¹⁰⁸
Rechtlicher Rahmen	Da Google auf eine Vernetzung von Fahrzeugen untereinander und mit der Verkehrsinfrastruktur verzichtet, wäre eine mittelfristige Markteinführung denkbar. Eine flächendeckende Ausrüstung der Verkehrsinfrastruktur mit <i>Car-to-X-Kommunikation</i> kann also entfallen. Hinzu kommt, dass der rechtliche Rahmen für den flächendeckenden Betrieb von autonomen Fahrzeugen in den US-Staaten Kalifornien, Nevada und Florida bereits gegeben ist ¹⁰⁹ , da die USA die Wiener Konvention aus dem Jahre 1968 nicht ratifiziert haben. In Deutschland – und sinngemäß in anderen mitteleuropäischen Staaten – folgt aus Artikel 8, Absatz 5 der Wiener Konvention ¹¹⁰ : „Jeder Fahrzeugführer muss jederzeit fähig sein, sein Fahrzeug zu beherrschen“, sodass in Deutschland für jedes autonome Fahrzeug eine Ausnahmegenehmigung nötig ist. Die rechtlichen Rahmenbedingungen müssten in Deutschland also geändert werden. Prinzipielle Schritte dorthin gibt es, denn bereits bei heutzutage etablierten Fahrerassistenzsystemen hat das Wiener Übereinkommen juristische und praktische Folgen, weil Abstands- und Spurhaltesysteme durch den Fahrer übersteuerbar sein müssen. Vollautonome Bremsengriffe zur Unfallfolgenminderung lassen sich durch Lenkeingriff jederzeit überstim-
Wiener Konvention	

¹⁰⁷ Projekt sim-TD (ohne Jahreszahl): Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland. URL: www.simtd.de. Abgerufen am 17.04.2014.

¹⁰⁸ Karge, D. (2012): Google Tours. In: Bild der Wissenschaft, Nr.8, S. 100-104.

¹⁰⁹ Benning, T. (2013): Google's self-driving car hits the streets in Austin. URL: <http://transportationblog.dallasnews.com/2013/02/googles-self-driving-car-hits-the-streets-in-austin.html/>. Abgerufen am 17.04.2014.

¹¹⁰ Bundesgesetzblatt Teil II (1977): Gesetz zu den Übereinkommen vom 08. November 1968 über den Straßenverkehr und über Straßenverkehrszeichen, zu den europäischen Zusatzübereinkommen vom 1. Mai 1971 zu diesen Übereinkommen sowie zum Protokoll vom 1. März 1973 über Straßenmarkierungen. Bonn, Bundesanzeiger Verlag GmbH. URL: www.bgbl.de/Xaver/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl277s0809.pdf. Abgerufen am 17.03.2014.

men.¹¹¹ Vor aktiven Eingriffen der Sicherheitssysteme in Längs- und Querrichtung muss eine mehrstufige Kaskade der Vorwarnung stehen, wie sie der deutsche Verkehrsgerichtstag im Jahr 2000 empfohlen hat.¹¹² Unabhängig von diesen rechtlichen Fragen müsste eine Grundsatzentscheidung getroffen werden, ob autonome Straßenfahrzeuge auch ohne jegliche Fahrzeug- und Infrastrukturvernetzung entwickelt und eingesetzt werden sollen.¹¹³

Teilautonome, autonome und vernetzte Straßenfahrzeuge könnten in Zukunft einen dichteren Verkehrsfluss erlauben und zugleich die Verkehrssicherheit erhöhen. Diese technische Entwicklung wird durch zwei gesellschaftliche Trends forciert: Die Zahl der Autofahrer älter als 65 Jahre nimmt zu, der Anteil bzw. die Fahrleistung der Autofahrer unter 35 Jahren hingegen ab.^{114,115} Die reduzierte Wahrnehmungsfähigkeit älterer Fahrer könnte durch technische Maßnahmen ausgeglichen und so deren Mobilität gesichert werden. Die jüngeren Autofahrer könnten sich zukünftig während des Fahrens ungestört dem Infotainment widmen, das derzeit noch die Fahrsicherheit beeinträchtigt.¹¹⁶

Teilautonome, autonome und vernetzte Straßenfahrzeuge

Verkehrsflussoptimierung

Mit vernetzten Fahrzeugen wäre generell eine Verkehrsflussoptimierung machbar, da die vernetzten Verkehrsteilnehmer eine automatisierte Übersicht über das Gesamtverkehrsgeschehen der Umgebung haben. Derzeit sind die Hinweise auf Alternativrouten durchaus fragwürdig, da die Umleitungsstrecken von einer Autobahn auf eine benachbarte Bundes- oder Landesstraße stark kapazitätsbegrenzt sind. Hinzu kommt, dass keine Rückkopplung über die Lage auf den Nebenstraßen erfolgt. Der letztgenannte Nachteil kann in Zukunft durch vernetzten Verkehr beseitigt werden, weil quasi jedes Fahrzeug seinen Standort mitteilt und somit auch individuelle Fahrtrouten zugewiesen werden können.¹¹⁷ Als weitergehen-

Übersicht über das Gesamtverkehrsgeschehen der Umgebung

¹¹¹ Dokumentation des 12. Deutschen Verkehrssicherheitsrats-Forums „Sicherheit und Mobilität“ (2006): Fahrerassistenzsysteme – Innovationen im Dienste der Sicherheit. München. URL: www.besterbeifahrer.de/fileadmin/redaktion/Downloads/170107_FAS_Doku_einzel.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

¹¹² Deutsche Akademie für Verkehrswissenschaft e.V. (2000): 38. Deutscher Verkehrsgerichtstag. Goslar. URL: www.gutachterweiss.de/infoseiten/downloads/empfehlungen_38vgt.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

¹¹³ Schneider, L.; Bönsch, R. (2013): IAA 2013: Automobil erproben das autonome Auto. In: VDI Nachrichten, Nr. 38, S. 7.

¹¹⁴ Seiwert, M. (2012): Ein Leben ohne Auto. In: WirtschaftsWoche, Nr. 49, S. 14.

¹¹⁵ DIW Berlin (2012): Mehr Frauen und ältere Menschen am Steuer. URL: www.diw.de/de/diw_01.c.411784.de/themen_nachrichten/auto_mobilitaet_mehr_frauen_und_aeltere_menschen_am_steuer.html. Abgerufen am 17.04.2014.

¹¹⁶ Beer, G. (2013): Riskanter Blick ins Abseits. In: ACE Lenkrad, Nr. 9, S. 22-27.

¹¹⁷ Grün, G. C. (2012): Stauforscher tricksen den „Störfaktor Mensch“ aus. URL: www.zeit.de/wissen/2012-06/stau-forschung-technik/komplettansicht. Abgerufen am 17.04.2014.

des Steuerungselement könnte eine orts- und zeitabhängige Straßenmaut wirken, die durch vernetzten Verkehr technisch möglich wird.

Aufkommen der
Elektromobilität

Derzeit besteht der Pkw-Markt zum Großteil aus Modellen, die von Umweltverbänden als „Rennreiselimousinen“ bezeichnet werden:¹¹⁸ ein Pkw für vier bis fünf Erwachsene, in dem Strecken über 500 km bequem mit Geschwindigkeiten von über 160 km/h zurückgelegt werden können und natürlich der Stadtverkehr ebenso komfortabel bewältigt wird. Mit dem Aufkommen der Elektromobilität stellt sich jedoch auch die Frage, ob die vorherrschenden Fahrzeugkonzepte nicht durch weitere ergänzt werden können, ähnlich, wie mit dem Kleinwagen „Smart“ trotz der Einschränkung auf zwei Passagiere eine Marktlücke geschlossen wurde. Mit rein batterieelektrischen Pkw sind völlig neue Fahrzeugdesigns realisierbar, da Zentralmotor und viele Nebenaggregate entfallen können.¹¹⁹ Sicherheitskonzepte für die Insassen, die heute zum Teil auf der abschirmenden Wirkung des Verbrennungsmotors beruhen, könnten überdacht und in „maßgeschneiderten Fahrzeugen“ an die konkrete Nutzung angepasst werden.¹²⁰

Völlig neue
Fahrzeugdesigns
realisierbar

Wenn in Zukunft solche anwendungsspezifischen Fahrzeuge zugleich autonome Fahrzeuge sind, müssen sie nicht in der Nähe von Start- oder Zielort geparkt werden, sondern können fahrerlos zwischen Parkplatz und Startort bzw. Zielort und einem Parkplatz verkehren. Ob es sich dabei um ein Fahrzeug in Besitz des Fahrers (den man besser „Fahrgast“ nennen müsste) oder um ein „geteiltes“ Auto im Sinne des *Carsharings* handelt, sei dahingestellt – eine derartige technische Entwicklung würde die Parkraumsituation in den Innenstädten grundlegend verändern und damit auch den innerörtlichen Parksuchverkehr – der in Innenstädten über 10% der Fahrzeit verschlingt¹²¹ – drastisch reduzieren. Während etwa die Elektromobilität nicht das Problem des Flächenverbrauchs von Automobilen löst, würden fahrerlose, „fernabgestellte“ Autos die Parkraumbewirtschaftung stark beeinflussen und in Stadtzentren neu nutzbare Flächen schaffen.

Fahrerlose,
„fernabgestellte“
Autos würden in
Stadtzentren neu
nutzbare Flächen
schaffen

¹¹⁸ Verkehrsclub Deutschland e.V. (2009): Elektroautos werden Klima auf absehbare Zeit nicht retten. URL: www.vcd.org/pressemitteilung.html?&no_cache=1&scale=0&=&tx_ttnews%5Btt_news%5D=649. Abgerufen am 17.03.2014.

¹¹⁹ Kaiser, O. S. et al. (2011): Elektromobilität. Zukünftige Technologien, Nr. 93. Düsseldorf.

¹²⁰ Burns, L. D.(2013): A vision of our transport future. In: Nature, Bd. 497, S. 181-182.

¹²¹ Reinhold, T.(1999): Die Bedeutung des Parksuchverkehrs. Eine quantitative Abschätzung am Beispiel von zwei Stadtgebieten in München. In: Internationales Verkehrswesen, Bd.51/Nr. 6, S. 250-255.

Letztendlich können die Probleme des Straßenverkehrs nicht allein im System selbst gelöst werden. Da öffentliche Verkehrsmittel, wie der Schienenverkehr und Busse, eine bessere Flächennutzung und geringeren Umweltverbrauch haben, kann ihre Bedeutung im vernetzten Verkehr der Zukunft im Sinne der multimodalen Nutzung steigen. Dass dieses Konzept aufgehen kann, zeigt der seit wenigen Jahren bestehende Trend, dass die 18- bis 29-Jährigen heute im Schnitt nur noch 17 Kilometer am Tag mit dem Pkw fahren – vor zehn Jahren waren es noch 28 Kilometer. Der Anteil derjenigen, die flexibel je nach Situation das für sie am besten geeignete Verkehrsmittel nutzen, hat sich unter den 18- bis 29-jährigen in den vergangenen zehn Jahren verdoppelt. Heute nutzt etwa jeder Zehnte in dieser Altersgruppe während einer Woche sowohl den eigenen Pkw, das Fahrrad als auch öffentliche Verkehrsmittel.¹²² Anstelle des oben erwähnten, an der Nutzung ausgerichteten „maßgeschneiderten Fahrzeugs“ tritt also bereits heute das an den Verkehrszweck angepasste Verkehrsmittel.

Multimodale Nutzung

3.6.2 IT-Dienste im Fahrzeug und für das Fahrzeug

IT-Dienste im Fahrzeugbereich umfassen Dienste, die das Fahren selbst unterstützen bzw. erleichtern (z. B. Navigation, Bedienungskomfort, Sicherheit), fahrzeugunabhängige Dienste für Fahrer und Beifahrer (z. B. Webbrowser, Multimediafunktionen, Kommunikation via Telefon/E-Mails/*Social Media*) sowie fahrzeugtechnische Dienste (z. B. Wartung). Da die Sicherheit im Pkw höchste Priorität hat, spielen die Mensch-Fahrzeug-Schnittstellen eine zentrale Rolle für die Entwicklung von IT-Diensten. Die Automobilhersteller nutzen *Touchscreens*, *Touchpads*, Sprachsteuerung und *Head-Up-Displays* um den Fahrer möglichst wenig vom Verkehr abzulenken.

Mensch-Fahrzeug-Schnittstellen

Während die direkte Verbindung des Infotainmentsystems des Pkw mit dem Internet bisher nur in wenigen Fahrzeugen zu finden ist, werden Smartphones bereits heute verbreitet als *Stand-Alone* Lösung für den Internetzugang im Pkw genutzt. Neben der Navigationsunterstützung werden über den mobilen Internetzugang insbesondere aktuelle Verkehrsinformationen abgerufen. Entsprechende Smartphone-Anwendungen (Apps) nutzen zum Teil wiederum das Bewegungsprofil ihrer Nutzer, um Echtzeit-Verkehrsmeldungen zu generieren. Automobilhersteller statten ihre Fahrzeuge immer mehr mit Sprachtelefonie, Navigationssystem, Webbrowser und E-Mailzugang aus. Funktionen, die auch durch Smartphones unterstützt werden (Telefonbuch, Navigationsziele etc.), konvergieren langsam mit der Technik im Pkw, um den Komfort für den Fahrer zu erhöhen. Die Integration der Mobilfunkgeräte in die

Infotainment

Mobilfunkgeräte und Pkw mit sehr unterschiedlichen Lebenszyklen

¹²² DIW Berlin (2012): Mehr Frauen und ältere Menschen am Steuer. URL: www.diw.de/de/diw_01.c.411784.de/themen_nachrichten/auto_mobilitaet_mehr_frauen_und_aeltere_menschen_am_steuer.html. Abgerufen am 17.04.2014.

*On-Board-Diagnose-
Schnittstelle*

Fahrzeugtechnik (z. B. Bedienung der Klimaanlage über das Smartphonedisplay) gestaltet sich schwierig, da u. a. Fragen zur Standardisierung sowie Fahrzeugsicherheit noch nicht geklärt sind und Mobilfunkgeräte und Pkw sehr unterschiedliche Lebenszyklen haben.

Die Einführung der standardisierten *On-Board-Diagnose-Schnittstelle*¹²³ hat den Weg für den systematischen Einsatz von IT-Diensten im Wartungsbereich geebnet. Werkstätten und Prüfstellen sind in der Lage zum Beispiel Fehler bzw. Fehlfunktionen des Pkw auszulesen. Die Echtzeitübertragung entsprechender Fehlfunktionen über das Internet an die Werkstatt ist bereits heute technisch möglich, stellt aber in der Praxis noch die Ausnahme dar.

Beispiele für bereits realisierte IT-Dienste im Fahrzeugbereich:

- Navigationssysteme mit Echtzeitstaumeldungen,
- aktuelle Warnungen zu Unfällen über Nutzergemeinschaften von Smartphone-Apps,
- beschränkte Einbindung von Smartphones in die Infotainmentsysteme von Pkw,
- Smartphone-App mit Anzeige aktueller Parkhausbelegungen.

IT-Dienste für
Fahrzeuge werden
wesentliche
Innovationstreiber im
Automobilbereich

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

IT-Dienste für Fahrzeuge werden wesentliche Innovationstreiber im Automobilbereich sein¹²⁴. Neben neuen Verkehrstelematikfunktionen¹²⁵ werden neue IT-Dienste die Bereiche *After Sales*, Bedienkonzepte, energiesparendes Fahren sowie nutzungs- und ortsabhängige Dienste stark beeinflussen. Die Fahrzeughersteller stehen dabei vor der Herausforderung, die immer wieder neu entstehenden IT-Dienste in ihren langlebigen Fahrzeugen zu integrieren. Sie werden versuchen die Nutzer ihrer Fahrzeuge an hauseigene Services zu binden¹²⁶. Rechtliche Rahmenbedingungen werden beeinflussen, ob Hersteller, Zulieferer, Mobilfunkanbieter oder auch freie Werkstätten von neuen Geschäftsfeldern profitieren

¹²³ OBD: Standardisiertes Fahrzeugdiagnosesystem; ursprünglich zur Überwachung abgasrelevanter Fahrzeugfunktionen.

¹²⁴ Wyman, O. (2012): Car IT – Trends, Chancen und Herausforderungen für Automobilzulieferer. URL: www.oliverwyman.de/media/ManSum_Charts_Zulieferer_Car_IT_Oliver_Wyman.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

¹²⁵ Vgl. Abschnitt 2.6.1 Autonomes Fahren und Verkehrsflussoptimierung.

¹²⁶ Wyman, O. (2012): Connected Cars zur Kundenbindung im After Sales. URL: www.oliverwyman.de/media/ManSum_Chart_AftersalesConnectedCars_Oliver_Wyman.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

können.¹²⁷ Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele mit hohem Potenzial bis 2030 werden in Tabelle 1 dargestellt.

Anwendungsbereich	Anwendungsbeispiele
<i>After-Sales</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Fehler in Fahrzeugkomponenten werden automatisiert online an die Werkstatt übertragen. Auf Basis einer ersten Ferndiagnose wird der Kunde zur Vereinbarung eines Servicetermins kontaktiert/ggf. Behebung von elektronischen Fehlern aus der Distanz
nutzungs- und ortsabhängige Dienste	<ul style="list-style-type: none"> • nutzungsabhängige Kfz-Versicherungstarife • flächendeckende Straßenmaut • automatische Berechnung von Parkgebühren • Teilen und Mieten von Fahrzeugen • automatisierte Ahndung von Verkehrsverstößen • Ortung gestohlener Pkw • optimierte Verkehrsbeeinflussung (z. B. Hinweise auf freie Parkplätze)
Bedienkonzepte	<ul style="list-style-type: none"> • Erkennung von Mimik und Gestik • Smartphone als Autoschlüssel • Taktile Multifunktionsdisplays (z. B. Smartphone, Tablet-Computer) als Bedienoberfläche (z. B. Erleichterung für ältere Autofahrer) • <i>Augmented Reality</i> als Orientierungshilfe

¹²⁷ Roland Berger (2013). Werkstattportale in Deutschland – Wer wird der „Google“ für Werkstatteleistungen? URL: http://www.rolandberger.de/media/pdf/Roland_Berger_Werkstattportale_20130318.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

energiesparendes Fahren	<ul style="list-style-type: none"> • Informationen zur Geländebeschaffenheit von vorausfahrenden Fahrzeugen oder Infrastruktursystemen, zwecks ökonomischer Antriebseinstellung • Informationen zu den nächsten Ampelschaltungen auf der Fahrstrecke • energiesparende Navigationsrouten
-------------------------	---

Tabelle 1: Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele von IT-Diensten im Fahrzeugbereich

Bedienkonzepte

Spracherkennung	<p>Für die Nutzung der wachsenden Anzahl an (IT-)Diensten im Fahrzeug werden neue Bedienkonzepte zur Anwendung kommen. Spracherkennung ist bereits im Einsatz, sie wird aber künftig durch Gestenerkennung mittels Kamera/Infrarotdetektoren Unterstützung erfahren. Zum Beispiel bei lauten Umfeldbedingungen (Fahren im geöffneten Cabrio etc.) können Gesten wie Kopfschütteln oder Kopfnicken Sprachbefehle löschen bzw. bestätigen. Handbewegungen wie Wischen oder Wedeln können beispielsweise veranlassen, dass der nächste Musiktitel abgespielt wird. Die Zuordnung der Gesten und Befehle können die Fahrer auch selber konfigurieren. Orientierungshilfe für Navigation, <i>Points of Interest</i> etc. bieten zukünftig auch <i>Augmented Reality</i> Funktionen. Auf dem Fahrzeugmonitor werden reale Umgebungsbilder mit virtuellen Zusatzinformationen (z. B. Hausnummern) eingeblendet, die dem Fahrer die Orientierung erleichtern oder z. B. auch Gefahrenstellen rot eingefärbt darstellen.</p>
Gestenerkennung	
<i>Augmented Reality</i>	
Sprachsteuerung	<p>Die Infotainmentsysteme verschiedener Automobilhersteller können bereits Sprachsteuerungsfunktionen von Smartphones öffnen. Zum Beispiel lassen sich in aktuellen Modellen eines deutschen Automobilherstellers über die Sprachsteuerung des Smartphones während der Fahrt Kurznachrichten bzw. E-Mails abrufen oder diktieren sowie Termine in den Kalender eintragen.¹²⁸ Zukünftig werden immer mehr Anwendungen aus dem Smartphone bzw. Funktionen des Pkw über ein zentrales Eingabedisplay angesteuert und genutzt werden. Die Nutzer von Smartphones, bzw. künftigen weiterentwickelten „digitalen Begleitern“, möchten auf ihre Anwendungen (Apps) überall, also auch im Auto, zugreifen können. Bereits heute haben einzelne Automobilhersteller einen Appstore zur</p>

¹²⁸ Golem.de (2012): Neue A-Klasse nutzt Apples Sprachsteuerung. URL: www.golem.de/news/siri-im-mercedes-neue-a-klasse-nutzt-apples-sprachsteuerung-1202-90132.html. Abgerufen am 17.04.2014.

Nutzung in ihren Pkw. Die Nutzung dieser Apps im Fahrzeug alleine wird aber vermutlich an den kommenden Anforderungen des Marktes vorbeigehen.

Bei einer Ausweitung von *Carsharing* bzw. dem stationsunabhängigen *Car on demand* spielt die Personalisierung des fremden Pkw durch das eigene Smartphone eine wichtige Rolle. Auch für die jüngere Generation der *Digital Natives* wird der Funktionsumfang des *Connected Car* die Kaufentscheidung massiv beeinflussen. Automobilhersteller müssen Kooperationen mit Smartphoneherstellern bzw. Betriebssystemherstellern/-anbietern eingehen, um entsprechende IT-Dienste in ihren Fahrzeugen anbieten zu können. Die Inhalte der Smartphones werden über herstellereigene Schnittstellen auf dem fahrzeugeigenen Display dargestellt. Die Nutzung erfolgt durch fahrzeugspezifische Bedienelemente auf der Mittelarmlehne oder über *Touchscreens*. Durch diesen Ansatz ist es möglich, immer neue Dienste und Apps aus dem Mobilfunkbereich im Automobil verfügbar zu machen. Zum einen haben die Produkte beider Bereiche sehr unterschiedliche Lebenszyklen, zum anderen müssen die Automobilhersteller höchstmögliche Sicherheit für den Fahrzeugbetrieb gewährleisten. Durch das vielfältige Marktangebot stehen die Hersteller vor großen Herausforderungen. Das Smartphone wird auch zu Nichtbetriebszeiten zum Beispiel über das Mobilfunknetz Kontakt zum Fahrzeug halten. Bei Elektrofahrzeugen kann man beispielsweise den aktuellen Ladezustand der Akkus bzw. die mögliche Reichweite abrufen, bei einem Fahrzeugdiebstahl eine Warnung mit Ortungsfunktion erhalten oder das Smartphone als Fernsteuerung für das Ein- und Ausparken des Fahrzeuges in eine Tiefgarage nutzen. Das Smartphone kann über die NFC (*Near Field Communication*)-Technologie auch als virtueller Fahrzeugschlüssel zum Einsatz kommen. Diese persönliche Authentifizierung ist schon heute für den *Carsharing* Bereich entwickelt und wird zukünftig für jeden Fahrzeughalter neue Anwendungen ermöglichen. So können individuelle Konfigurationen (Klimaanlage, Radiosender, Spiegel etc.) sowie Nutzungsbeschränkungen (z. B. Höchstgeschwindigkeitslimit für den Führerscheinneuling) für jeden virtuellen Fahrzeugschlüssel eingerichtet werden. Möglich werden auch individuelle Belegungen von taktilen Schalter-Displays oder eine personenspezifische Funktionsanzeige über einen zentralen *Touchscreen*. Diese Möglichkeiten zur schnellen Individualisierung von Pkw unterstützen den Trend, dass der Fahrzeugbesitz in den Hintergrund rückt und in Zukunft primär die Mobilitätsdienstleistung (*Carsharing*, *Car on demand* etc.) gefragt ist. Auch für ältere Verkehrsteilnehmer werden durch eine derartige Individualisierung, die für sie wichtigsten Bedienungsfunktionen immer vertraut verfügbar sein.

Personalisierung

Schnelle Individualisierung von Pkw

Nutzungs- und ortsabhängige Dienste

Durch bessere Möglichkeiten der (kontinuierlichen) Standorterfassung sind künftig zahlreiche neue IT-Dienste vorstellbar. *Carsharing* Angebote werden Konkurrenz von privaten nachbarschaftlichen Zusammen-

Bessere Möglichkeiten der Standorterfassung

schlüssen bekommen. In Verbindung mit anderen Telematikdiensten erhalten die Fahrer Hinweise auf freie Parkplätze in unmittelbarer Umgebung, sodass es gerade in Ortszentren zu einer Entlastung durch reduzierten Parkplatzsuchverkehr kommen kann. Auf ausgewiesenen Parkflächen werden die Parkgebühren automatisch ermittelt und eingezogen. Definierte Stadtbereiche werden nur für Fahrzeuge von Anwohnern und Handwerkern zugänglich gemacht, oder Tempolimits mittels ferngesteuerter Motoreingriffe durchgesetzt.

Fahrzeugdiebstähle werden erschwert, da zum Beispiel eine Entfernung des Pkw aus einem definierten nächtlichen Parkraum zu einer automatischen Meldung bei der Polizei führt. Mit der Meldung erhält die Polizei die technische Erlaubnis das Fahrzeug zu orten. Technisch möglich ist zukünftig auch die automatisierte Ahndung von Verkehrsverstößen, zum Beispiel Geschwindigkeitsüberschreitungen, Parken im Parkverbot, Überholverbote.

Nutzungsabhängige
Versicherungstarife

Möglich werden auch nutzungsabhängige Versicherungstarife, die durch Freischalten von Informationen zur Fahrweise besondere Angebote für sparswillige Kunden bereithalten. Die Pkw-Maut könnte zu einer nutzungsabhängigen Straßenmaut werden, die das gesamte Straßenverkehrsnetz erfasst und berücksichtigt.

Umweltsensorik von
Fahrzeugen

Völlig andere Möglichkeiten ergeben sich aus der wachsenden Umweltsensorik von Fahrzeugen. Straßenzustände (Glatteis, Schlaglöcher etc.) könnten flächendeckend in Echtzeit erfasst und zugänglich gemacht werden. Auch zusätzliche umweltrelevante Sensoren an Pkw könnten frühzeitig Grenzwertüberschreitungen feststellen und die direkte Einleitung von Gegenmaßnahmen veranlassen.

3.6.3 Neue Fahrzeug- und Antriebskonzepte

Elektrische Energie-
speicher an Bord

Die Motor- und Antriebstechnik ist für Fahr- und Flugzeuge das Kernelement. Als Energieträger kommen vorrangig Kraftstoffe aus Erdöl zum Einsatz, mit Ausnahme der Schienenfahrzeuge: Hier ist der elektrische Antrieb Standard. Bei der Deutschen Bahn AG werden 90% der Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr in Deutschland mit elektrisch betriebenen Zügen erbracht¹²⁹; im Stadtverkehr sind es bei den U- und Straßenbahnen 100%. Die elektrische Energie wird den Schienenfahrzeugen über eine Fahrleitung zugeführt. Bei allen anderen Verkehrsmitteln ist hingegen ein elektrischer Energiespeicher an Bord nötig. Auch eine technisch hoch entwickelte Batterie hat jedoch nur etwa ein Zwanzigstel der Energiedichte von Flüssigkraftstoffen (wie Benzin und Die-

¹²⁹ Deutsche Bahn AG (2012): Nachhaltigkeitsbericht 2012. URL: www.deutschebahn.com/file/4341640/data/nachhaltigkeitsbericht2012.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

selkraftstoff), auf die Masse bezogen.^{130,131} Die daraus resultierenden, geringen Reichweiten von elektrischen Automobilen sind Gegenstand der allgemeinen Diskussion. Für wirtschaftlich relevante Schiffsgrößen, Verkehrsflugzeuge und schweren Straßengüterverkehr mit einem erheblich größeren Energieumsatz, stehen elektrische Energiespeicher für rein elektrische Antriebe daher jetzt und auch bis zum Jahr 2030 nicht zur Verfügung.

Geringe Reichweiten

Für Pkw und Nutzfahrzeuge sind elektrische Antriebe unter drei Gesichtspunkten interessant:

- 1) Das Fahrzeug erzeugt lokal keinerlei Schadstoffemissionen
- 2) die Lärmemission von Elektromotoren ist geringer als die von Verbrennungsmotoren,
- 3) der Energieträger Strom erlaubt vielfältige (insbesondere regenerative) Energiequellen.

Kraftstoffe aus Erdöl oder aus nachwachsenden Rohstoffen sind in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch und damit auf Kohlendioxid- und Schadstoffemissionen (Stickoxide, Schwefeloxide, Feinstaub) auch weiter verbesserbar. Der Schlüssel dazu liegt in der kontinuierlichen Optimierung der Verbrennungsmotoren, zu denen auch die Gasturbinen in der Luftfahrt zählen. Dieser Prozess wird sich in Zukunft fortsetzen. Weniger bedeutend ist dieser Optimierungsprozess für die Großschifffahrt, da politische Anforderungen an die Verringerung des Schadstoffausstoßes von der Europäischen Union frühestens in einer Dekade gestellt werden. Als erster Schritt ist ab 2018 für Schiffseigner, die europäische Häfen anfahren, ein MRV (*Monitoring, Reporting and Verification*)-Prozess vorgesehen. Allein aus dem Bewusstsein über die Emissionen wird für das Jahr 2030 ein um 2% geringerer Klimagasausstoß im Vergleich zum Referenzjahr 2010 erwartet. Erst anschließend an den MRV-Prozess sollen konkrete Reduktionsziele festgelegt werden.¹³²

Kontinuierliche Optimierung der Verbrennungsmotoren

Großschifffahrt

Die nachfolgenden Anwendungsbeispiele aus der Fahrzeug- und Antriebstechnik bieten einen Einblick zum aktuellen Stand der Forschung und Technik, die ein hohes Lösungs- und Innovationspotenzial aufweisen beziehungsweise voraussichtlich auch noch bis 2030 aufweisen werden.

¹³⁰ Kaiser, O. S. et al. (2011): Elektromobilität. ITA-Kurzstudie, Zukünftige Technologien Nr. 93. Düsseldorf, S. 21f.

¹³¹ Dabei ist bereits berücksichtigt, dass nur etwa ein Drittel der Energie von Flüssigkraftstoffen genutzt werden kann, weil der Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren wesentlich schlechter ist als der von Elektromotoren.

¹³² Europäische Kommission (2013): Integrating maritime transport emissions in the EU's greenhouse gas reduction policies. URL: http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/shipping/docs/com_2013_479_en.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

- Verbrennungsmotoren (z. B. Otto- und Dieselmotoren),
- elektrifizierte Antriebe (Hybride oder rein batterieelektrische Antriebe),
- Leichtbau (z. B. Aluminium, faserverstärkte Kunststoffe),
- neue Fahrzeugkonzepte (z. B. auf bestimmte Anwendung bezogen).

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Neben den bereits erwähnten Antriebskonzepten ist der Leichtbau ein wichtiges Hilfsmittel, den Energieeinsatz zur Fortbewegung zu verringern. Das gilt vor allem bei Fahrzeugen, deren Nutzlast im Vergleich zum Fahrzeuggewicht gering ist, also bei Flugzeugen und Pkw, nachgeordnet auch bei Schienenfahrzeugen¹³³.

Wie bereits in Abschnitt 3.6.1 angesprochen, sind mit rein batterieelektrischen Pkw Fahrzeugdesigns realisierbar, um als „maßgeschneiderte Fahrzeuge“ an die konkrete Nutzung angepasst zu sein.¹³⁴ Auch in der Luftfahrt werden unkonventionelle Konzepte angedacht, etwa der *Blended Wing Body*, eine spezielle Form des Nurflüglers.¹³⁵ Bei ihm fungiert fast der gesamte Rumpf als Tragfläche. Das erzeugt viel Auftrieb und wenig Luftwiderstand bei hoher Passagierkapazität, bedingt aber beispielsweise ein verändertes Design der Fluggastbrücken und eine geringere intrinsische Flugstabilität, die elektronisch kompensiert werden muss.¹³⁶

Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele mit hohem Potenzial bis 2030 werden in Tabelle 2 dargestellt.

Blended Wing Body

¹³³ Schienenfahrzeuge haben wegen der geringen Rad-Schiene-Reibung pro Passagier bzw. Ladegewicht generell niedrigere Verbräuche als Straßenfahrzeuge mit Reifen-Fahrbahn-Kontakt.

¹³⁴ Burns, L. D. (2013): A vision of our transport future. In: Nature, Bd. 497, S. 181-182.

¹³⁵ Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (2011): Flugzeug der Zukunft - DLR forscht an Blended Wing Body. URL: www.dlr.de/dlr/presse/desktopdefault.aspx/tabid-10172/213_read-1445/. Abgerufen am 17.04.2014.

¹³⁶ Grotelüschen, F. (2011): Die vierte Dimension des Fliegens. In: Bild der Wissenschaft. Nr. 9. S. 92-95.

Anwendungsbereich	Anwendungsbeispiele
Elektrische Antriebe und Energiespeicher	<ul style="list-style-type: none"> • Metall-Luft-Batterien • Elektromotoren mit Fahrzeugspezifikation (anstelle von modifizierten Industriemotoren, deren Drehzahl-, Robustheit-, und Lebensdauerdesign nicht optimal ist) • Brennstoffzellen zur Vergrößerung der Reichweite
Hybridantriebe (Elektromotor/Verbrennungsmotor)	<ul style="list-style-type: none"> • Rangierlokomotiven mit Hybridantrieb
Verbrennungsmotoren	<ul style="list-style-type: none"> • Motoren mit homogener Kompressionszündung • synthetische Kraftstoffe (auch Gas) mit besseren Leistungs- und Verbrennungseigenschaften und Herstellung aus regenerativen Energiequellen • Flugzeugturbinen mit Getriebe <i>Geared Turbofan</i>
Leichtbau	<ul style="list-style-type: none"> • Materialverbundsysteme • Multimaterialsysteme
Fahrzeugkonzepte	<ul style="list-style-type: none"> • anwendungsspezifische Pkw mit angepasster Motorisierung und Sicherheitsausstattung • Flugzeug als Nurflügler (<i>Blended Wing Body</i>)

Tabelle 2: Zukünftige Anwendungsbeispiele im Bereich neue Fahrzeug- und Antriebskonzepte

Elektrische Antriebe und Energiespeicher

Für rein elektrisch angetriebene Pkw und Nutzfahrzeuge spielen der Energiespeicher und die daraus erzielbare Fahrzeugreichweite die entscheidende Rolle. Energiespeicher wie Schwungräder oder Druckluft scheiden aus physikalischen Gründen wegen ihrer zu geringen Energiedichte zur mobilen Energiespeicherung aus. Das Mittel der Wahl sind elektrochemische Energiespeicher. Stand der Technik sind Lithium-Ionen-Batterien, womit ein chemisches System benannt ist, das sehr vari-

Lithium-Ionen-Batterien

antenreich ist und Entwicklungspotenzial für etwa weitere zehn Jahre zeigt.¹³⁷

Metall-Luft-Batterie

Das Lithium-Ionen-Batteriesystem ist derzeit der einzige kommerzialisierte Energiespeicher, der für Automobilanwendungen wirklich attraktiv ist – mit dem Nachteil, dass die Wertschöpfung größtenteils in Asien und den USA stattfindet.¹³⁸ Das kann mit neuartigen Batteriesystemen geändert werden, exemplarisch sei die Metall-Luft-Batterie genannt, die sich im Frühstadium der Erforschung befindet. Diese profitiert davon, dass für eine der Elektroden der Reaktant Sauerstoff nicht in der Batterie mitgeführt werden muss, sondern der Umgebungsluft entnommen werden kann. Dementsprechend sinkt das Batteriegewicht, die Energiedichte erhöht sich. Eine zu Flüssigtreibstoffen wettbewerbsfähige Energiedichte scheint möglich. Marktreife Produkte könnten nach dem Jahr 2020 verfügbar sein, für die sicherheitskritischen Automotive-Anwendungen einige Jahre später.¹³⁹

Die weiteren Kernkomponenten von elektrifizierten Fahrzeugen – wie Elektromotoren und das elektronische Energiemanagement – sind bereits auf hohem technischem Niveau verfügbar. Sie können unter ingenieurtechnischen Gesichtspunkten jedoch noch weiter verbessert werden.

Leichtbau

Energiekosten der
Fahrzeuge verringern
und Emissionen
reduzieren

Leichtbau von Fahrzeugen bezieht sich auf Konstruktion und Design der Fahrzeuge und den Einsatz dazu passender Materialien¹⁴⁰. Die Verwendung von Leichtbaumaterialien und -konstruktionen zielt letztendlich immer darauf, über die Reduzierung der Masse die Energiekosten der Fahrzeuge zu verringern und Emissionen zu reduzieren. Dazu soll der Leichtbau Anforderungen der Funktionalität, Crashesicherheit, einer modularen, kostengünstigen Fertigung, der Reparaturfähigkeit und der Entsorgung erfüllen.

Leichtbau
Schlüsseltechnologie
bei Automobilen,
Flugzeugen und
Zügen

Leichtbau wird bei Automobilen, Flugzeugen und Zügen weiterhin eine Schlüsseltechnologie bleiben, mit neuen Materialverbänden und Kunststoffen, Konstruktionskonzepten und serientauglichen Fertigungstechnologien. So wird die weitere Verbreitung von Leichtbautechnologien durch kosteneffiziente Produktionstechniken ermöglichen, dass Elektro-

¹³⁷ Kaiser, O. S. et al. (2011): Elektromobilität. ITA-Kurzstudie, Zukünftige Technologien Nr. 93. Düsseldorf.

¹³⁸ Stroh, I. (2013): Forschungsproduktion von Lithium-Ionen-Batterien. URL: www.elektroniknet.de/automotive/elektromobilitaet/artikel/100658/. Abgerufen am 17.04.2014.

¹³⁹ Bourzac, K. (2009): Neue Chance für die Luft-Batterie. URL: <http://heise.de/276585>. Abgerufen am 17.04.2014.

¹⁴⁰ e-mobil BW GmbH, Fraunhofer IPA, Universität Stuttgart und DLR (2012): Leichtbau in Mobilität und Fertigung. URL: www.ipa.fraunhofer.de/fileadmin/www.ipa.fhg.de/Publikationen/Leichtbaustudie.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

fahrzeuge im Straßenverkehr die Kundenerwartungen bezüglich Reichweite erreichen können.

Faserverbundwerkstoffe werden bis 2030 von ähnlich großer Bedeutung für den Leichtbau sein wie Metalle. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe haben hier ein sehr großes Potenzial. Dafür sind jedoch noch Forschungsarbeiten für Technologien zur Verbindung verschiedener Werkstoffe, der Simulation solcher Multi-Material-Designs und zur Serienfertigung notwendig – auch wenn BMW mit dem Modell i3 gerade das erste durchgängig auf solche Materialien ausgelegte Modell präsentiert. Darüber hinaus fehlen noch Recyclingtechnologien.

Faserverbund-
werkstoffe

3.6.4 Multimodaler Verkehr

Innovationen im Verkehrswesen beziehen sich meist auf die Optimierung einzelner Verkehrsmittelarten und die Verbesserung ihrer Verkehrsinfrastruktur. Viele verkehrspolitische Entscheidungen beruhen auf der Annahme des ausschließlichen Gebrauchs eines privat besessenen Pkw. Seit Jahren zeichnet sich jedoch ab, dass gerade jüngere Menschen die Verkehrsmittelwahl flexibilisieren: Entweder wird für eine Wegstrecke das spezifisch geeignete Verkehrsmittel ausgewählt (situativ-optimale Mobilität), oder die verwendeten Verkehrsmittel variieren entlang einer Reisekette, was als multimodaler Verkehr bezeichnet wird.^{141,142}

Beim multimodalen Verkehr oder der situativ-optimalen Mobilität kann es sich neben dem privaten Pkw auch um Fahrzeugflotten der Anbieter von Mobilitätslösungen handeln: klassisches *Carsharing* mit fahrzeugeigenen Parkplätzen, *Car on demand* mit beliebigen Parkplätzen im öffentlichen Raum, Mietwagen, Taxen, Mietfahrräder.¹⁴³ Die Mobilität der Zukunft ist durch integrierte Tür-zu-Tür-Mobilitätsangebote charakterisiert.¹⁴⁴ Als Anbieter integrierter Leistungen kommen Fahrzeughersteller, Telekommunikationsnetzbetreiber, öffentliche Verkehrsunternehmen, Autovermietungen, *Carsharing-/Car on Demand* Anbieter, Kommunen und Bundesländer, aber auch Bezahldienste oder Reiseagenturen infrage. Die private Mitfahrgelegenheit, also die Mitnahme von zusätzlichen Passagieren in einem privaten Pkw, reduziert effektiv Verbrauch, Lärm und Platzbedarf und ist durch Smartphone-Vernetzung auch kurzfristig mög-

Integrierte
Tür-zu-Tür-
Mobilitätsangebote

¹⁴¹ DIW Berlin (2012): Mehr Frauen und ältere Menschen am Steuer. URL: www.diw.de/de/diw_01.c.411784.de/themen_nachrichten/auto_mobilitaet_mehr_frauen_und_aeltere_menschen_am_steuer.html. Abgerufen am 17.04.2014.

¹⁴² Rötzer, F. (2013): Lieber Facebook als in die Pedale treten. URL: <http://www.heise.de/tp/artikel/39/39565/1.html>. Abgerufen am 17.04.2014.

¹⁴³ Briggs, M. (2013): Future of Mobility – New Market Entrants in Mobility Integration. URL: <http://de.slideshare.net/FrostandSullivan/future-of-mobility-16093656>. Abgerufen am 17.04.2013.

¹⁴⁴ Schmidt, N. (14.03.2013): Vernetzte Mobilität der Zukunft. URL: www.siemens.com/press/pool/de/events/2013/infrastructure-cities/2013-03-UIIT-PK/praesentation-schmidt-d.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

lich.¹⁴⁵ Dem entgegen steht ein Fahrerverhalten, das – zumindest bei gemäßigten Kraftstoffkosten – die Privatsphäre gegenüber der Wirtschaftlichkeit von Mitnahmen bevorzugt.¹⁴⁶

Die nachfolgenden Anwendungsbeispiele bieten einen Einblick zum aktuellen Stand der Forschung und Technik in Richtung integrierter Mobilitätsdienste und Interoperabilität auf der Anbieterseite, die ein hohes Lösungs- und Innovationspotenzial aufweisen bzw. voraussichtlich auch noch bis 2030 aufweisen werden:

- Auskunftssysteme über Websites und Smartphone-Apps,
- elektronisches Ticket,
- *Enterprise-Resource-Planning* (ERP) und andere IT-Werkzeuge des Flottenmanagements,
- Erfassung und Auswertung von Straßenverkehrsdaten durch Behörden und Unternehmen.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Connected Mobility

Ein wichtiger Treiber für die verstärkte multimodale Nutzung werden Smartphones als hilfreiche mobile Reisebegleiter sein, die auf Algorithmen und Datenbanken zugreifen, die eben alle intermodalen Verkehrswege aufzeigen, bewertet nach Parametern wie Kosten, Zeit, Umweltbelastung und Bequemlichkeitsfaktoren (etwa Anzahl der Umstiege, Risiko von Verspätungen, Fußweglängen zu *Carsharing*-Fahrzeugen). Der Grundstein für diese Form der *Connected Mobility*¹⁴⁷ ist bereits heute gelegt. Smartphone-Apps wie der *DB Navigator*¹⁴⁸ berücksichtigen nicht nur Züge, sondern auch örtliche Nahverkehrsmittel, zeigen Fußwege zu Haltestellen oder *Carsharing*-Stationen auf, erstellen Echtzeit-Fahrpläne unter Berücksichtigung von Verspätungen und ermöglichen für manche Fälle das *Ticketing* innerhalb der App. Das EU-Forschungsprojekt *Smart-Way*¹⁴⁹ realisiert in einer Reisebegleiter-App die exakte Lokalisierung von Fahrgästen in öffentlichen Verkehrsmitteln durch Auswertung der Bewegungs-Sensoren im Smartphone und in Zukunft durch Einbindung des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo. Die Einbindung

EU-Forschungsprojekt
Smart-Way

¹⁴⁵ Handelsblatt (2013): Flihc – CO₂ sparen per Mitfahrgelegenheit. URL: www.handelsblatt.com/adv/handelsblatt-ge-at-work/energy-awards-co2-sparen-per-mitfahrgelegenheit/v_adv/9091226.html. Abgerufen am 17.04.2014.

¹⁴⁶ (Ohne Autor)(2013): Beifahrer? Nein, danke! In: ACE Lenkrad, Nr. 11, S. 4.

¹⁴⁷ Roland Berger Strategy Consultants GmbH (2013): Connected Mobility 2025 - Neue Wertschöpfung im Personenverkehr der Zukunft. URL: www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_TaS_Connected_Mobility_D_20130123.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

¹⁴⁸ Deutsche Bahn AG (ohne Jahreszahl): Die App DB Navigator. URL: www.bahn.de/p/view/buchung/mobil/db-navigator.shtml. Abgerufen am 17.04.2014.

¹⁴⁹ Smart-Way (2012). Project. URL: www.smart-way.mobi/index.php/project. Abgerufen am 17.04.2014.

von privaten oder geteilten Pkw und Fahrrädern in eine Routenplanung wird die strikte Verkehrsträgerbindung aufheben. Auch hierbei findet die Innovation in der Informationstechnik und damit außerhalb der Verkehrsinfrastruktur und des Verkehrsmittels statt.

Für die Schaffung der Mobilität der Zukunft gilt sicher, dass kein Teilnehmer das gesamte Spektrum aller Mobilitätsdienstleistungen allein abdecken kann. Partnerschaften sind daher grundsätzlich notwendig, um als Marktteilnehmer mit Mobilitätsangeboten erfolgreich zu sein. Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele mit hohem Potenzial bis 2030 werden in Tabelle 3 dargestellt.

Partnerschaften
grundsätzlich
notwendig

Anwendungsbereich	Anwendungsbeispiele
Vernetzte Fahrzeuge und Flotten	<ul style="list-style-type: none"> • Integrierte Mobilitätsangebote • flächendeckende <i>Car on demand</i> oder Mitfahrkonzepte • Mobilitätsangebote für ältere Personen • durchgehendes Ticketing
Echtzeit-Datenaustausch	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Connected Car</i> • Disposition von Verkehrsmitteln auf der Angebotsseite • nahtloser Übergang zwischen den Verkehrsträgern und Abstimmung der Verkehrsträger aufeinander (aus der Nachfragesperspektive)
IKT-Services für multimodale Mobilitätsangebote	<ul style="list-style-type: none"> • <i>One-Stop-Shop</i> • integrierte Bezahlkonzepte
Integration der digitalen Lebensumwelt	<ul style="list-style-type: none"> • Kommunizieren und Arbeiten während der Fahrt

Tabelle 3: Zukünftige Anwendungsbeispiele im Bereich Multimodaler Verkehr

Echtzeit-Datenaustausch

Verkehrsteilnehmer müssen sowohl über den aktuellen Zustand als auch Prognosen des Verkehrsgeschehens aller Verkehrsmittel informiert sein. Auch muss eine Interpretation der Einzeldaten durch intelligente Systeme möglich sein, die Empfehlungen für die situativ-optimale Mobilität geben oder kurzfristige Alternativen bereitstellen. Einige Informationen, die für ein intelligentes Verkehrsmanagement erforderlich sind, werden bereits heute erhoben und genutzt. Nur sind diese Verkehrsdaten bislang unzureichend oder gar nicht miteinander verknüpft. Neben den informationstechnischen Fragestellungen wird zu klären sein, wer für die Erhebung dieser Echtzeitdaten verantwortlich ist, welche Nutzungsrechte mit

Empfehlungen für die
situativ-optimale
Mobilität

den Daten verbunden sind und welche Geschäftsmodelle daraus generiert werden.¹⁵⁰

3.6.5 Logistik und Internet der Dinge

Logistiksektor

Das Management und die Abwicklung von Warenströmen und die sie begleitenden Informations-, Energie-, Geld- und Personenflüsse entlang der Wertschöpfungs- und Lieferketten wird als „Logistik“ bezeichnet. Der Logistiksektor gehört zu den wichtigsten ökonomischen Bereichen in Deutschland und ist von großer Bedeutung für den Wirtschaftsstandort. Das jährliche Umsatzvolumen liegt im dreistelligen Milliardenbereich, mehrere Millionen Arbeitsplätze hängen direkt oder indirekt von der Logistikwirtschaft ab.¹⁵¹

Logistische Prozesse

Logistische Prozesse begleiten die industrielle Güterproduktion und die innerbetriebliche Lagerhaltung. Sie verbinden Hersteller, Zulieferer, Distributoren, Transporteure und Kunden. Die Vielfalt der Waren, ihrer Produktions-, Verarbeitungs-, Verteil- und Entsorgungsprozesse sowie der involvierten Teilnehmer machen logistische Prozesse sehr komplex. Diese Komplexität wird verstärkt durch eine zunehmend verteilte Produktion von Produktteilen an verschiedenen, teilweise global verteilten Standorten sowie durch die zunehmende Individualisierung von Waren, die zu einer Diversifikation des Produktspektrums, also zu abnehmenden Chargengrößen bei gleichbleibender Produktions- bzw. Liefermenge führt. Zudem wird eine steigende Zahl von Gütern, auch von Konsumgütern, *on demand*, also erst als Reaktion auf Kundenaufträge gefertigt und *just-in-time* zur Verfügung gestellt. Insgesamt ergibt sich eine „Atomisierung der Auftragsstrukturen“, die eine wachsende Flexibilisierung der Logistiksysteme erfordert.

„Atomisierung der Auftragsstrukturen“

Vor diesem Hintergrund gewinnt das „Internet der Dinge“ für den Logistiksektor an Bedeutung. Fortschritte in zahlreichen Technologiefeldern, vor allem im Bereich IuK-Technologien, haben zu einer wachsenden Integration elektronischer, sensorischer und aktorischer Komponenten in technischen Systemen und Gegenständen geführt. Diese können zunehmend mit elektronischen Identitäten, Datenspeichern, Rechenkapazität

¹⁵⁰ Beispielsweise werden die Fahrplandaten der Eisenbahnverkehrsunternehmen in Deutschland von der DB AG in einem Datenformat (HAFAS-Rohdatenformat) auf eigenen Servern gespeichert, das nicht kompatibel zur standardisierten General Transit Feed Specification ist. Als Dienstleistung werden auch Fahrplandaten der lokalen Nahverkehrsunternehmen integriert. Die Nutzung dieser Fahrplan- als auch der Echtzeitdaten unterliegt dem Urheberrecht. Um deutschlandweite Fahrplanauskünfte zu geben, werden etwa in der durchgängigen elektronischen Fahrplaninformation (DELFI) die vier technisch verschiedenen Auskunftssysteme einzeln abgefragt und die Daten der kompletten Route daraus zusammengesetzt. Seit 2012 versucht eine private Projektgruppe namens openPlanB, Fahrplandaten trotz juristischer Konfrontation als *Open Data* zu verbreiten.

¹⁵¹ Tag der Logistik - Initiative der Bundesvereinigung Logistik (BVL) (ohne Jahreszahl); Bedeutung für Deutschland. URL: www.tag-der-logistik.de/logistik-ist-mehr/bedeutung-fuer-deutschland. Abgerufen am 17.04.2014.

und Möglichkeiten der Umgebungswahrnehmung ausgestattet werden, sodass sie in der Lage sind, innerhalb bestimmter Grenzen Entscheidungen autonom zu treffen und Handlungen auszulösen. Mittlerweile werden vermehrt auch (Alltags-)Gegenstände mit solcher „technischer Intelligenz“ ausgestattet. Parallel hierzu ergibt sich eine zunehmende Vernetzung solcher Systeme und Gegenstände sowohl untereinander als auch in lokalen Netzen, Mobilfunknetzen und dem Internet. Ursprünglich dienten diese Netze vornehmlich dem Informationsaustausch zwischen natürlichen Personen. In Zukunft wird sich ihr Nutzungsspektrum auf die Kommunikation zwischen Personen und Dingen sowie zwischen Dingen untereinander erweitern. Diese erweiterten Kommunikationsnetze werden auch als „Internet der Dinge“ bezeichnet. Bei ihm handelt es sich um eine jeweils spezifische Zusammenführung verschiedener Technologien zu einem an der Anwendung orientierten Gesamtsystem.

Technologien des „Internets der Dinge“ setzen sich in der Logistikwirtschaft in einem evolutiven Prozess durch. Erste Ansätze, wie die Ausstattung von Transportbehältern und einzelner Waren mit Funketiketten, wurden bereits eingeführt. Mit ihnen ist es zunehmend möglich, nicht mehr nur Gruppen typgleicher Produkte sondern individuelle Produkte zu identifizieren und diese direkt mit betrieblichen *Enterprise-Resource-Planning* (ERP)-Systemen zu erfassen. Ein Großteil dieser genannten Technologien befindet sich jedoch hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit im Logistikbereich noch in unterschiedlich weit entwickelten FuE-Stadien, sodass die Anwendungsszenarien z. T. noch weit in die Zukunft reichen.

Internet der Dinge

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Aufgabe der Logistik wird es in Zukunft sein, in noch stärkerem Masse zur Reduzierung von Kosten und zur Verbesserung der Nachhaltigkeit beizutragen, sowie die Trends zu Verstädterung und Individualisierung aufzugreifen.¹⁵² Für die Logistik können Technologien des *Internets der Dinge*, wie Radiofrequenzidentifikation (RFID), *Smart Labels*, digitale Produktgedächtnisse, drahtlose Kommunikation, organische Elektronik, drahtlose Sensoriken, *Tracking* und Ortungssysteme, Zahlungssysteme, dreidimensionale Drucktechniken etc. neue Lösungsansätze aufzeigen, mit denen die o. g. immer komplexer werdenden logistischen Prozesse organisiert werden können.

Trends zu Verstädterung und Individualisierung

Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele mit hohem Potenzial bis 2030 werden in Tabelle 4 dargestellt.¹⁵³

¹⁵² Deutsche Post AG (2012): Delivering Tomorrow – Logistics 2050. URL: www.delivering-tomorrow.com/wp-content/uploads/2012/02/Szenario_Study_Logistics_2050.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

¹⁵³ System Alliance (2012): Zukunftsreport 2.0. URL: www.systemalliance.de/content/zr_20/ZR2_0.html. Abgerufen am 17.04.2014.

Anwendungsbereich	Anwendungsbeispiele
Cyber-Physische Systeme in der Logistik	Industrie 4.0/Logistik 4.0, autonome Transportsysteme
Entmaterialisierung	digitale Verbreitung von Dokumenten, Büchern und anderen, Medien, Hybridbriefdienste, 3-D-Printing
Nachhaltige Logistik	Maßnahmen zur CO ₂ -Reduzierung bei Logistikunternehmen, Einsatz von Elektrofahrzeugen in der Logistik
Sicherheit	Sicherung von Warenketten, Sicherheit des Transports, Risikomanagement für die Logistikprozesse
Städte Logistik	Städtische Versorgung, Abwicklung von Systemleistungen
Werthaltige Dienstleistungen	Integration von Produktion und Dienstleistungen; hybride Wertschöpfung

Tabelle 4: Zukünftige Anwendungsbeispiele im Bereich Logistik und Internet der Dinge

Cyber-Physische Systeme in der Logistik

Güter, Maschinen, Transportfahrzeuge (*Connected Cars*) und Lagersysteme werden mit „technischer Intelligenz“ ausgestattet, informationstechnisch vernetzt, mit Informationen über die eigene Umgebung und den eigenen Lebenszyklus verknüpft und zu „intelligenten Systemen“ entwickelt (Internet der Dinge). Solche Cyber-Physischen Systeme (CPS) entlang inner- und außerbetrieblicher logistischer Transportketten sind charakteristischer Bestandteil des Konzeptes „Industrie 4.0“. Dieses bezeichnet „im Kern die technische Integration von CPS in die Produktion und die Logistik sowie die Anwendung des Internets der Dinge und Dienste in industriellen Prozessen – einschließlich der sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Wertschöpfung, die Geschäftsmodelle sowie die nachgelagerten Dienstleistungen und die Arbeitsorganisation.“¹⁵⁴ Zudem stellen CPS eine Transparenz der Materialflüsse her, indem der Transportstatus eines Produktes jederzeit abruf- und nachverfolgbar ist.

Zu den Konsequenzen gehört auch die Integration bzw. Verknüpfung der verschiedenen IT-Systeme entlang der Wertschöpfungskette. CPS sind damit für die unterschiedlichen Prozessschritte der Produktion und Unternehmensplanung, zwischen denen ein Material-, Energie- und Informationsfluss verläuft, verantwortlich. Dies betrifft sowohl die logisti-

Konzept
„Industrie 4.0“

Verknüpfung der
IT-Systeme entlang
der Wertschöpfungs-
kette

¹⁵⁴ Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft-Wissenschaft und acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. URL: www.plattform-i40.de/sites/default/files/Abschlussbericht_Industrie4%200_barrierefrei.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

schen Prozesse innerhalb eines Unternehmens (Eingangslogistik, Fertigung, Intralogistik, Lagerhaltung, Ausgangslogistik, Vermarktung etc.) als auch Prozesse über mehrere Unternehmen (Wertschöpfungsnetzwerke aus Herstellern, Transporteuren, Zulieferern).

In der vernetzten Produktion des „Industrie 4.0“-Konzeptes mit flexiblen Varianten und Stückzahlen wandeln sich die Anforderungen an die Logistikprozesse. Sie müssen zuverlässig und schnell auf dezentrale und variable Nachfragesituationen reagieren. Der logistische Prozess wird damit neben der reinen Transportleistung zunehmend zu einem werthaltigen Service. Solche „hybriden Dienstleistungen“ verbinden in Zukunft verstärkt Transport, Planung, Organisation und Steuerung mit den Informationstechnischen Diensten und dem Wissensmanagement.¹⁵⁵

Entmaterialisierung

Ein erstes Beispiel zur „Entmaterialisierung“ von Warenströmen und Gütern der Logistik ist der *Hybridbrief*, bei dem ein Schreiben elektronisch aufgegeben, in der Nähe des Empfängers ausgedruckt und kuvertiert und dem Empfänger dann als physischer Brief zugestellt wird. Prinzipiell lassen sich dadurch Transportkosten und CO₂-Emissionen reduzieren. Mit neuen generativen Fertigungsverfahren (3-D-Drucken) kann diese „entmaterialisierte“ Logistik auch auf komplexe Objekte angewandt werden. Die Objekte werden nicht mehr von entfernten Produktionsstätten aus transportiert und zugestellt. Übertragen wird vielmehr nur noch die werthaltige digitale Information. Die Produkte können dann in regionalen Fertigungsstätten mit hochwertigen 3-D-Druckern vor Ort gefertigt werden.¹⁵⁶ Im Fokus auch solcher 3-D-Druck-basierter regionaler Fertigungskonzepte steht die Reduktion von Lager-/Transportkosten und CO₂-Emissionen. Zukünftige Geschäftsmodelle innovativer Logistikunternehmen könnten neben der Anlieferung von Rohmaterialien und der Auslieferung von Endprodukten auch den Betrieb von Fertigungsstätten mit 3-D-Druckern vorsehen. Regionale, dezentrale Fertigungskonzepte erfordern eine sichere Vernetzung z. B. von *eCommerce*-Plattformen, Anbieterdatenbanken mit Produkt- und Fertigungsinformationen, dem regionalen 3-D-Drucker und dem Logistikdienst im Sinne des Konzepts cyber-physischer Systeme.

3-D-Druck

Übertragen wird nur noch die werthaltige digitale Information.

¹⁵⁵ ten Hompel, M. (2013): Neue vernetzte Wege in der Logistik. URL: www.autonomik.de/documents/ten_Hompel_Logistik_4.0.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

¹⁵⁶ Deutsche Post AG (2010): Delivering Tomorrow – Zukunftstrend Nachhaltige Logistik. URL: www.delivering-tomorrow.com/wp-content/uploads/2012/02/dpdl_delivering_tomorrow_studie.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.



3.7 Nanotechnologie

Fülle unterschiedlicher Technologien und Verfahren

Pragmatischer Ansatz zur Definition

Große Oberfläche nanoskaliger Objekte im Vergleich zum Volumen

Quanteneffekte

Nanokomponenten

Die Nanotechnologie umfasst eine Fülle unterschiedlicher Technologien und Verfahren, die eine eindeutige Definition erschweren. Um eine international abgestimmte Sichtweise und Abgrenzbarkeit der Nanotechnologie zu erreichen, werden derzeit von internationalen Standardisierungsgremien wie dem ISO und dem IEC die Grundlagen für eine vereinheitlichte Nomenklatur und Normierung von nanoskaligen Objekten und Verfahren entwickelt. Allerdings ist es schwierig, alle Facetten der Nanotechnologie in einem einheitlichen Definitionsrahmen zu vereinen und von angrenzenden Bereichen wie der Mikrotechnologie, Chemie und Werkstofftechnik eindeutig abzugrenzen. Als Definition von Nanotechnologie wurde im Rahmen dieser Ausarbeitung ein pragmatischer Ansatz auf Grundlage der Definition von Nanotechnologie des BMBF gewählt: „Die Nanotechnologie befasst sich mit der kontrollierten Herstellung und Nutzung von Materialien und Komponenten mit funktionsrelevanten Strukturgrößen unterhalb von 100 Nanometern in mindestens einer Richtungsdimension. Dabei resultieren aus der Nanoskaligkeit neue Funktionalitäten und Eigenschaften, die zur Verbesserung bestehender oder zur Entwicklung neuer Produkte und Anwendungen beitragen können.“¹⁵⁷ Diese neuen Eigenschaften sind bedingt durch die enorm große Oberfläche, die nanoskalige Objekte im Vergleich zu ihrem Volumen besitzen. Oberflächenatome und -moleküle sind besonders reaktiv und reagieren mit ihrer Umgebung heftig und teilweise spontan. Zudem spielen Quanteneffekte eine Rolle, die bei größeren Objekten nicht zu beachten sind. Aus beiden Effekten resultieren beispielsweise eine eingeschränkte Bewegungsfreiheit von Elektronen, größenabhängige Farbänderungen von Nanopartikeln oder multifunktionell einstellbare Oberflächeneffekte.

Nanokomponenten werden technologisch am einfachsten nach ihrer physikalischen Strukturierung eingeteilt: eindimensional nanostrukturiert (z. B. ultradünne Schichten), zweidimensional nanostrukturiert (z. B. Nanoleitungen, Quantendrähte) und dreidimensional nanostrukturiert (z. B. Quantenpunkte, Nanopartikel). Zudem bedarf es zum Verstehen und Herstellen von Nanosystemen einer leistungsfähigen Analytik, sowie umfangreichen Wissens über die Eigenschaften von nanoskaligen Materialien und ihren Oberflächen/Strukturen als auch ein entsprechendes Verständnis der für die System- und Produktgenerierung verwendeten Prozesse und Verfahren. Daraus leiten sich fünf Teilgebiete der Nanotechnologie mit hoher Relevanz für Forschung und Innovation bis 2030 ab: (1) Nanoanalytik, (2) Nanomaterialien, (3) Nanobeschichtungen, (4) Nanostrukturierungen und (5) Nanosysteme. Die Randbedingungen für eine aus diesen fünf Teilgebieten heraus erfolgende Produktentwick-

¹⁵⁷ BMBF (2011): nanoDE Report 2011. Status quo der Nanotechnologie in Deutschland. Bonn, BMBF.

lung werden in vielen Fällen durch die Nachfrage nach extremen Einsparungen bei Gewicht, Volumen, Rohstoff- und Energieverbrauch, durch den Wunsch nach Ersatz von seltenen oder toxischen Materialein sowie durch den Trend zu Schnelligkeit bei der Produktherstellung bestimmt.

3.7.1 Nanoanalytik

Für die Entwicklung und Nutzung nanotechnologischer Verfahren und Produkte ist die verlässliche Kontrolle von Materialien und Bauelementen auf atomarer und molekularer Skala notwendig. Der gezielte Aufbau nanostrukturierter Systeme ist folglich ohne eine geeignete Analytik nicht möglich. Nanoanalytik wird daher als Oberbegriff für alle Messverfahren verwendet, die Aussagen über nanoskalige Objekte und Strukturen gestatten. Die zu untersuchenden Elemente haben in der Regel eine Größe von ca. einem Nanometer bis zu mehreren zehn Nanometern in wenigstens einer Dimension. Alle Verfahren der Nanoanalytik basieren überwiegend auf der physikalischen Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung, von geladenen oder ungeladenen Teilchen oder auf Effekten im Nahfeld zwischen einer Sonde und einer zu untersuchenden Probe. Eingesetzt werden hoch entwickelte Verfahren und Geräte, die mit Elektronen-, Ionen-, Neutronen-, Neutralteilchen- und Photonenstrahlen, unter Nutzung von Feldemissions- und Tunneleffekten sowie nach akustischen, elektrischen, thermischen, magnetischen und optischen Prinzipien arbeiten. Da es an Grenzflächen im Volumen und an Oberflächen zwischen Materialien unterschiedlicher chemischer und struktureller Zusammensetzung zu Diffusion, Segregation, Korrosion, Rekrystallisation, Legierungsbildung, Phasenumwandlung oder katalytischen Reaktionen kommen kann, wodurch Struktur, Zusammensetzung und damit die Stoffeigenschaften entscheidend verändert werden können, werden unterschiedlichste Analysemethoden erforscht. Die Nanoanalytik dient dabei nicht nur dem Vermessen von Strukturen und Verstehen von Materialeigenschaften, sondern wird auch mehr und mehr zur Qualitätssicherung in der industriellen Produktion, zur Erfassung von Schadstoffemissionen bei Prozessabläufen und zur Standardisierung und Normung eingesetzt.

Mittlerweile steht ein breites Spektrum an Nanoanalyseverfahren für verschiedenste Anwendungsfelder zur Verfügung. Die folgende Aufstellung gibt beispielhaft einen Überblick zu bereits realisierten Anwendungen im Teilgebiet der Nanoanalytik:

- Sicherung von Produkt- und Prozessqualität: Qualitätskontrolle von mikro-/nanostrukturierten Oberflächen (z. B. Displays, Mikrochips, Motorenbau),
- Fehler- und Schadensanalyse: z. B. Untersuchung von Korrosionsschäden (etwa Stahlbetonbauten, Rohrleitungen, Automobilkomponenten) oder Beschichtungsfehlern,

Oberbegriff für alle Messverfahren, die Aussagen über nanoskalige Objekte und Strukturen gestatten

Breites Spektrum an Nanoanalyseverfahren

- Nutzung von Nanopartikeln als Marker und Kontrastmittel in der medizinischen Diagnostik,
- Analytik gekoppelt mit Nanomanipulation: lokale Abscheidung von Molekülen im Elektronenmikroskop (z. B. Reparatur von Photomasken durch Kontrolle und Materialabscheidung).

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Kontinuierlich kommen weitere Anwendungsbereiche hinzu

Neben dem bereits routinemäßig eingesetzten Verfahren kommen durch neue Materialentwicklungen kontinuierlich weitere Anwendungsbereiche hinzu, die oftmals eine Geräteerweiterung oder gar die Entwicklung neuer Verfahren nötig machen. Dies betrifft z. B. Anwendungen für polymere und biologische Nanostrukturen, sowie die Analyse in flüssigen Medien, insbesondere in der Biomedizin, Umweltanalytik oder Keramikindustrie. Zunehmend wichtiger wird auch die Messung von Nanopartikeln in gasförmigen oder flüssigen Phasen hinsichtlich der Risikoforschung zu Nanomaterialien, bspw. mit Laserverfahren. Auch die Analyse dreidimensional strukturierter Bauelemente wird zunehmend wichtiger werden.

Eine Auswahl möglicher zukünftiger Anwendungen mit hohem Potenzial zur Problemlösung bis 2030 wird in Tabelle 5 dargestellt:

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Zeitaufgelöste Nanoanalytik (Kombination von bestmöglicher Orts- und Zeitauflösung mit elementspezifischem Nachweis)	Videsequenzen erstellen von chemischen Reaktionen, katalytischen Abläufen und maßgeschneiderten molekularen Zusammensetzungen
Molekulare Diagnostik kombiniert mit therapeutischer Einwirkung (Theragnostik)	molekular aufgelöste Abbildung von Krankheitsherden im Körper mit der Möglichkeit lokaler getriggelter Therapievorgänge (z. B. durch Freisetzung von Wirkstoffen vor Ort)
<i>Lab on a Chip</i> Nachweissysteme für <i>Point of Care</i> Anwendungen	Vor-Ort-Analyse von Atemluft und Körperflüssigkeit mit direkter diagnostischer Auswertung für Hausarztpraxen
Routinemäßige Anwendung der Rastersondentechniken in allen Feldern des <i>Life Science</i> Bereichs	zeitaufgelöste Viren- und Bakterieninteraktion auf menschlichen Zellen
Nanoanalytik verborgener Grenzflächen mit höchster Auflösung	elementspezifische Untersuchung überlagerter Schichten, z. B. elektronische Schichtsysteme, beschichtete Brückentragwerke, lackierte Metalloberflächen

Analyse von 3-D-strukturierten Materialien	Einsatz und Verbesserung von <i>X-Ray</i> -Tomographie, TEM-Tomographie, FIB-Kombination mit anderen Techniken. Nutzung von nicht linear- optischen Verfahren: Multiphotonen-Mikroskopie, STED-Mikroskopie für die Analyse biologischer Materialien
Entwicklung von Analyseverfahren, die unter Umgebungsbedingungen im alltäglichen Einsatz ähnlich gute Ergebnisse liefern wie unter Laborbedingungen	elementspezifische Analyse unter Umgebungsbedingungen von allen technischen Oberflächen und Schichtsystemen
Absolute Quantifizierung nanoanalytischer Messgrößen	direkter Nachweis von Oberflächen- und Festkörperstrukturen und –zusammensetzungen ohne Verfälschung durch die Analyse-methode selbst
Kombination nanoanalytischer Nachweisverfahren mit Methoden der atomaren Nanomanipulation	atomar präzise Fertigung von Systemkomponenten durch universelle Verfahren, welche gleichzeitig Analyse- und Manipulationsoptionen bieten
Tragbare preisgünstige Partikelanalysatoren	individuelle Umgebungsanalyse (z. B. Luft)
Zerstörungsfreie Strukturanalyse	höchstauflösende Röntgenanalytik zur Analyse von nanostrukturierter Materialien und elektronischen Bauelementen
Kombination von Simulation und nanoskaliger Analytik zur Bestimmung der Versagenscharakteristik von Bauteilen	Modellierung der Struktureigenschaften von tragenden Leichtbaumaterialien

Tabelle 5: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Nanoanalytik

Im Folgenden werden exemplarisch Anwendungen aus dem Bereich der zeitaufgelösten Nanoanalytik und der Theragnostik vorgestellt.

Zeitaufgelöste Nanoanalytik

Bei der Geräteentwicklung für die zerstörungsfreie elementspezifische Analyse mit hoher Zeit- und Ortsauflösung bietet sich die Kombination aus optischer Spektroskopie und Rastersondenverfahren an. Die Stärke der optischen Spektroskopie liegt in der Analyse von funktionellen chemischen Gruppen und von Atom- und Molekülanordnungen an und in Festkörpern, sowie in der Untersuchung dynamischer Prozesse bei der

Kombination aus optischer Spektroskopie und Rastersondenverfahren

*Tip-enhanced Raman
Scattering*

Reaktion solcher Strukturen. Durch Erfassen der Schwingungsbewegung von atomaren und molekularen Festkörperbausteinen kann deren elementspezifische Identität erfasst werden. Es bietet sich bspw. an, die optische Ramanspektroskopie mit der sehr hohen Ortsauflösung der Rastersondentechniken zu verknüpfen. Noch in der Grundlagenforschung, aber ein aussichtsreicher Kandidat für derartige Analyseprozesse ist die spitzeninduzierte Ramanspektroskopie (TERS: *Tip-enhanced Raman Scattering*). Dabei wird eine superscharfe STM-Spitze von einem Laserstrahl beleuchtet. Ein Teil des Lichts wird entlang der metallischen Oberfläche zum Ende der Spitze geleitet und von dort emittiert. Bringt man die Spitze sehr nahe einer Oberfläche, so erhält man eine punktförmige Anregungsquelle. Durch Abtasten der Oberfläche lassen sich dann kontinuierliche Abbildungen im Lichte atomarer und molekularer Signaturen erstellen zu chemischer Spezies, molekularer Orientierung, Oberflächenschwingungen oder Reaktionsverhalten. Durch entsprechende geometrische Anordnungen sind auch Ortsauflösungen im sub-nm-Bereich möglich, wodurch sich auch die Struktur einzelner Moleküle und das intermolekulare Verhalten studieren lassen.

Theragnostik

Analyse belebter
Materie

Neben der Analytik unbelebter Materie wird im Bereich der Nanobiotechnologie auch die Analyse belebter Materie durchgeführt, um unter anderem eine verbesserte Diagnose von Krankheitsverläufen erstellen und geeignete Therapiemaßnahmen einleiten zu können. Krebs gehört zu den derzeit häufigsten Erkrankungen, mit oftmals tödlichem Ausgang. Neue Ansätze zur frühzeitigen Detektion und Lokalisierung von Krebsgewächsen stellen moderne bildgebende Verfahren dar, welche von außen in den Körper eingeführte Nanopartikel zur Steigerung der Nachweisgrenze für die beginnende Tumorentwicklung und die verbesserte Ortsauflösung bei der Tumorklassifikation nutzen. Diese Partikel sind mit einem sogenannten Linker ausgestattet, der über das Schlüssel-Schloss-Prinzip eindeutig selektiv an Tumorgewebe andocken kann und somit für den lokalen Nachweis in einem PET-Scanner (*Positronen-Emissions-Tomograph*) oder über das MPI (*Magnetic Particle Imaging*; als Erweiterung des bereits eingesetzten MR-Verfahrens) maßgeschneidert nutzbar wird. Denkbar ist auch eine Kombination verschiedenster molekularer Bildgebungstechnologien. Dadurch lässt sich künftig das Ausmaß der Erkrankung besser einschätzen und darauf aufbauend können lokal nur am Krankheitsherd wirkende Therapien eingesetzt werden. Die spezifischen Partikel können z. B. gekoppelt werden mit einer radioaktivem Strahlung emittierenden Isotop, dessen Strahlung das umliegende Tumorgewebe zerstört. Oder es können magnetische Partikel eingesetzt werden, die von außen durch ein Magnetfeld zu Schwingungen und dadurch zur lokalen Erhitzung des Krankheitsherdes angeregt werden. Gekoppelt mit kugel- oder käfigförmigen Trägersystemen lassen sich auch eingekapselte Wirkstoffe zum Tumor bewegen und dort durch die lokal

erhöhte Temperatur, die Energiefreisetzung bei der Anbindung an das Tumorgewebe oder durch einen externen Trigger (Magnetpuls, Lichtpuls) freisetzen. Diese Kopplung von Diagnose und Therapie wird als Theragnostik bezeichnet. Aus den Bilddaten lassen sich zukünftig auch individualisierte Dosierungen der therapeutischen Einwirkung ableiten, sodass eine maximale Wirkung bei minimierten Nebenwirkungen für den Patienten erzielt wird.

Kopplung von
Diagnose und
Therapie

3.7.2 Nanomaterialien

Nanoskalige Materialien werden in Nano-Objekte und nanostrukturierte Materialien unterteilt.¹⁵⁸ Zu den Nano-Objekten zählen Nanoplättchen, Nanofasern und die Nanopartikel mit ein, zwei bzw. drei externen Dimensionen unter 100 nm.¹⁵⁹ Unter nanostrukturierten Materialien versteht man Materialien, die größer als 100 nm sind, die aber interne Strukturen kleiner 100 nm haben. Prominente Beispiele sind Nanocomposite, Agglomerate und größere Aggregate. Die Bandbreite der Nanomaterialien reicht von anorganischen, organischen, amorphen oder kristallinen Nanopartikeln, die singular in Aggregaten oder als Pulver sowie auch in einer Matrix dispergiert vorliegen können, über Nanokolloide, -suspensionen und -emulsionen bis hin zu dendritischen, kugel- und röhrenförmigen Anordnungen.

Nano-Objekte

Nanostrukturierte
Materialien

Zu den Nanomaterialien gehören beispielsweise kohlenstoffbasierte Materialien (u. a. Fullerene, Graphit, Graphen, Kohlenstoffnanoröhren, Aerogele), nanostrukturierte Metalle und Legierungen (u. a. auf Basis von Fe, Co, Ag, Au, Pt), keramische Nanopartikel und Nanostrukturen (u. a. Carbide, Nitride, Oxide auf Basis von Al, Ti, Zn, Fe, Si), Polymere (u. a. Partikel, Schichten, Röhren, Fasern, Dendrite), nanostrukturierte Halbleiter (u. a. anorganische Silizium- und Verbindungshalbleiter, organische Halbleiter), Nanokomposite (u. a. Polymere mit Nanopartikeln, Keramik- und Metallmatrixkomposite), nanostrukturierte Sintermaterialien, nanoporöse Materialsysteme sowie biobasierte Nanomaterialien (u. a. Lipid-Container, Nano-Cellulose, Nano-Biomminerale).

Beispiele für
Nanomaterialien

Wesentliche Grundlagen der Eigenschaften von Nanomaterialien im Unterschied zu klassischen makroskopischen Stoffen sind ihr sehr großes Verhältnis von Ober- bzw. Grenzfläche zu Volumen sowie die hier in den Vordergrund tretenden Quanteneffekte. So liegen beispielsweise bei einem Partikel mit 10 nm Durchmesser ca. 20% aller Atome an der Oberfläche, bei einem Partikel von 1 nm Durchmesser können es über 90% sein. Mit zunehmendem Oberflächenanteil steigt auch die Oberflächenenergie der einzelnen Teilchen an, wodurch sich z. B. deren Schmelz-

¹⁵⁸ ISO TC 229, Standard ISO/TS 80004-4: 2011.

¹⁵⁹ ISO-Standard TS 27687 (2008): Nanotechnologies – Terminology and definitions for nano-objects – Nanoparticle, nanofibre and nanoplate.

punkt erniedrigt oder deren chemische Reaktivität stark erhöht. Über eine präzise Kontrolle der Größe der Partikel lassen sich physikalische, chemische und biologische Eigenschaften von Systemkomponenten in bestimmten Grenzen einstellen.

Die Erforschung von Nanomaterialien lässt ein beträchtliches Potenzial für die Werkstoffwissenschaften erwarten, denn durch geeignete strukturelle Zusammensetzung lassen sich Materialien mit völlig neuen mechanischen, elektrischen oder magnetischen Eigenschaften herstellen, die bei herkömmlichen Materialien nicht vorzufinden sind. Durch diese zahlreichen und gezielt gestaltbaren Eigenschaften haben Nanomaterialien eine weitreichende Bedeutung für zahlreiche Forschungs- und Anwendungsgebiete. Folgende Beispiele zeigen Eigenschaften von Nanomaterialien, die sich aufgrund der Nanoskaligkeit gezielt einstellen und optimieren lassen:

- katalytisch: erhöhte katalytische Aktivität durch stark vergrößerte Oberfläche,
- elektrisch: erhöhte elektrische Leitfähigkeit in Keramiken,
- magnetisch: kontrolliertes superparamagnetisches Verhalten,
- mechanisch: erhöhte Härte und Festigkeit von Metallen und Legierungen,
- optisch: einstellbare Transparenz von Optiken,
- sterisch¹⁶⁰: erhöhte Selektivität und Wirksamkeit von Membranen,
- thermisch: Schmelzpunkterniedrigung und Leitfähigkeitsänderung,
- biologisch: erhöhte Biokompatibilität.

Die folgende Zusammenstellung zeigt eine kleine Auswahl repräsentativer Beispiele zu bereits realisierten Anwendungen im Teilgebiet der Nanomaterialien:

- Energiespeicherung: Batterieelektroden für hochkapazitive Akkus,
- Katalyse: gezielte Steuerung chemischer Reaktionen und Erhöhung der Ausbeute,
- Leichtbau: Komposite für hohe mechanische Belastungen,
- Molekulare Bildgebung: Nanoteilchen als Kontrastmittel in der Computertomografie,

¹⁶⁰ richtungsabhängige Eigenschaften.

- Therapeutika: nanopartikuläre Inhalativa (Peptid- und Proteintherapeutika) zur Behandlung von Asthma,
- UV-Schutz: nanostrukturiertes Zink-/Titandioxid für transparente UV-Schutzcremes,
- Wasserstoffspeicher: nanoporöse Wasserstoffspeicher für Brennstoffzellen-Fahrzeuge,
- Kunststoff: elektrisch leitfähige CNT-Komposite für heizbare Oberflächen (z. B. im Auto).

Das hohe Nutzenpotenzial von Nanomaterialien hat bereits jetzt einen drastischen Anstieg bei der Produktion und dem Einsatz in unterschiedlichen Anwendungsfeldern zur Folge. Ungeklärt ist das u. U. damit verbundene breite Spektrum an möglichen Gefahren für Mensch und Umwelt durch nanotechnologische Produkte. Um die möglichen Gefährdungen, welche von den Nanopartikeln während ihrer Herstellung, Verwendung und Entsorgung für Mensch und Umwelt ausgehen, abschätzen zu können, hat sich die Nanorisikoforschung als neues Forschungsfeld etabliert.

Drastischer Anstieg bei der Produktion

Nanorisikoforschung als neues Forschungsfeld

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

In den letzten Jahren hat sich das Spektrum kommerziell verfügbarer Nanomaterialien deutlich erweitert. Die Produktionskapazitäten neuer Materialklassen wie Kohlenstoffnanoröhren (CNT), anorganische Dotierstoffe oder organische Halbleiter werden derzeit auf einen industriellen Maßstab hochskaliert. Zu den neueren Nanomaterialien mit zukünftiger kommerzieller Bedeutung zählen nanostrukturierte Pulver von Metalloxiden und Metallen, nanostrukturierte Silikate, Fullerene, Graphene, Quantenpunkte, organische Makromoleküle wie Dendrimere oder Cyclodextrine, sowie Nanofasern und Nanozellulose. Eines der wohl derzeit interessantesten Felder für Materialhersteller sind die Kohlenstoffmodifikationen, speziell die CNTs und Graphene. Daraus hergestellte Materialien können allein durch das atomare Arrangement des Elementes Kohlenstoff hart, weich, elektrisch leitfähig oder perfekt isolierend eingestellt werden, wobei dafür noch die weiteren C-Modifikationen Graphit und Diamant eingesetzt werden.

Nanomaterialien mit zukünftiger kommerzieller Bedeutung

Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele mit hohem Potenzial zur Problemlösung bis 2030 werden in Tabelle 6 dargestellt:

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Kohlenstoffnanoröhren (CNT) als Verbundmaterialien	Tragekonstruktionen; Brückenseile; große Flügel von Windenergieanlagen, aktorische Elemente
CNTs Komposite für elektrisch leitfähige Polymere	Schutz elektronischer Komponenten; heizbares Interieur von Autos; Displaytechnik, Photovoltaik

Graphen in Computerhardware	schnellste Taktzeiten durch extrem hohen Elektronenleitfähigkeit; Wärmeabfuherelemente
Graphen in Elektroden	Akkus und Superkondensatoren
Gasdiffusionssperren und gezielt funktionalisierte Membrane	Trinkwassergewinnung mit niedrigem Energieaufwand
Wirkstofftransport	orale Einnahme von lokal und selektiv wirkender Pharmaka
Erhöhung der Biokompatibilität	verbessertes Einwachsverhalten von Implantaten
Steigerung der Sensitivität von Diagnostikchips	frühzeitige Diagnose von Tumoren
Organische Halbleiter für RFIDs	preiswerte, umweltverträgliche RFID-Etiketten
Organische Halbleiter für OLEDs	energieeffiziente OLED Beleuchtungselemente
Anorganische Halbleiter für LEDs	LED-Leuchten mit hohem Wirkungsgrad
Organische Halbleiter für die Energiegewinnung	flexible organischen Photovoltaik mit hohem Wirkungsgrad
Verbesserung der Nachweisqualität in der Diagnostik	stabile Fluoreszenzmarker in der in-vitro-Diagnostik
Nachweis von Plagiaten	Quantenpunkte für den unsichtbaren Produktschutz
Quantenpunkte in optischen Materialsystemen	Laser, Dioden oder Solarzellen mit deutlicher Effizienzsteigerung
Dendrimere als Käfigmoleküle	kompakter Wirkstoffträger in der Pharmazie
Elektrochemie	nanoporöse Materialien für leistungsstarke Batterieelektroden
Gasspeicherung	poröse Materialanordnungen für die H ₂ -Speicherung
Nanoporöse Materialien für die thermische Isolation	Nutzung von Aerogelen für Wandelemente
Nanofasern für textile Trägermaterialien	reisfeste Stoffe und verstärkte Textilbetonelemente
Filtration	gewebte Filtrationsmembrane mit gezielt eingestellter Porosität und Selektivität
Leichtbau	hochfeste Nanozellulose-Komposit-Verbindungen für Leichtbauelemente
Produktionsprozesse	Änderung von Schmelztemperaturen und thermischen Leitfähigkeiten
Medizinische Wundversorgung	biokompatible Nanozellulose für die Versorgung von Brandopfern

Tabelle 6: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Nanomaterialien

Im Folgenden werden exemplarisch zukünftige Anwendungen von Nanomaterialien aus den Bereichen Energie und Bau vorgestellt.

Energiespeichersysteme

Vereinfacht ausgedrückt wird durch Verkleinerung von Materialien bei deren Einbau in Batterieelektroden oder Kondensatoroberflächen eine stark vergrößerte Oberfläche für die Speicherung von Ladungsträgern geschaffen, welche zukünftig hochkapazitive Energiespeichersysteme für Elektroautos oder für die lokale Energiespeicherung bei Windparks ermöglichen. Zudem wird erwartet, dass durch eine angepasste Nanostrukturierung eine gezielte Einstellung der Leitfähigkeit von Batteriesystemen und damit deutlich verkürzte Ladezeiten von Akkus ermöglicht werden können. Alternativ werden mit optimierten Brennstoffzellen und effizienten Wasserstoffspeichern weitere Mobilitätsoptionen erforscht.

Stark vergrößerte Oberfläche für die Speicherung von Ladungsträgern

Baubranche

Im Baubereich werden energie- und ressourcenschonende Anwendungen erwartet. Beispielsweise wird es zukünftig multifunktionelle Glasfassaden geben, an denen aufgrund der Oberflächenstrukturierung kaum Schmutz anhaftet, die durch Einbau nanometerdünner elektrisch ansteuerbarer Zwischenschichten eine schaltbare Transparenz zeigen und somit gesteuert Licht und Wärme durchlassen und die durch Belegung mit transparenten photovoltaischen Schichten direkt zur Energieerzeugung genutzt werden können. Die eingebauten Nanostrukturen sind im Vergleich zu sichtbaren Lichtwellenlängen so klein, dass die sichtbaren optischen Eigenschaften der Glasfassade entweder nicht oder nur kontrolliert verändert werden. Im Sanitärbereich werden photokatalytische Beschichtungen selbst bei künstlicher Beleuchtung antibakterielle Oberflächeneigenschaften aufweisen. Durch korrosionsresistente Leichtbaumaterialien mit hoher mechanischer Festigkeit ergeben sich neue Gestaltungs- und Designoptionen.

Multifunktionelle Glasfassaden

3.7.3 Nanobeschichtungen

In der Regel stellen Nanobeschichtungen eindimensional vertikal strukturierte Nanokomponenten dar. Mit entsprechend eingestellten Schichtdicken unter 100 nm können makroskopische Effekte und Funktionen erreicht werden, deren Ursachen in diesen definiert hergestellten nanoskopischen Dimensionen liegen und zu deutlich verbesserten oder gar völlig neuartigen Produktfunktionalitäten führen. Beispiele für solche Funktionalitäten sind magnetische, optische und magnetooptische Eigenschaften, elektrische Leitfähigkeit, mechanische Stabilität, Kratzfestigkeit, Transparenz für Licht und Wärmestrahlung, Korrosionsbeständigkeit, Minimierung von Reibverlusten, Diffusionskontrolle, katalytische Eigenschaften, photoleitende und photovoltaische Anwendungen oder biologische Kontakteigenschaften. Ultradünne funktionale Schichten sind ein Schlüsselement in der Nanotechnologie. Sie finden ihren Einsatz in

Eindimensional vertikal strukturierte Nanokomponenten

Ultradünne funktionale Schichten sind ein Schlüsselement in der Nanotechnologie

nahezu allen Zukunftstechnologien von der Mikro/Nanoelektronik, Optik, Energietechnik, Medizin, Sensorik bis hin zu Verschleißschutzschichten. Nanobeschichtungen werden meist mittels Vakuumverfahren, Abscheidung aus der Gasphase, elektrochemischer Abscheidung oder durch Beschichten aus flüssigen Lösungen hergestellt.

Nanoskalige Schichten sind bereits in einer Vielzahl von Anwendungsfeldern funktionstragende Elemente. Die folgende Aufstellung enthält Beispiele zu bereits realisierten Anwendungen im Teilgebiet der Nanobeschichtungen.

- Bauwesen: selbstreinigende Fassaden; Kratzfest- und UV-Schutzbeschichtung für Parkettboden; Vermoosungsschutz von Steinzeug und Holzoberflächen; Korrosionsschutz für Aluminium; entspiegelte oder selbsttönende Fensterscheiben,
- Maschinenbau: Reibreduktion in Lagern und Gestängen; Antihafteigenschaften von Industrierwalzen,
- Automobilbau: reibungsreduzierende Schichten im Antriebsstrang zur Verbesserung der Energieeffizienz und Reduzierung des CO₂-Ausstoßes,
- Medizin: nanobeschichtete Oberflächen bei Gefäßstützen (Stents); biokompatible Implantatoberflächen; Schutzschichten für Zähne; antibakterielle Beschichtung von medizinischen Geräten,
- Optik: kratzfeste Brillengläser und Optiken; langlebige OLED- und OPV-Beschichtungen; Röntgenspiegel für EUV-Lithografie und Diffraktometrie,
- Beleuchtung: energieeffiziente LEDs; OLED für großflächige Displays und Beleuchtungskörper,
- Verpackung: Verbesserung der Restentleerbarkeit; Beschichtungen mit Sensorfunktion für Frischeindikation; Fälschungsschutz, Verlängerung der Haltbarkeit durch Diffusionssperren,
- Energiegewinnung: Antireflexbeschichtung von Solarzellen; keramische Antihafschichten in Wärmetauschern; Beschichtungen für Flammrohre in Ölheizungen; Antieisschichten für Windräder; Nano-Hitzeschutzschichten in Gasturbinen,
- Sicherheitstechnik: Beschichtungen mit optischen Sicherheitsmerkmalen als Fälschungsschutz; Polymerschichten für Gefahrstoffdetektoren; Antibeschlag- und Antireflexschichten für Visiere und Sicherheitsbrillen.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Nanoschichten haben innerhalb der Nanotechnologie ein großes ökonomisches Potenzial und sind daher in der Industrie bereits weit fortgeschritten¹⁶¹. Interessante Zukunftsfragestellungen im FuE-Bereich ergeben sich aber stetig, z. B. wenn die Schichten nur wenige Atomlagen dünn werden und somit neue Effekte, etwa Quanteneffekte, eine dominierende Rolle spielen. Zudem lassen sich Schichtstapel aus verschiedensten Materialkombinationen mit maßgeschneiderten Eigenschaften herstellen. Die technischen Ziele für neue Anwendungen liegen in der Erzeugung großflächiger atomar genauer Schichtgrenzen, in der Herstellung definierter positionierter quantisierter Potenzialverteilungen, bei der Stapelung von Nanoschichten im extremen thermischen Nichtgleichgewicht, beim Einbau von Trenn- und Schutzschichten zur Vermeidung unerwünschter Diffusion oder elektrischer Leitung sowie bei der In-vivo-Anwendung von Grenzflächen.

Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele mit hohem Potenzial zur Problemlösung bis 2030 werden in Tabelle 7 dargestellt:

Quanteneffekte mit dominierender Rolle

Schichtstapel aus verschiedensten Materialkombinationen

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Beschichtungen mit schaltbaren Klebeeigenschaften auf Basis funktionalisierter Polymere und Nanopartikel	wirtschaftlichere Montage- und Herstellungsverfahren sowie verbesserte Recycling-Eigenschaften von Verbundwerkstoffen, z. B. im Automobil- und Flugzeugbau
Multifunktionale Materialsysteme aus nanoskaligen Hybridpolymerschichten	elektrisch oder lichtinduziert schaltbare Oberflächeneigenschaften wie Hydrophilie oder Hydrophobie z. B. für adaptive Wundauflagen, multifunktionale Textilien oder Mikrofluidikanwendungen.
Nano-Beschichtungen mit selbstheilenden Eigenschaften, z. B. auf Basis nanoverkapselter Inhaltsstoffe (Katalysatoren, Korrosionsinhibitoren)	Korrosions- und Abrasionsschutz für Bauwerke, Maschinenteile, Autolacke, Alltagsgegenstände zur Erhöhung der Nutzungsdauer
Nanoschichtsysteme für sog. <i>Self reporting Materials</i> , die Zustands- und Eigenschaftsänderungen des Materials durch molekulare Wechselwirkungen z. B. durch optische Signale (Fluoreszenz, Farbwechsel) anzeigen.	frühzeitige Schadenserkenkung mechanisch belasteter Komponenten in sicherheitskritischen Anwendungen (Flugzeuge, Schnellzüge, Automobile, Windkraftanlagen etc.)

¹⁶¹ BMBF (2011): nanoDE Report 2011. Status quo der Nanotechnologie in Deutschland, Bonn, BMBF.

Großflächige Graphen-Beschichtungen	flexible, optisch transparente Beschichtungen zur Integration von (Opto-)Elektronik in Alltagsgegenstände (<i>Ambient Intelligence</i>)
Organische-anorganische Nanokomposit- und Multischichtsysteme für fortgeschrittene Anwendungen in der Optoelektronik	transparente Folien mit integrierter Photovoltaik und organischen Leuchtdioden für Fenster, Fassaden, Verpackungen
Nanostrukturierte Schichtsysteme mit integrierter Sensorik/-Aktorik-Funktion	Flugzeugaußenhaut mit adaptiven Oberflächenstrukturen zur Optimierung des Luftwiderstandes zwecks Reduktion des CO ₂ -Ausstoßes im Luftverkehr
Photovoltaische Energiegewinnung	wellenlängenangepasste photovoltaische Schichtaufbauten mit höchster Energieeffizienz
Ersatz seltener Rohstoffe für leitfähige Beschichtungen	Nutzung von Graphen, CNT oder Zinn- und Antimonverbindungen zum Ersetzen von Indium in transparenten leitfähigen Glasbeschichtungen von Laptops, Displays, Handys oder sonstiger Anzeigeelemente
Elektronische Bauelemente	topologische Isolatorschichten für elektronische Komponenten mit höchsten Schaltfrequenzen

Tabelle 7: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Nanobeschichtungen

Im Folgenden werden exemplarisch zukünftige Anwendungen von Nanobeschichtungen aus den Bereichen selbstheilende Oberflächen und Graphenschichten vorgestellt.

Selbstheilende Nanobeschichtungen für Reparaturzwecke und für den Korrosionsschutz

Korrosion und Verschleiß fügen der Volkswirtschaft jedes Jahr beträchtlichen Schaden zu. Daher sind Schichtsysteme aus einem Beschichtungsmaterial und einem Zusatz für evtl. notwendige Reparaturen von Interesse. Ein Ansatz für solche Systeme besteht im Einbau nanoverkapselter chemisch reaktiver Substanzen in Lacke, Polymerschichten oder Galvanobeschichtungen. Beim Auftreten einer kleinen Verletzung des Überzugs werden die Kapseln ebenfalls verletzt, setzen die Reparatursubstanz frei und diese reagiert mit der Beschichtung. Dadurch sollen kleine Risse von selbst wieder ausheilen oder freigelegte Oberflächen durch fluidische Neubeschichtung vor Korrosion geschützt werden. Die beim Einbau intakten Nanokapseln fungieren durch die Verletzung und Freisetzung auch als inhärente Sensoren, also sozusagen als intelligentes System, das nur im Bedarfsfall aktorisch reagiert.

Einbau
nanoverkapselter
chemisch reaktiver
Substanzen

Graphen und CNT für transparente Displays

Graphen eignet sich aufgrund seiner zweidimensionalen Struktur hervorragend als Schichtmaterial. Zudem besitzt es eine extrem hohe elektrische Leitfähigkeit und wird daher auch als Kandidat gehandelt, zur Fertigung ultradünner und rollbarer *Touchscreens*, flexibler Photovoltaikbauelemente oder Folien für Beleuchtungssysteme eingesetzt zu werden. Da diese Bauteile bisher in der Regel mit Indium-Zinn-Oxid (ITO) für die nötigen leitfähigen transparenten Elektroden arbeiten, könnte daher Graphen durchaus in Zukunft das sehr teure und rare Indium ersetzen. Alternativ sind auch Beschichtungen mit Kohlenstoffnanoröhrchen in der Erprobung für leitfähige und transparente Displays. Im Vergleich zu Graphen ist jedoch die Dispergierbarkeit der CNTs schwieriger zu handhaben.

Graphen könnte das sehr teure und rare Indium ersetzen

3.7.4 Nanostrukturierungen

Das Gebiet der Nanostrukturierung beschäftigt sich mit Strukturgrößen unter 100 nm. Verfahren zur Nanostrukturierung basieren auf zwei Ansätzen:

Top-down: Durch die Verringerung von Strukturgrößen mikroskopischer Bauelemente bis in den Nanometerbereich werden physikalische Eigenschaften nutzbar gemacht, die von charakteristischen Dimensionen bestimmt werden (Tunneleffekte, Einzelelektroneneffekte etc.), oder es werden durch die Verkleinerung von Abmessungen kürzere Signalwege und damit höhere Schaltgeschwindigkeiten für die Informationsverarbeitung erreicht und dies bei deutlich geringerem Energieverbrauch.

Top-down

Bottom-up: Atom- bzw. Molekülaggregate werden durch kontrollierten Aufbau zu größeren Systemen mit neuen Eigenschaften (Cluster, supra-molekulare Systeme, Übergitter etc.) zusammengefügt. Beispiele sind die Herstellung von strukturierten Grenzflächen (Membrane, Katalysatoren, funktionelle Strukturen an Oberflächen), oder die gezielte Kopplung von Molekülsystemen an Oberflächen größerer Objekte.

Bottom-up

Die Forschung und Entwicklung zahlreicher gegenwärtiger und zukünftiger Technologiebereiche erfordert den Umgang mit immer kleineren Strukturgrößen und immer komplexeren Komponenten aus unterschiedlichsten Materialien. Zur Herstellung nanometrischer lateraler Strukturen werden verschiedene projektions- und direktschreibende Verfahren verwendet. Neben der optischen Lithografie im UV- und Extrem-UV-Licht werden in den meisten Fällen auch Verfahren mit direktschreibenden Laser-, Ionen- oder Elektronenstrahlen verwendet. In den letzten Jahren wurden auch immer öfter Nanoprägetechniken, Nanokontaktprinting, Tintenstrahlschreiben, holografische Interferenzverfahren, Selbstorganisationsmethoden oder die Strukturierung mit Rastersondenverfahren für industrielle Anwendungen eingesetzt

Herstellung nanometrischer lateraler Strukturen

Die folgende Zusammenstellung gibt einen Überblick zu bereits realisierten Anwendungen im Teilgebiet der Nanostrukturierungen:

- Gerätebau: Herstellung von Strukturierungsmaschinen für die Produktion elektronischer Schaltkreise mit Strukturgrößen im Bereich 20 nm,
- Diagnostik/Therapeutik: nanostrukturierte Elektroden für elektrochemische Biosensoren; körperverträgliche Mikroelektroden für die Neurostimulation,
- medizinische Implantate: nanostrukturierte Oberflächen bei Gefäßstützen (Stents) für verbessertes Einwachsen in den menschlichen Körper,
- Nanooptik: Photonische Kristalle als Filter und zur Strahlführung; Metamaterialien für Sensorik und Mikroskopie; Nanostrukturierte Vielschichtstapel für Multi-Junction Solarzellen),
- Energietechnik: nanostrukturierte Thermoelektrika zur Stromerzeugung aus Abwärme.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Selbstorganisation

Integrierte Anwendung verschiedener natur- und ingenieurwissenschaftlicher Disziplinen

Der Trend zu kleineren Strukturgrößen bei Bauteilen der Nanotechnologie ist ungebrochen. Im Grundlagenbereich lassen sich bereits gezielt Atome und Moleküle auf Oberflächen setzen und so erste funktionelle Strukturen zusammenbauen. Auch durch Selbstorganisation können Atome und Moleküle zu größeren Objekten (Inseln, Cluster) zusammengefügt werden. Doch langfristig innovativ für nanotechnologische Entwicklungsarbeiten wird erst die integrierte Anwendung verschiedener natur- und ingenieurwissenschaftlicher Disziplinen wie Physik, Chemie, Biologie, Verfahrenstechnik, Kommunikations- und Informationswissenschaften sowie Kognitionswissenschaften werden, also der Übergang zur Systemgenerierung.

Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele mit hohem Potenzial zur Problemlösung bis 2030 werden in Tabelle 8 dargestellt:

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Neue Materialstrukturen für die Elektronik und Datenspeicherung	strukturierte spintronische Schichten für die Informationsspeicherung und –verarbeitung mit dem Elektronenspin als Dateneinheit
<i>Quantum Computing</i>	Einbau definierter Quantenpunkte in geeignete Strukturen für die Quanteninformationsverarbeitung

Implantate aus körpereigenem Material	Wachsen künstlicher Körperteile aus eigenen Zellen auf vorstrukturierten Substraten
Nutzung von Selbstorganisationsprozessen in der Molekularelektronik	Herstellung großflächiger <i>Low-Cost</i> -Elektronikbauteile, molekulare Verdrahtung dreidimensionaler Chipstrukturen
Selbstorganisationsprozesse in der Werkstoffsynthese für organisch-anorganische Hybridmaterialien	biomimetische Hochleistungswerkstoffe für Anwendungen im Leichtbau oder in der regenerativen Medizin
Templatverfahren zur großflächigen Strukturierung von Substraten	hoch selektive Katalysatoren für chemische Prozesse und Filtrationsmedien für die Umwelttechnik (Trinkwasserreinigung, weiße Biotechnologie)

Tabelle 8: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Nanostrukturierungen

Im Folgenden werden exemplarisch zukünftige Anwendungen von Nanostrukturen in den Bereichen Selbstorganisation und *Quantum Computing* vorgestellt.

Selbstorganisation als Strukturierungsprinzip für Funktionseinheiten zukünftiger Nanosysteme

Zu einem neuen Fertigungszeitalter könnte die Selbstorganisation elementarer Bausteine beitragen. Heutige Herstellungs- und Montageschritte werden routinemäßig durch gesteuerte Maschinen ausgeführt. Für die Zukunft dagegen prognostizieren Wissenschaftler Fertigungsmethoden, wodurch sich Werkstoffe, Apparate und sogar komplette Maschinen präzise von selbst aufbauen könnten. Grundlage bietet ein Prozess, bei dem ungeordnet bereitstehende Atome, Moleküle, Molekülverbände oder schon größere Bauteile sich zu wohlgeordneten Einheiten nach energie- und entropiebestimmten Regeln zusammenfügen. Generiert man Moleküle, in denen bereits Informationen über ihren möglichen Verbindungspartner und auch den Ort der Verbindungsstelle eingebaut sind, so lassen sich auf nasschemischem Weg – ähnlich einem Baukastensystem – Funktionseinheiten als Grundbausteine zukünftiger Nanosysteme herstellen (z. B. rotierende Achse mit Lager, Käfige für Wirksubstanzen).

Forschungsbedarf besteht bei der Klärung von Selbstorganisationsprinzipien und deren möglichem Einsatz in der Wirtschaft. In der wissenschaftlichen Grundlagenforschung werden Selbstorganisationsphänomene zwar schon genutzt zur Strukturierung, aber gleichzeitig auch als Forschungsfeld zur Untersuchung der zugrunde liegenden Prozesse. Bei entsprechender Vorbereitung sollte der Selbstorganisationsprozess bei exakter Materialsynthese schnell, einfach und selbstkontrollierend ablaufen

Neues
Fertigungszeitalter

Klärung von
Selbstorganisations-
prinzipien

Einsatz biologisch
aktiver Proteine

können. Auch haben selbstorganisierende Systeme Selbstreparaturfähigkeiten, welche nach thermodynamischen Prinzipien ablaufen, und weisen daher eine geringe Defektdichte auf. Da die Selbstorganisation eine Eigenschaft der belebten Natur ist, können sich neue Anwendungen auch durch Einsatz biologisch aktiver Proteine ergeben, deren enzymatische Aktivitäten feldinduziert gesteuert und somit gezielt örtlich beeinflusst werden können. Auch durch biologische Ankoppelprinzipien lassen sich zweidimensionale kristalline Oberflächenschichten (S-Schichten), die z. B. bei Bakterien vorkommen, erzeugen und zur Nanostrukturierung nutzen. Doch auch in diesem seit Jahren erforschten Feld findet man bisher kaum eine großtechnische Umsetzung, da noch Fragen die möglichen Anwendungen betreffend erforscht werden müssen.

Präzise Nanostrukturierung für das *Quantum Computing*

Quanteninformatik

In der Quanteninformatik werden anstelle der klassischen *Bits* sogenannte *Qubits* verwendet, also rein auf quantenmechanische Zustände beruhende Datensysteme. Die schwierigste Aufgabe der Quanteninformatikstechnologie ist wohl der Aufbau eines Quantencomputers. Dieser hätte gegenüber dem klassischen Computer durch seine parallele Prozessierung enorme Vorteile bei der Lösung zeitkritischer Aufgaben. Voraussetzung für quantenmechanisches Rechnen ist die Herstellung von Quantenbauelementen, welche kohärente Quanteneffekte nutzen. Diese basieren meist auf der definierten Herstellung kleinster Strukturen, welche eine völlig kontrollierbare Wechselwirkung und Kopplung der Quantenstrukturen beim Ein- und Auslesen zulassen. So basieren verschiedene FuE-Ansätze auf spinempfindlichen nanoskaligen Oberflächenstrukturen, Halbleiter-Heterostrukturen und -quantenpunkten oder auf integrierten nano-elektromechanischen Systemen zur Speicherung von Quantenbits als kleinsten Informationseinheiten. Weitere Forschungsansätze sehen die Darstellung und Verarbeitung solcher *Qubits* auf Basis gespeicherter Ionen oder ultra-präzise positionierter Farbzentren in Diamant vor. Zu erforschen ist noch die Anpassung der Struktur an die zu lösenden Rechenprobleme und die Kontrolle der Wechselwirkung der empfindlichen Quantenzustände mit der Umgebung.

Ultra-präzise
positionierte
Farbzentren in
Diamant

3.7.5 Nanosysteme

Unter Nanosystemen werden im Allgemeinen funktionelle Systeme verstanden, die auf spezifischen Eigenschaften durch Nanoskaligkeit basieren und als Systembausteine selbst nanoskalig sind. Da es aber für Nanosysteme bisher noch keine international abgestimmte Definition gibt, wird der Begriff nicht einheitlich verwendet. Daher fallen oft auch die generellen Anwendungen nanoskaliger Charakteristika in makroskopischen Anwendungen zur Erzielung neuer Oberflächen- und Volumeneigenschaften, beispielsweise *Easy-to-clean*-Oberflächen, Erhöhung von Materialfestigkeiten oder erhöhte katalytische Reaktionsausbeuten bei chemischen Reaktionen unter die Begriffe nanoskalige Systeme oder

funktionelle Nanosysteme. Im Folgenden werden solche Anwendungen nicht als Nanosysteme verstanden.

Der Bereich der Nanosysteme ist zum überwiegenden Teil noch der Grundlagenforschung zuzurechnen. Daher können keine bereits realisierten Anwendungen von „echten“ Nanosystemen benannt werden. Die funktionellen Komponenten von Nanosystemen sind aus Nanostrukturen und -schichten zusammengesetzte Nanobauelemente. Diese Komponenten können Sensoren und Aktuatoren sein, oder auch der synthetischen Biologie vergleichbare Molekularsysteme. Darunter fallen die molekularen Nanomotoren und -aktoren, nanoskalige Positioniersysteme, nanoskalige sensorische Elemente, oder auch die als noch futuristisch anzusehenden autonom agierenden Nanoroboter. Zum Aufbau von Nanosystemen müssen die geeigneten Synthese- und Assemblierungstechniken verstanden werden und zur Verfügung stehen.

Nanosysteme zum überwiegenden Teil Grundlagenforschung

Nanoroboter noch als futuristisch anzusehen

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Neue Materiestrukturen und Systembauteile sollen unter Nutzung atomarer bzw. molekularer Architekturen gezielt zur Ausführung definierter mechanischer, elektrischer, optischer, magnetischer, chemischer und/oder biologischer Funktionen angeordnet werden. Sie sollen selbstständig Daten erfassen, auswerten und daraus resultierende Aktionen durchführen. Moleküle werden etwa zu elektrischen Schaltern oder dienen der Informationsaufnahme, -speicherung, -übertragung. Auch zur Mustererkennung, Selbststrukturierung, -organisation, -reproduktion, zum selektiven Ankoppeln von Atomen, oder zur Molekülgruppenbildung (Cluster) bzw. -trennung können selbstorganisiert erzeugte molekulare Architekturen dienen. Durch Fabrikation neuer strukturdefinierter Materialanordnungen können beispielsweise Metalle zu Halbleitern bzw. zu optischen oder „schaltbaren“ Werkstoffen werden, Filter bzw. Membranen werden steuerbar, sodass sie ihre Poren bei Kontakt mit bestimmten Molekülen schließen, Motorproteine (biologische Transportvehikel) lassen sich gezielt für den Wirkstofftransport einsetzen.

Nutzung atomarer bzw. molekularer Architekturen

Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele mit hohem Potenzial zur Problemlösung bis 2030 werden in Tabelle 9 dargestellt:

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Mechanisch flexible, miniaturisierte Energiewandler und -speicher	<i>Smart Energy Harvesting</i> für intelligente Textilien, autonome Sensornetzwerke und Messstationen z. B. für das Umweltmonitoring
Aktorik	künstliche Muskeln aus CNT-Schichtanordnungen als Stellglieder in Positionierbauteilen
Biotransporter	Nutzung von Motorproteinen als biologische Transportsysteme

<i>Drug Targeting und Release</i>	Sensor-Aktor gesteuerte Wirkstofffreisetzung (thermisch, magnetisch, chemisch, über Schlüssel-Schloss-Prinzip etc.)
-----------------------------------	---

Tabelle 9: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Nanosysteme

Im Folgenden werden exemplarisch zukünftige Anwendungen von Nanosystemen in den Bereichen Wirkstofftransport und Herstellung von Nanomaschinen vorgestellt.

Ansteuerbare Nanotransporter für den Wirkstofftransport

Träger- und Containersysteme sowie Ankeroptionen

Zukünftige Therapieformen streben die gezielte Einbringung von Wirkstoffen direkt in den Krankheitsherd an, sodass sich selektiv und gezielt vor Ort deren pharmakologisches Potenzial entfalten kann. Hierfür werden geeignete Träger- und Containersysteme sowie Ankeroptionen erforscht. Selektiv bindende Moleküle müssen dazu hergestellt und über molekulare Erkennung an einen Träger angekoppelt werden, der idealerweise neben seiner Containereigenschaft noch zusätzliche Funktionen erfüllt, z. B. magnetisch, thermisch oder über pH-Unterschiede ansteuerbar ist. Ziel ist es, diesen Aufbau extern zu kontrollieren und so eine grobe Positionierung und auch Freisetzung von außen vornehmen zu können. Die Transporter werden auf Basis von Lipiden, Dendrimeren, Hohlkugeln, Hydrogelen, Biopolymeren und Makromolekülen erforscht. Auch werden eine Vielzahl von Krankheitsbildern und Zielorganen untersucht, welche unterschiedliche molekulare Erkennungssysteme erfordern.

Herstellung von Nanosystemen für fluidische Anwendungen

Geißelantriebsprinzip von Bakterien

Motorproteine

Molekulare Maschinen

In der Erforschung sind kleinste Maschinen für wässrige Anwendungen, die nach bekannten Bauprinzipien hergestellt werden könnten. Der Antriebsmotor ist dabei ähnlich dem Geißelantriebsprinzip von Bakterien denkbar, jedoch extern angesteuert, die Energie erhält der Motor nach biologischen Prinzipien, wie dem ATP-ADP-Zyklus. Motorproteine, wie Myosin oder Kinesin, eingebettet in supramolekulare Umgebungen, oder auch elektrisch ansteuerbare Karbonnanotubeschichten sind aussichtsreiche Kandidaten für bewegbare Aufbauten (Schichten, Greifarme, Membranen, Transportvehikel etc.) solcher künstlicher Maschinen. Der Korpus könnte mittels Membranen konstruiert werden oder aus stückweise geglätteter DNA. Auch von Ribosomen und Enzymen erwartet man, sie als programmierbare molekulare Bauelemente in molekularen Maschinen zukünftig einsetzen zu können.



3.8 Photonik

Photonik ist die technische Beherrschung von Licht in jeder Form. Im Blickpunkt der Photonik stehen Erzeugung, Kontrolle, Messung und vor allem die Nutzung von Licht in nahezu allen gesellschaftlich und ökonomisch wichtigen Gebieten. Der Begriff „Photonik“ reflektiert dabei den Bezug zum Photon, dem Lichtteilchen, so wie der Begriff „Elektronik“ auf das Elektron verweist.

Technische
Beherrschung von
Licht in jeder Form

Das Licht besitzt eine Reihe außergewöhnlicher Eigenschaften:

- Fokussierbarkeit:
bis auf den millionsten Teil eines Millimeters (Nanometer)
- Lichtgeschwindigkeit:
die höchste erreichbare Geschwindigkeit im Universum
- Kürzeste Pulse:
bis zu einem milliardsten Teil einer milliardsten Sekunde (Attosekunde)
- Höchste Leistungen:
bis zu Milliarden von Megawatt (Petawatt)
- Ungestörte Überlagerungsfähigkeit:
bis zu Millionen von Megabit pro Sekunde (Terabit pro Sekunde)

Die Schlüsseltechnologie Photonik macht diese Eigenschaften nutzbar. Ausgehend von einer gemeinsamen technologischen Basis verbindet sie so unterschiedliche Anwendungsbereiche wie Produktionstechnik, Energie- und Beleuchtungstechnik, Medizintechnik, Umwelttechnik, Sicherheitstechnik, Plasmatechnologie, Informations- und Kommunikationstechnik sowie Instrumentierung für die Forschung. Die Beherrschung und Nutzung des Photons ist zu einem der wichtigsten Innovationstreiber für die moderne Gesellschaft und Wirtschaft geworden. Es wird erwartet, dass Photonik ein Schlüssel zu nachhaltigen Formen des Wirtschaftens sein wird.¹⁶² Photonik ist heute ein globaler, hoch dynamischer Weltmarkt mit einem Umsatzvolumen von 350 Milliarden Euro.¹⁶³ Die folgenden fünf Teilgebiete weisen eine hohe Relevanz für Forschung und Innovation bis 2030 auf: (1) Photonik für die Produktion, (2) Photonik für *Life Science* und Gesundheit, (3) Kommunikation und Information, (4) Beleuchtung und Energie, (5) *Emerging Technologies*.

Schlüsseltechnologie
Photonik

Globaler, hoch dynamischer
Weltmarkt

¹⁶² Die Definition der Photonik und die zukunftsgerichteten Aussagen dieses Kapitels stützen sich auf: Programmausschuss für das BMBF-Förderprogramm Optische Technologien (Hrsg.) (2010): *Agenda Photonik 2020*. Düsseldorf und Committee on Harnessing Light (Hrsg.) (2013): *Optics and Photonics: Essential Technologies for Our Nation*, Washington D. C., National Academies Press.

¹⁶³ Bezogen auf das Jahr 2011. VDMA, Spectaris, ZVEL, BMBF (Hrsg.): *Photonik – Branchenreport 2013*. URL: photonik.vdma.org. Abgerufen am 17.04.2014.

3.8.1 Photonik für die Produktion

Licht als Werkzeug
und
Messinstrument

Die oben genannten außergewöhnlichen Eigenschaften des Lichtes ermöglichen vielfältige Anwendungen in modernen Fertigungs- und Produktionsprozessen. Licht wird dort sowohl als Werkzeug als auch als Messinstrument eingesetzt. Zu den spezifischen Vorteilen von Licht gehört, dass Licht verschleißfrei arbeitet, flexibel ist und auch aus der Distanz auf vielfältige Weise wirken kann. So eröffnet Licht in der industriellen Fertigung einzigartige Möglichkeiten.

Lasersysteme zur
Materialbearbeitung

Die geläufigsten Anwendungen umfassen Lasersysteme zur Materialbearbeitung und Lithographiesysteme.¹⁶⁴ Die derzeit wichtigsten Laserverfahren der Materialbearbeitung sind Schneiden, Schweißen und Beschriften. Weitere Laserbearbeitungsverfahren werden bei der Herstellung von Halbleitern, Leiterplatten, Flachdisplays und Solarzellen eingesetzt. Die Lasermikrobearbeitung zur Oberflächenbehandlung ist in Deutschland ein wichtiges Anwendungsfeld in der Solar-, Halbleiter- und Medizintechnik.

CO₂- und Festkörperlaser sind häufig eingesetzte Laserstrahlquellen, wobei Festkörperlaser heute überwiegend mit Laserdioden gepumpt werden und der Resonator in der Form von Fasern, Stäben oder Scheiben vorliegt. Daneben kommen teilweise auch *Excimer*- und Diodenlaser zum Einsatz.

Lithographiesysteme

Lithographiesysteme werden hauptsächlich für die Produktion von Computer-Chips verwendet. Hier dominieren heute Systeme, die tief ultraviolette Strahlung einsetzen (DUV, *Deep Ultra Violet*) und *Excimerlaser* als Strahlquellen nutzen.

Von großem Interesse sind auch generative Verfahren, mit denen Objekte dreidimensional aufgebaut werden können; auf diese Verfahren wird im Kapitel 3.9 *Produktion* näher eingegangen.

Optische Messtechnik

Die optische Messtechnik umfasst eine Vielzahl von Anwendungen. So können optische Sensoren als Grenz- und Näherungsschalter die Anwesenheit eines Objekts nachweisen oder eine Position bestimmen und so in technischen Anlagen zu Ablaufsteuerung genutzt werden. Prozessintegrierte optische Spektrometer erfassen chemische Eigenschaften von Proben etwa in der chemischen Industrie oder bei der Abfalltrennung. Optische Messtechnik kommt in der Halbleiterindustrie zum Einsatz und wird von Betreibern faseroptischen Netzwerke genutzt. Daneben gibt es eine Vielzahl von optischen Messsystemen für geometrische Größen, z. B. Länge und Form aber auch für dynamische Größen, z. B. Schwingungen und dynamische Verformungen.

¹⁶⁴ VDMA, Spectaris, ZVEI, BMBF (Hrsg.): Photonik – Branchenreport 2013. URL: photonik.vdma.org. Abgerufen am 17.04.2014.

Von großer Bedeutung sind Bildverarbeitungssysteme, die heute vielfach in der industriellen Produktion zum Einsatz kommen, etwa in der Halbleiter- und Flachbildschirmindustrie. Hinzu kommen zunehmend häufig nicht industrielle Anwendungen bspw. in der Sicherheits- und Medizintechnik.

Bildverarbeitungssysteme

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Forschung und Entwicklung in der Photonik orientiert sich auf verschiedene Weisen an den Zielen der Nachhaltigkeit, Umweltfreundlichkeit und Ressourceneffizienz. Laser-basierte Verfahren können als umweltfreundlicher Ersatz für nasschemische Prozessschritte dienen und den Energieeinsatz in der Fertigung effizienter machen. Dazu wird an der Verbesserung des energetischen Wirkungsgrads der Laser geforscht und an der Energieeffizienz der mit dem Laser realisierten Fertigungstechnologien. Es wird angestrebt, die Energiedeposition verfahrens-, werkstoff- und bauteilspezifisch zu gestalten und zeitlich und räumlich präzise zu steuern sowie die Laserstrahlabsorption zu erhöhen. Eine wesentliche Aufgabe für Forschung und Entwicklung ist mit Blick auf die Ressourceneffizienz die Verkürzung von Prozessketten. Hier wird an massiv parallelen Verfahren mit vielen Laserstrahlen im gleichen Prozess und an der Integration verschiedener Bearbeitungsschritte in einer Maschine gearbeitet. Langfristiger Forschungsbedarf wird etwa bei Strahlformungs- und Strahlableitungseinheiten, *Remote*- und Multi-Parallel-Bearbeitungsköpfen sowie bei selektiv steuerbaren Laserstrahlquellen gesehen.

Nachhaltigkeit, Umweltfreundlichkeit und Ressourceneffizienz

Um Licht noch stärker als berührungsloses und verschleißfreies Messverfahren einsetzen zu können, ist auch die Erforschung und Entwicklung neuer Messverfahren nötig. Echtzeitfähige 3-D-Verfahren können hier zu wichtigen Treibern der Zukunft werden. Mit hochstabilen und leistungsfähigen, neuen Lichtquellen in bestimmten Wellenlängenbereichen vom Terahertz- bis zum Röntgenbereich könnten neue Potenziale besonders in prozessintegrierten, berührungslosen Sensorik-Anwendungen erschlossen werden. Zu den Anforderungen an solche, neuen optischen Sensoren gehören auch neue Kalibrierverfahren, um reproduzierbare Ergebnisse gleichbleibend hoher Qualität zu gewährleisten.

Echtzeitfähige 3-D-Verfahren

Eine exemplarische Auswahl möglicher zukünftiger Anwendungen mit hohem Potenzial zur Problemlösung bis 2030 wird in Tabelle 10 dargestellt:

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Neue Laserprozesse erweitern die Möglichkeiten bei der Werkstoffwahl	<ul style="list-style-type: none"> • alternative Leichtbauwerkstoffe für den Automobil-, Schiff- und Flugzeugbau, • artungleiche Werkstoffkombinationen für elektronische, elektrotechnische und energietechnische Anwendungen
Kognitive Laser-Maschinenteknik	<p>Laserverfahren und optische Messtechnik zur</p> <ul style="list-style-type: none"> • durchgängigen Prozesskontrolle, • Überwachung und Regelung von Strahlquellen- und Maschinenparametern, • selbstlernenden Maschinenoptimierung, • Sicherung gleichbleibender Fertigungsqualität
Massenfertigung individualisierter Produkte	neue, adaptive Fertigungs- und Anlagenkonzepte unter Verwendung intelligenter Lasernetzwerke sowie optischer Sensor- und Regelsysteme
Generative Verfahren	Schicht-für-Schicht-Aufbau von komplexen Werkstücken mittels Laser aus Rohmaterial. Es besteht die langfristige Perspektive einer weitgehend unmittelbaren Produktion von Objekten aus digitalen Daten einschließlich der Reproduktion von Objekten ausgehend von einer optischen Vermessung.

Mikro- und Nanostrukturierung	<ul style="list-style-type: none"> • Lithographie mit extrem-ultravioletter Strahlung (EUV, <i>Extreme Ultra Violet</i>) zur Realisierung weiter abnehmender Strukturgrößen bei integrierten Schaltkreisen (Nanoelektronik), • neuartige photonenbasierte Strukturierungsverfahren wie die Nahfeldlithographie oder direkt-schreibende Verfahren, • weitere Steigerung der Geschwindigkeit digitaler Drucksysteme durch <i>inkless printing</i> d. h. den Wegfall von Tonern, Druckfarben und Tinten, • farbige Beschriftung von Kunststoffbauteilen, • Schutz vor Produktpiraterie bspw. durch gedruckte zusammen mit volumenholographischen und bzw. oder fluoreszierenden Elementen
-------------------------------	---

Tabelle 10: Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Produktion

Im Folgenden werden zwei mögliche Anwendungsbeispiele aus dem Teilgebiet Photonik für die Produktion näher vorgestellt.

Neue Laserprozesse erweitern die Möglichkeiten bei der Werkstoffwahl

Zur Einsparung fossiler Brennstoffe ist der Leichtbau von Fahrzeugen in den Bereichen Automobil und Transport sowie Schiff- und Luftfahrt von hoher langfristiger Relevanz. Auch für die Erfolgchancen der Elektromobilität spielen völlig neue Fahrzeugkonzepte auf Basis von neuen Leichtbauwerkstoffen eine wesentliche Rolle. Diskutiert wird der Einsatz von Werkstoffen, etwa metallischen Schäumen, carbon- oder glasfaserverstärkten Kunststoffen und Aluminium-Kunststoff-Hybriden. Die lokale und gezielte Energiedeposition von Laserstrahlung birgt das langfristige Potenzial, hier neue Fertigungsketten zu definieren und so wichtige Beiträge zur Realisierbarkeit neuer Fahrzeugkonzepte beizusteuern.

Leichtbau von Fahrzeugen

Neue Fertigungsketten definieren

Artungleiche Werkstoffkombinationen

Um Eigenschaftskombinationen wie geringes Gewicht und hohe Festigkeit oder hohe elektrische Leitfähigkeit und hohe mechanische Härte zu ermöglichen, werden für elektronische, elektrotechnische und energie-technische Anwendungen vermehrt Werkstoffe miteinander kombiniert. So kommen zunehmend artungleiche Werkstoffkombinationen, bspw. Glas-Metall, Glas-Kunststoff, Metall-Kunststoff oder Keramik-Metall, zum Einsatz, die sich mit den etablierten Verfahren nicht oder nur ungenügend fügen lassen. Stehen keine geeigneten Fertigungstechniken zur Verfügung, ist es häufig nicht möglich, den ökologisch oder ökonomisch optimalen Werkstoff für eine gegebene Anwendung einzusetzen. Laserprozesse können aufgrund ihrer sehr selektiven Energiedeposition neue Fügeverfahren und Strukturierungstechniken bereitstellen und so die Möglichkeiten bei der Werkstoffwahl erweitern. Mit der Zunahme solcher Werkstoffkombinationen steigt auch der Bedarf an entsprechenden Recyclingverfahren, sodass ebenfalls an entsprechenden Laserverfahren und Plasmatechnologien geforscht wird.

Kognitive Laser-Maschinenteknik

Integration der Erfassung in die Fertigungsmaschine und unmittelbare Rückkopplung

In der Vergangenheit beruhten die meisten optischen Messmethoden auf einer zweidimensionalen Erfassung der Messobjekte. Zukünftig wird es darum gehen, Form und Lage auch in 3-D zu erfassen und dabei möglichst in Echtzeit, was den Einblick in die Bearbeitungsprozesse und -ergebnisse wesentlich verbessern würde. Durch direkte Integration dieser Erfassung in die Fertigungsmaschine und eine unmittelbare Rückkopplung könnte eine durchgängige Prozesskontrolle erreicht werden. Erforderliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten betreffen berührungslose optische Messmethoden zur schnellen und genauen 3-D-Bauteilvermessung im Mikro- und Nanometerbereich, zur Oberflächenprüfung und -analyse auch auf großen Flächen, zur Vermessung von Werkstoffeigenschaften und -funktionalitäten sowie zur Überwachung und Regelung von Strahlquellen- und Maschinenparametern. Zusammen mit neuen Ansätzen für eine vollständige Prozesskontrolle und für Formen der selbstlernenden Maschinoptimierung könnte es so möglich werden, ein Optimum an Prozesseffizienz und -sicherheit auch bei kleinen Stückzahlen und flexibler Produktion zu erreichen. Auf lange Sicht soll eine kognitive Laser-Maschinenteknik zur Sicherstellung gleichbleibender Fertigungsqualität entwickelt werden, die Schwankungen in der Werkstoffqualität, im Fertigungsprozess oder bedienerbedingte Einflüsse erkennt und automatisch ausgleicht. Zusätzlich erscheinen durch Formen der kognitiven Laser-Maschinenteknik auch Verbesserungen möglich hinsichtlich der Ergonomie von Arbeitsplätzen, der Reintegration des Menschen in die Produktion oder auch der Assistenz in der manuellen Einzelfertigung. Anwendungen dieser Konzepte werden u. a. in den Bereichen Energie, Elektronik, Lebensmitteltechnik, chemische Verfahrenstechnik, Biotechnologie für langfristig möglich gehalten.

Formen der selbstlernenden Maschinoptimierung

3.8.2 Photonik für *Life Science* und Gesundheit

Die Photonik ist heute ein wichtiger Bestandteil zahlreicher Verfahren im Bereich *Life Science* und Gesundheit. Die Früherkennung und Therapie von Krankheiten werden durch Anwendungen der Biophotonik-Forschung nachhaltig verbessert. Licht ist ein universelles Werkzeug mit sehr großem Anwendungspotenzial, so können mit Licht Zellen bzw. Zellverbände untersucht werden, ohne diese zu zerstören sowie Zellgewebe oder auch Implantate bearbeitet werden. Biophotonik-Produkte kommen weltweit in den Bereichen Endoskopie, minimalinvasive Chirurgie, therapeutische Lasersysteme, bildgebende diagnostische Verfahren, Mikroskopie und Laboranalytik zum Einsatz.

Biophotonik

Mikroskopische Verfahren werden schon lange für Lebendzell-Beobachtungen eingesetzt und haben sich in den letzten Jahren sehr stark weiterentwickelt und ausdifferenziert. So ermöglichen spezielle Mikroskope beispielsweise den gezielten Nachweis molekularer Funktionen in lebenden Zellen mittels spezifischer Fluoreszenz-Farbstoffe, die 3-D-Darstellung ganzer Zellverbände in Echtzeit oder aber die Darstellung von Zellstrukturen in einer Größenordnung von wenigen Nanometern. Durch das Erkennen minimaler krankhafter Gewebeveränderungen mittels bildgebender Diagnostik und durch das Verständnis der molekularen Vorgänge von Krankheiten können diese frühzeitiger und besser behandelt werden.

Mikroskopie für
Lebendzell-
Beobachtungen3-D-Darstellung
ganzer Zellverbände
in Echtzeit

Im therapeutischen und diagnostischen Bereich hat sich die minimalinvasive Chirurgie durch Operationsmikroskope und Endoskope zu einer festen Größe entwickelt. So konnten beispielsweise die Interventionsmöglichkeiten vor allem auch im Körperinneren weiter ausgebaut und die dabei entstehenden Zugangstraumata reduziert werden. Laser werden für therapeutische Zwecke unter anderem zur Korrektur von Fehlsichtigkeiten bei Augenkrankheiten oder für die Behandlung von Hautkrankheiten sowie bei der Tumorbehandlung eingesetzt. Laser dienen darüber hinaus zur präzisen Fertigung von Implantaten und künstlichen Gelenken (Hüfte, Knie etc.), sodass ihre Herstellung beschleunigt und effizient erfolgen kann. Hierbei werden unter anderem die Datensätze bildgebender Verfahren, z. B. der Computertomografie, eingesetzt um eine individuelle Fertigung dieser Implantate zu ermöglichen.

Operationsmikroskope
und Endoskope

Optische Verfahren ermöglichen eine immer schnellere Laboranalytik wie zum Beispiel DNA-Sequenzierungen verbunden mit der Identifizierung von Mutationen und Varietäten.

Laboranalytik

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Die Photonik-Forschung im Bereich *Life Science* und Gesundheit legt den Fokus auf grundlegende optische Funktionsprinzipien und optische Verfahren für Prävention, Diagnostik und Therapie. Dabei kommt der schnelleren Diagnostik, aber auch der Umsetzung von Ideen in ein medizintechnisches Produkt in Zusammenarbeit von Forschungseinrichtungen

Optische Verfahren
für Prävention, Diag-
nostik und Therapie

gen, Unternehmen sowie klinischen Anwendern einschließlich der klinischen Evaluierung der neuartigen Produkte eine große Bedeutung zu. Insofern trägt die biophotonische Forschung dazu bei, die Innovationspipeline für die Gesundheitswirtschaft zu füllen.

Ein Großteil aller Krankheiten, darunter beispielsweise Demenzerkrankungen oder AIDS, sind heute aufgrund fehlender Wirkstoffe oder Behandlungsverfahren noch nicht ursächlich therapierbar. Des Weiteren sind viele Krankheiten zu unsicher bzw. zu spät diagnostizierbar, mit der Folge, dass drei Viertel der Mittel in der globalen Gesundheitsvorsorge für die symptomatische Behandlung von Krankheitsbildern ausgegeben werden. Um vorbeugende und frühzeitige Gesundheitsmaßnahmen weiter zu ermöglichen und zu verbessern, kann die photonische *Life-Science*-Forschung mit ihren Einblicken in die Genetik und den Zellstoffwechsel einem Paradigmenwechsel Vorschub leisten. Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele mit hohem Potenzial bis 2030 werden in Tabelle 11 dargestellt.

Anwendungsbereich	Anwendungsbeispiele
Schnelltests und Vor-Ort-Analytik	<ul style="list-style-type: none"> • Mikrolabore auf Basis photonischer Technologien stellen kontinuierlich alle wichtigen Daten über den Gesundheitszustand z. B. älterer Menschen bereit, • Diagnostik von Infektionen
Bildgebende diagnostische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Diagnostik und Therapiekontrolle von Hauttumoren und ihren Vorstufen sowie von allergischen und entzündlichen Hauterkrankungen, • Navigation und Monitoring bei Operationen, • Biomarker zur Früherkennung von Krankheiten, • Photoakustik

Optogenetik ¹⁶⁵	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung in den Neurowissenschaften, wobei Neuronen in lebenden Organismen genetisch so programmiert werden, dass sie durch Einstrahlung von Licht gezielt aktiviert und deaktiviert werden und ihr jeweiliger Zustand durch Fluoreszenzmessungen überwacht werden kann. Dadurch lassen sich neurale Schaltkreise in lebenden, aktiven Tieren modifizieren und untersuchen.
Plasmamedizin	<ul style="list-style-type: none"> • Wundbehandlung, • antimikrobiell wirksame Oberflächen etwa von Implantaten, Stents und Kathetern, • selektive Kultivierung bzw. Anhaftung von Körperzellen auf Oberflächen, • Dekontamination und Sterilisation, Aufbereitung von Medizinprodukten
Photonische Theragnostik – Verschmelzung von photonischer Diagnose und Therapie	<ul style="list-style-type: none"> • Orthopädie, Zahnmedizin, plastische Chirurgie und Kardiologie, • Zahnmedizin: Entfernung von Karies, Schutz des Nervenkanals während der Setzung von Implantatbohrungen, • Optische Biopsieverfahren zur Optimierung und Minimierung invasiver Eingriffe, • Endoskopische Theragnostik

¹⁶⁵ Lin, S. C. et al.(2011): Optogenetics: Background and Concepts for Neurosurgery. In: Neurosurgery, Bd. 69, S. 1-3; „Optogenetics is the combination of genetic and optical methods to achieve gain or loss of function of well-defined events in specific cells of living tissue.“

Optische Methoden der DNA-Sequenzierung	• Gendiagnostik
---	-----------------

Tabelle 11: Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele von Photonik im Bereich *Life Science* und Gesundheit

Schnelltests und Vor-Ort-Analytik

Gesundheit, Wellness,
Umwelt und
Lebensmittel

Point of Care

Die Vor-Ort-Analytik spielt insbesondere in den Bereichen Gesundheit, Wellness, Umwelt und Lebensmittel eine wichtige Rolle. Im Gesundheitswesen werden hier Anwendungen in Form handlicher Testgeräte sowohl unter dem Begriff *Point of Care* (POC) für Kliniken und Praxen zusammengefasst als auch Lösungen für den Heimbereich anvisiert. POC-Geräte müssen zuverlässig und schnell Analysen von minimalen Mengen leicht zu gewinnender Proben, z. B. Gasen, Flüssigkeiten oder Körperflüssigkeiten, vornehmen. Im Idealfall erfolgt die gesamte Probenvorbereitung, etwa die Ab- oder Auftrennung der Bestandteile, komplett im Gerät selbst. Zum Probehandling und zur Probenaufbereitung kommt hier der Mikrofluidik – neben fortgeschrittenen und weiter miniaturisierten optischen Analysemethoden – eine besondere Bedeutung zu.

Als Nachweismethoden sind unterschiedliche optische Techniken geeignet, z. B. klassische Fluoreszenzmethoden, die die Verwendung von Labels erfordern, labelfreie optische und spektroskopische Methoden, beispielsweise die Oberflächenplasmonenresonanz, interferometrische Methoden oder die oberflächenverstärkte Raman-Spektroskopie.

Kontaminationsfreie
Analytik

Aufgrund der berührungslosen Arbeitsweise sind photonische Sensorverfahren besonders geeignet, die geforderte kontaminationsfreie Analytik für derartige Systeme zur Verfügung zu stellen. Dabei können optische Methoden durch nicht optische Methoden, beispielsweise elektrische und akustische, ergänzt werden.

Implantierbare
Mikrolabore

In Zukunft könnten beispielsweise implantierbare Mikrolabore, deren Grundlage photonische Technologien sind, kontinuierlich alle wichtigen Daten über den Gesundheitszustand z. B. älterer Menschen liefern.

Bildgebende diagnostische Verfahren

Für Anwendungen im Bereich der bildgebenden diagnostischen Verfahren sind eine ganz Bandbreite an Technologien wichtige Forschungsthemen der Zukunft und dementsprechend von hoher langfristiger Relevanz:

Diese umfassen kohärente Verfahren, hyperspektrale Bildgebung, OCT¹⁶⁶, Mehrwellenlängenverfahren, 2-Photonen-Spektroskopie und -mikroskopie sowie markerfreie Verfahren wie CARS¹⁶⁷ und SERS¹⁶⁸.

¹⁶⁶ OCT – Optische Kohärenz Tomographie.

¹⁶⁷ CARS – Kohärente Anti-Stokes-Raman-Streuung.

¹⁶⁸ SERS – Stimulierte Anti-Stokes-Raman-Streuung.

Des Weiteren sind Fortschritte bei vielen diagnostischen Anwendungen zu erwarten, die durch adaptive Optiken und Verfahren zur strukturellen Beleuchtung vorangetrieben werden. Fluoreszenzbasierte Verfahren, wie etwa *Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy (FLIM)*, *Fluorescence Resonance Energy Transfer (FRET)* oder *Fluorescence Correlation Spectroscopy (FCS)* sind neben multimodalen Verfahren und multimodaler Endoskopie bedeutende Zukunftsthemen der Forschung. Ein Beispiel dafür ist die Theragnostik, also die Kombination von präziser diagnostischer Bildgebung und Therapie. Die Möglichkeiten der Theragnostik können durch photonische Ansätze noch erweitert werden. Technologische Herausforderungen ergeben sich hier vor allem bei den spektroskopischen Systemen, die hinsichtlich ihrer Nachweisempfindlichkeit um Größenordnungen verbessert werden müssen. Hoher Forschungsbedarf verknüpft mit großen Chancen werden in den Bereichen der 3-D-Mikroskopie, der Lichtquellen und Bildsensoren sowie in der Reduktion und Auswertung von Bilddaten gesehen. Schließlich ist auch die Erforschung von Biomarkern von hoher langfristiger Bedeutung. Hier stehen vor allem photonisch aktive Label wie Fluoreszenz-, metallische Nanopartikel- und Raman-Label im Mittelpunkt des Interesses. Die gezielte Verzahnung von Markern und Nachweisverfahren wird als besonders aussichtsreich betrachtet. Biomarker könnten so einen Schlüssel für die Früherkennung von Krankheiten darstellen und den Ausgangspunkt bilden für neue photonische Vorsorge-Untersuchungen und die Realisierung einer neuen Form von Vorsorgemedizin bis hin zu einer vorsorgebasierten, personalisierten Medizin.

Fluoreszenzbasierte
Verfahren

Theragnostik

Vorsorgebasierte,
personalisierte
Medizin

Solche bildgebenden diagnostischen Verfahren werden bei Augenerkrankungen, neurodegenerativen Erkrankungen, Hautkrankheiten, Krebs, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Sepsis zukünftig noch intensiver zur Anwendung kommen. Auge, Haut und intrakorporale Schleimhaut werden dabei in den Mittelpunkt des Einsatzes von optischen Technologien rücken. Zur Untersuchung der Haut werden sowohl markerfreie In-vivo-Verfahren, wie CARS, SERS oder Fluoreszenzdiagnostik, als auch spektrale Verfahren eine langfristige Aufgabe der Technologieentwicklungen sein. Hautkrankheiten, etwa Hauttumore und ihre Vorstufen, allergische und entzündliche Hauterkrankungen sowie Pigment- und Wundheilstörungen nehmen kontinuierlich zu, sodass eine wirksamere Diagnostik und geeignete Therapiekontrollen notwendig werden. Für eine bessere Diagnostik und Therapiekontrolle sind verbesserte Gewebeuntersuchungen in der Pathologie und mehrdimensionale Aufnahmen von Geweboberflächen aus dem Körperinneren nötig.

Auge, Haut und
infrakorporale
Schleimhaut

Navigation und Monitoring bei Operationen erfordern eine hohe Sensitivität und vor allem eine hohe Spezifität. So kommt es bei der operativen Entfernung von Tumoren sehr darauf an, den Tumor vollständig zu entfernen und gleichzeitig die Integrität und Funktion des umgebenden Gewebes möglichst vollständig zu erhalten. Damit Verfahren generell „in

Navigation und
Monitoring bei
Operationen

vivo“ einsetzbar werden, wird sowohl an morphologisch-strukturellen (anatomischen) als auch an funktionellen, d. h. auf die Körperfunktionen bezogenen, bildgebenden Verfahren geforscht. Um sowohl eine Extraktion als auch Aggregation wichtiger Informationen zu gewährleisten, ist neben einer verbesserten Eindringtiefe und multiparametrischer optischer Analysen insbesondere die Integration verschiedener Ebenen (*Multi Layer Modeling*) wichtig. Des Weiteren kommt es darauf an, bildgebende Verfahren, die mit sehr unterschiedlichen räumlichen Auflösungen arbeiten, miteinander zu verschmelzen und so die Nano-, Mikro- und Makroebenen zu verknüpfen.

Plasmamedizin

Anwendungen von
technisch erzeugten
Plasmen im Bereich
der Medizin

Unter Plasmamedizin werden Anwendungen von technisch erzeugten Plasmen im Bereich der Medizin verstanden, etwa die Plasma-Oberflächenmodifizierung sowie die Plasmasterilisation und -dekontamination.

Plasma-Behandlung
zur Funktionalisie-
rung von Oberflächen

Durch die Plasmamedizin eröffnen sich möglicherweise neue, schonende Therapien, z. B. bei der Wundheilung, bei entzündlichen und/oder infektiösen Erkrankungen von Haut und Schleimhaut sowie bei Krebserkrankungen. Neben diesen klinischen Anwendungen ermöglicht die Plasmamedizin auch neue Medizinprodukte. Durch Plasma-Behandlung können Oberflächen etwa von Implantaten, Stents und Kathetern funktionalisiert oder antimikrobiell wirksam gemacht werden. Solche Oberflächen können auch im Rahmen regenerativer Therapien eingesetzt werden. Sie dienen hier zur selektiven und kontrollierten Kultivierung bzw. Anhaftung von Körperzellen oder zur kontrollierten Freisetzung von Medikamenten.

Dekontamination und
Sterilisation

Ein eigener Anwendungsbereich ist die Dekontamination und Sterilisation. Hierbei ist insbesondere die schnelle und zuverlässige Vor-Ort-Desinfektion von Instrumenten, Geräten und Oberflächen einschließlich Körperoberflächen interessant, da hier neue Wege zur effektiven Infektionsprävention eröffnet werden. Des Weiteren ermöglichen Plasmaverfahren es, Schutzschichten auf Medizinprodukte aufzubringen, wodurch deren Zyklenfestigkeit in der Aufbereitung z. B. gegenüber alkalischen Reinigungsmitteln deutlich erhöht wird.

3.8.3 Kommunikation und Information

Optische Netze

Photonische Kommunikationsnetze bilden das Rückgrat der heutigen vernetzten Wissensgesellschaft. Für das Telefonieren, das Versenden von E-Mails oder die Nutzung des Internets kommen stets optische Netze zum Einsatz, um die erforderlichen Daten zu übertragen. Auch für die Kommunikation von Maschine-zu-Maschine sind optische Netze wesentlich. Dies gilt für die Verbindung von Servern im Rechenzentrum ebenso wie für die Vernetzung von Systemkomponenten im Auto, Flugzeug oder Schiff.

Die Telekommunikation bildet dabei das größte Anwendungsgebiet¹⁶⁹ mit den Teilgebieten der Fernübertragung (zwischen großen Städten), des Metrobereichs (innerhalb von Städten) und des Accessbereichs.¹⁷⁰ Im Fern- und Metrobereich ist die optische Übertragungstechnik heute Standard. Kupferkabel dominieren dagegen noch im Accessbereich, wobei die wachsende Verbreitung optischer Fasertechnologie je nach Land sehr verschieden ist. Zwar ist eine Diskussion entstanden, ob mobiles Internet nach dem LTE-Standard¹⁷¹ FTTH überflüssig machen könnte, weil die Installation von LTE geringere Investitionen erfordert als FTTH. Gleichwohl ist sicher davon auszugehen, dass die stark steigenden Datenraten einen weiteren Ausbau der Glasfaserübertragungstechnik erfordern werden, was sich etwa daran zeigt, dass einzelne Netzbetreiber mittlerweile nicht nur Mobilfunkmasten, sondern auch einzelne Antennen mit einer Glasfaseranbindung ausstatten.

Fernübertragung
Metrobereich
Accessbereich

Der Bereich der optischen Informationstechnik umfasst optische Anwendungen in der Konsumelektronik, Büroautomation und Drucktechnik. Digitalkameras bilden hier das größte Segment. Dazu kommen optische Laufwerke, Drucker und Scanner. Der Bereich der Informationsvisualisierung umfasst Bildschirme in Form von Fernsehgeräten, Computer-Monitoren und in mobilen elektronischen Geräten wie Notebooks, Tablets, Smartphones und Navigationssystemen. Technologisch überwiegen die Flüssigkristall-Bildschirme, gefolgt von den Plasma- und OLED-Displays.¹⁷²

Optische
Informationstechnik

Informations-
visualisierung

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Der Internet-Verkehr wird Schätzungen zufolge allein bis zum Jahr 2020 global um einen Faktor 50 ansteigen. Um diesen Anstieg zu bewältigen, ist es zukünftig nötig, freie Netzkapazitäten besser zu nutzen und die Netzarchitektur effizienter zu gestalten. Letztlich sind auch Systeme mit größeren Übertragungskapazitäten nötig, weil selbst die Glasfaser mit zunehmenden Datenraten an Kapazitätsgrenzen stößt. Hier werden neue Ansätze und Innovationen erforderlich. Dabei muss auch die Energieeffizienz berücksichtigt und verbessert werden. Konkret wird erwartet, dass bei Datenraten von 1 Gb/s pro Nutzer im Accessbereich Datenraten von 400 Gb/s bis 1 Tb/s je Kanal im Metro- bzw. Kernnetz bereitzustellen sind. In Datencentern und im Bereich der Maschine-zu-Maschine-Kommunikation werden ähnlich starke Anstiege im Datenverkehr erwartet.

Anstieg des Internet-
Verkehrs

¹⁶⁹ Zu den folgenden beiden Abschnitten: VDMA, Spectaris, ZVEI, BMBF (Hrsg.): Photonik – Branchenreport 2013. URL: photonik.vdma.org. Abgerufen am 17.04.2014.

¹⁷⁰ Umfasst die Bereiche *Fiber-To-The-Node* (FTTN), *Fiber-To-The-Building* (FTTB) und *Fiber-To-The-Home* (FTTH).

¹⁷¹ LTE - *Long Term Evolution*.

¹⁷² OLED – *Organic Light Emitting Diode* – Organische Leuchtdiode.

Entwicklung einer integrierten Photonik

Bei der Verbreitung von kabelgebundenen Telekommunikationsanschlüssen wird mit einer langfristig hohen Dynamik gerechnet, wenn flächendeckend Glasfaserverbindungen bis zum Endnutzer verfügbar gemacht werden sollen. Es wird erwartet, dass daraus ein hoher Kostendruck entsteht, der mittel- bis langfristig zur Entwicklung einer integrierten Photonik führen wird – entsprechend des Übergangs von einer Elektronik, die aus Einzelkomponenten aufgebaut ist, hin zur Mikroelektronik integrierter Schaltkreise. In der Konsequenz wird damit gerechnet, dass es zur Konvergenz elektronischer und photonischer Funktionen kommen wird.

Wandel bei den Benutzeroberflächen von IT-Endgeräten

Außerdem ist zu beobachten, dass gegenwärtig ein Wandel bei den Benutzeroberflächen von IT-Endgeräten im Gang ist, der von photonischen Technologien getrieben wird, mit dem Aufkommen von *Touchscreens* gerade erst begonnen hat und langfristig zu einer zunehmenden Bedeutung von 3-D-Technologien führen wird. Im Zusammenhang mit diesem Wandel der Mensch-Maschine-Schnittstelle ist davon auszugehen, dass Anwendungen im Bereich der Bilderfassung, -verarbeitung und -darstellung in Zukunft ein rapides Wachstum zeigen werden.

Eine exemplarische Auswahl möglicher zukünftiger Anwendungen mit hohem Potenzial zur Problemlösung bis 2030 wird in Tabelle 12 dargestellt:

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Photonische Kommunikationsnetze	<ul style="list-style-type: none"> • schnelle Glasfasernetze für Videokonferenzen mit hoher Bildqualität und Telearbeit sowie für die Übertragung von Filmen mit hoher Auflösung und/oder mit 3-D-Darstellung in der Freizeit, • optische Netze für <i>Smart Energy</i>-, <i>Smart Grid</i>- und <i>Smart Metering</i>-Anwendungen, • photonische Netze für effiziente hochbitratige Maschine-zu-Maschine-Kommunikation in Produktion und Logistik, • photonische Netze für die Breitband-Anbindung von Mobilfunk-Basisstationen an das Kernnetz,

	<ul style="list-style-type: none">• weiträumige Verbindung von Kameras oder Sensoren an Leitzentralen für Telematik-Anwendungen,• optische Bordnetze in Verkehrsmitteln für den schnellen Austausch von Steuerungs-, Sicherheits- und Kommunikationsdaten,• photonische Netze für <i>Smart Home</i>- und <i>Smart City</i>-Anwendungen
Konvergenz von Photonik und Elektronik	<ul style="list-style-type: none">• optische <i>Interconnects</i> sind Voraussetzung für neue Generationen leistungsfähiger und energieeffizienter Supercomputer,• durch die Nutzung der Silizium Photonik für die Datenkommunikation begegnen große Rechenzentren und Serverfarmen höchsten Anforderungen an Datenraten und Energieeffizienz,• rechenintensive Anwendungen wie Bild- und Spracherkennung, die mittels integrierter Mikroptonik auf tragbaren Endgeräten realisiert werden, können helfen, Menschen mit eingeschränkter Wahrnehmungsfähigkeit mobiler und unabhängiger zu machen,• hochintegrierte photonische Sensoren können personalisierte Rohdaten für medizinische Ferndiagnosen bereitstellen

Bilderfassung und Visualisierung	<ul style="list-style-type: none"> • Mobilität: Bilderfassung und -verarbeitung als Grundlage für Assistenzsysteme in Fahrzeugen, • Sicherheit: teilautomatisierte und automatisierte Bilderfassung und -analyse zur schnellen Erkennung von Gefahren, Analyse von „Menschenströmen“, • Kommunikation: neue Mensch-Maschine-Schnittstellen ermöglichen komplexere Interaktionen mit (mobilen) IKT-Geräten bspw. durch Gestenerkennung oder neue Visualisierungsformen wie z. B. 3-D-Darstellungen, • Unterhaltung: zunehmende Bedeutung von 3-D-Projektionen und von mobilen Geräten
----------------------------------	--

Tabelle 12: Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Information und Kommunikation

Im Folgenden werden die drei Anwendungsbereiche aus dem Teilgebiet Photonik für Kommunikation und Information näher vorgestellt.

Photonische Kommunikationsnetze

Optische Heimnetze
Energieinformations-
oder Sensornetze
Netze zur Verwaltung
von Krankenakten

Aus Gründen der Sicherheit, Leistungsfähigkeit oder auch aus Kostengründen sind für neue Anwendungen oftmals eigene Netze nötig. Um zukünftig optische Heimnetze zu realisieren, wird standardisierte und leicht verwendbare Massenmarkt-Technik erforderlich sein, die sich von der Technik, die Netzbetreiber einsetzen, grundlegend unterscheiden wird. Für Energieinformations- oder Sensornetze der Zukunft wird es entscheidend sein, dass sie eine sehr hohe Zahl einzelner, kleinerer Datenströme mit hoher Zuverlässigkeit und wenig Verzögerung übermitteln können. Im Gegensatz dazu müssen Netze zur Verwaltung von Krankenakten auf Abruf große Bandbreiten bereitstellen können. Innerhalb von Datacentern, die mit dem Wachstum des *Cloud Computing* langfristig immer wichtiger werden, werden optische Kabel mit Datenraten im Bereich von Tb/s, *Chip-to-Chip-Interconnects* und *On Chip-Photonik* zum Einsatz kommen. Die „Datenautobahnen“ der Zukunft brauchen flexible, energieeffiziente, skalierbare Netze mit offenem Zugang. Insofern wer-

den für alle diese Anwendungsformen dezidierte Netz-, System- und Komponententechnologien benötigt.

Konvergenz von Photonik und Elektronik

In der Informationsverarbeitung kommen zunehmend prinzipielle, physikalisch bedingte Schranken für das Wachstum der Taktfrequenz einzelner Computerchips zum Tragen. Dies hat in den letzten Jahren zur Verbreitung von Mehrkernprozessoren geführt, woraus wiederum ein Bedarf an hohen Datenübertragungskapazitäten zwischen den verschiedenen Kernen erwachsen ist. Diesem Bedarf werden zukünftig nur integrierte photonische Übertragungstechnologien gerecht werden. Mittel- bis langfristig sollen auch *Intra-Chip-Interconnects* optisch funktionieren bis hin zu einer vollständig optischen Verschaltung in einem gemeinsamen Chip mit der Elektronik.

Mehrkernprozessoren mit Bedarf an hohen Datenübertragungskapazitäten

Langfristig wird damit gerechnet, dass dieser Entwicklungsdruck zu einem Paradigmenwechsel in der Mikrophotonik führen wird: Es werden signifikant mehr optische Kommunikationselemente gebraucht und die Kosten dieser Elemente müssen um eine Größenordnung sinken. Um dies zu erreichen wird darauf gesetzt, Design- und Herstellmethoden der Elektronik für die Photonik zu adaptieren. Die daraus resultierende Konvergenz von Photonik und Elektronik wird ein wesentlicher Faktor für die langfristige Entwicklung der Photonik sein.

Paradigmenwechsel in der Mikrophotonik

Eine solche Entwicklung der Mikrophotonik könnte bspw. auch auf die optische Sensorik und Messtechnik zurückwirken. So könnten zukünftig integrierte mikrophotonische Anwendungen möglich werden, etwa miniaturisierte Sensor-Arrays für die Labordiagnostik, die personalisierte Rohdaten für medizinische Ferndiagnosen bereitstellen.

Bilderfassung und Visualisierung

Die Bilderfassung wird künftig über die etablierten flächigen Abbildungen weit hinausgehen. Langfristig werden neue Anwendungen entstehen, die zusätzliche Informationen nutzen, damit Entscheidungsgrundlagen verbessert, automatisierte oder teilautomatisierte Prozesse angestoßen und geregelt werden können. Auch sollen Bilderfassung und Visualisierung in Zukunft mobiler und energieeffizienter werden. Außerdem sollen die Bildsensoren intelligenter werden, d. h. die Sensoren sollen sich idealerweise selbst zu Netzen konfigurieren können, etwa im Sicherheitsbereich zur schnellen Erkennung von Gefahren. Um solche Anwendungen zu realisieren, wird u. a. an automatisierten Formen der Bildaufnahme, der Integration bzw. der Datenfusion verschiedener Bildgebungsverfahren sowie an 3-D-Bilderfassungstechniken geforscht. Im Bereich der Komponenten wird u. a. an hocheffizienten Lichtquellen, Laser- oder LED-basiert, an Kameras und Projektoren auf Wafer-Level sowie Bildgeber-Sensor-Kombinationen gearbeitet.

Automatisierte Formen der Bildaufnahme, der Integration bzw. der Datenfusion

3-D-Darstellungen und 3-D-Projektionen immer wichtiger

IT-Geräte werden in Zukunft wahrscheinlich völlig anders bedient als heute. Es wird erwartet, dass Gestensteuerung sowie die Navigation in 3-D-Darstellungen und 3-D-Projektionen immer wichtiger werden und dadurch die Interaktion mit Technik, Maschinen und Robotern immer natürlicher werden wird. Solche Ansätze beruhen auf digitalen optischen Informationen, die auch bei der Informationsvisualisierung in augmentierter und virtueller Realität etwa beim sogenannten *ray tracing* zum Tragen kommen. Um diese Vorstellungen wirklich werden zu lassen, wird bspw. an Systemen geforscht, die für die Trennung von Hinter- und Vordergrund Kameras mit Infrarotlasern und -sensoren für die Tiefeninformation kombinieren. Große Bedeutung wird auch zukünftigen Formen der *Near-to-eye*- und *Head-up*-Projektion beigemessen.

3.8.4 Beleuchtung und Energie

Beleuchtung

Einsatzmöglichkeiten
von LEDs

Die noch weit verbreiteten Glüh- und Gasentladungslampen erhalten immer stärkere Konkurrenz durch Halbleiterlichtquellen. Unter Halbleiterlichtquellen für die Beleuchtung versteht man LED (Leuchtdioden) und organische LED (OLED), die auf der Elektrolumineszenz anorganischer bzw. organischer Halbleiter basieren.

In den letzten zehn Jahren konnte die Effizienz- und Helligkeit von LEDs so gesteigert werden, dass nahezu jede Applikation im Bereich der Beleuchtung adressiert werden kann. Die Einsatzmöglichkeiten von LEDs reichen heute von der Mobilfunktechnologie über die Automobilindustrie bis hin zu Anwendungen in der Unterhaltungsindustrie in Form von LCD Bildschirmen in Laptops und Fernsehern mit LED-Hintergrundbeleuchtung.

Die Verfügbarkeit neuer Lichttechnologien zusammen mit der politischen Vorgabe der EU Kommission, schrittweise auf klassische Glühlampen zu verzichten, werden den Bereich der Allgemeinbeleuchtung grundlegend verändern.

Energie

Photovoltaik

Erneuerbare Energien bieten die Chance, dem Klimawandel und der zunehmenden Ressourcenknappheit entgegenzuwirken. Hierbei wird die Photovoltaik (PV) einen zentralen Stellenwert für den zukünftigen Strom-Mix in Deutschland einnehmen und kann so zu einem Schlüssel für den *Green Switch* in der Energietechnik werden. Schätzungen zufolge könnten bis zum Jahr 2030 rund 20% des deutschen Strombedarfs durch Solarstrom gedeckt werden. Bereits im Jahr 2011 wurden weltweit Solarzellen mit einer Gesamtleistung von 37,2 GW hergestellt. Hierbei sind Module mit kristallinen Si-Solarzellen die führende PV-Technologie.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Das digitale Licht der LED- und OLED-Technologie führt zu einem Paradigmenwechsel in der modernen Lichttechnik. Die Halbleiterlichtquellen kombinieren hohe Energieeffizienz, mit einer großen Farbvielfalt, mit Brillanz, einer langen Lebensdauer und ermöglichen neue Lichtdesigns. Während heute noch knapp 20% des weltweiten Stromverbrauchs für die Allgemeinbeleuchtung anfällt, wird geschätzt, dass künftig mit intelligent gesteuerten LED-Lichtquellen bis zu zwei Drittel dieser Energie eingespart werden könnte. Voraussetzung dafür ist die weitere Verbesserung der LED- und OLED-Komponenten selbst sowie von allen Systemkomponenten, bspw. der Ansteuerelektronik, der Kühlung und des Gehäuses. Es wird erwartet, dass sich intelligent vernetzte Lichtlösungen durchsetzen und Mikroelektronik und Photonik dadurch eng zusammenwachsen. Darüber hinaus können auch Laserlichtquellen neben den Projektionsanwendungen für die Beleuchtung von Interesse sein.

Die Stromerzeugung mittels Photovoltaik unterliegt derzeit einem sehr hohen Preisdruck, der sich auch aus der internationalen Konkurrenzsituation ergibt. Daraus entsteht ein als langfristig relevant anzunehmender Forschungs- und Entwicklungsdruck, der auf die Steigerung der Effizienz der Solarzellen und der Effektivität ihrer Fertigung zielt. Die Photonik-Forschung kann hier wichtige Beiträge leisten.

Eine exemplarische Auswahl möglicher zukünftiger Anwendungen mit hohem Potenzial zur Problemlösung bis 2030 wird in Tabelle 13 dargestellt:

Paradigmenwechsel in der modernen Lichttechnik durch das digitale Licht der LED- und OLED-Technologie

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
LED, Laser und OLED	<ul style="list-style-type: none"> • intelligente, vernetzte Steuerung des Lichts bzgl. Helligkeit, Lichtfarbe und Lichtrichtung, • physiologisch und biologisch wirksame Beleuchtung, • OLED in Glasscheiben, • Kombination von Beleuchtung und Energieversorgung, Gebäudetechnologie und dem Internet der Dinge

Photovoltaik	<ul style="list-style-type: none"> • PV-Module auf Basis kristallinen Siliziums, • Dünnschicht-PV-Module, • hocheffiziente Mehrfach-Solarzellen für die Konzentration-PV, • organische Solarzellen
--------------	--

Tabelle 13: Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Beleuchtung und Energie

Im Folgenden werden mögliche Anwendungsbeispiele aus dem Teilgebiet Beleuchtung vorgestellt.

LED, Laser und OLED

Verbreitung intelligenter Lichtsteuerungssysteme

Die Verbreitung von LED, Lasern und OLED als Lichtquellen wird langfristig auch die Verbreitung intelligenter Lichtsteuerungssysteme mit sich bringen. So können Halbleiterlichtquellen in Zukunft höhere Funktionalitäten bieten wie etwa Helligkeitsvariationen und Farbwechsel sowie eine intelligente Ansteuerung.

Im Bereich der Automobilbeleuchtung und ggf. auch der Allgemeinbeleuchtung werden Laserlichtquellen künftig eine Rolle spielen, die aufgrund ihrer hohen Leuchtdichte Vorteile aufweisen.

Intelligent vernetzte Lichtlösungen

Intelligent vernetzte Lichtlösungen in Kombination mit Sensornetzwerken und Anbindung an das Internet der Dinge können das Licht maßschneidern und an die Bedürfnisse des Menschen anpassen. Beispielsweise lässt sich Licht zu Hause über das Mobiltelefon steuern, ist mit der Gebäudetechnologie vernetzt, um den Energieverbrauch in Echtzeit zu optimieren, und Straßenleuchten können als Knotenpunkt der Kommunikation auch die Verkehrsführung steuern.

Lichtwirkung auf die Gesundheit des Menschen

Die Lichtwirkung auf die Gesundheit des Menschen steht erst am Anfang der Forschung. Es wird daran gearbeitet, physiologische und biologische Aspekte des Lichts besser zu verstehen und das Licht durch intelligente Ansteuerung den physiologischen Bedürfnissen des Menschen besser anzupassen. So kann beispielsweise heute schon nachweislich der Schlafrhythmus von älteren Menschen verbessert werden; eine positive Wirkung auf Krankheiten, beispielsweise Demenz, wird vermutet bedarf aber weiterer Studien.

OLEDs bringen für die Zukunft noch weitere Gestaltungsmöglichkeiten in der Allgemeinbeleuchtung sowie der Automobilbeleuchtung. Weil OLED-Lichtfolien transparent ausgelegt werden können, könnten sie mit Glasscheiben verbunden werden. Auch ist eine Kombination mit der organischen Photovoltaik möglich, woraus sich die Möglichkeit ergibt, Beleuchtung und Energieversorgung zu kombinieren. Im Bereich der OLED werden starke Synergien mit anderen Gebieten der organischen Elektronik erwartet.

OLEDs bringen weitere Gestaltungsmöglichkeiten

3.8.5 *Emerging Technologies*

Unter dem Begriff *Emerging Technologies* werden optische Wirkprinzipien zusammengefasst, die bezogen auf den aktuellen Stand der Technik völlig oder weitgehend neu sind und zumindest langfristig das Potenzial aufweisen, in eine industrielle Anwendung überführt zu werden. Mit der Quantenoptik und den maßgeschneiderten photonischen Materialien gibt es in der Photonik-Forschung zwei Bereiche, die diese Kriterien in beispielhafter Weise erfüllen. Beide Bereiche könnten völlig neue Anwendungen hervorbringen und so Ansätze einer disruptiven Technologieentwicklung darstellen.

Völlig oder weitgehend neue optische Wirkprinzipien

Darüber hinaus gibt es in der photonischen Grundlagenforschung weitere Bereiche, z. B. die relativistische und nicht lineare Optik, Höchstfeldlaser, Freie-Elektronen Röntgenlaser oder Laserfusion, aus denen weitere *Emerging Technologies* hervorgehen könnten.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Quantenoptik untersucht und nutzt die quantenmechanische Natur von Licht und Materie, um neuartige, als exotisch bezeichnete Zustände zu erzeugen und zu manipulieren. Beispiele für solche Zustände, die heute in Forschungslabors routinemäßig erzeugt werden können, sind Bose-Einstein-Kondensate und verschränkte Photonen. Für eine mögliche technische Umsetzung der Ideen und Konzepte der Quantenoptik in Anwendungen müssen sich diese Quantenzustände mit kommerzialisierbaren Komponenten und Aufbauten in ausreichender Qualität erzeugen, stabilisieren und manipulieren lassen.

Quantenoptik

Photonische Mikro- und Nanomaterialien wird das Potenzial zugeschrieben, die Photonik revolutionieren. Mit diesen Materialien lässt sich die Licht-Materie-Wechselwirkung weitgehend unabhängig von den optischen Eigenschaften natürlicher Materie gezielt einstellen und verändern. Dadurch rücken photonische Bauelemente in greifbare Nähe, die bessere oder ganz neue Funktionalitäten sowie ein völlig neues Maß an Integration und Miniaturisierung erlauben. Damit werden neue hochintegrierte Lösungen denkbar, die ohne die bislang oft übliche Manufaktur und aufwendige Systemjustage auskommen.

Photonische Mikro- und Nanomaterialien

Eine exemplarische Auswahl möglicher zukünftiger Anwendungen mit hohem Potenzial zur Problemlösung bis 2030 wird in Tabelle 14 dargestellt:

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Quantenoptik	<ul style="list-style-type: none"> • ultrapräzise Sensorik: z. B. ultrapräzisen Messung der Gravitation zur Erkundung von Lagerstätten von Bodenschätzen, • Quantenkommunikation: Kryptografie mit Quantenschlüsselverteilung zur abhörsicheren Übertragung von Daten, • Quanten-Zufallszahlengeneratoren zur Erzeugung von absolut zufälligen Zahlenfolgen zur Nutzung in der klassischen Verschlüsselung, • Quantenbildgebung mit neuen Anwendungen in Mikroskopie, Bilderkennung und optischer Datenspeicherung, • Quantenrechner und Quantensimulatoren zur Entwicklung, zum Test und zur Produktion neuartiger Materialien und pharmazeutischer Wirkstoffe
Maßgeschneiderte photonische Materialien	<ul style="list-style-type: none"> • nanostrukturierte Metalle zur optischen Datenübertragung auf zukünftigen Hochgeschwindigkeits-Chips, • plasmonische Nanostrukturen und neuartige Nanobeschichtungen zur Verbesserung von Solarzellen, Photodektoren, Leuchtdioden und Halbleiterlasern, • plasmonische Nanolaser als

	<p>kleinste Quellen kohärenten Lichts für die Mikroskopie subzellulärer Strukturen in der Biologie,</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gas- und Flüssigkeitssensorik mit wesentlich höherer Empfindlichkeit und Selektivität für die Sicherheitstechnologie und die Medizintechnik, • Metall-Nanoshells zur Krebstherapie, • „passive“ photonische Nanostrukturen als Sicherheitsmerkmale, als Marker und Label (anstelle von Farbstoffen) oder auch als Filterelemente
--	--

Tabelle 14: Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich *Emerging Technologies*

Im Folgenden werden diese Anwendungsbeispiele aus dem Teilgebiet *Emerging Technologies* näher vorgestellt.

Quantenoptik

Verschränkte Quantenzustände können z. T. so gestaltet werden, dass sie bestimmten Störeinflüssen gegenüber unempfindlich sind, zugleich aber eine sehr hohe Empfindlichkeit für die zu untersuchende Messgröße aufweisen, wodurch neue Formen der ultrapräzisen Sensorik möglich werden. Die Vorteile verschränkungsbasierter Sensoren im Vergleich zu konventionellen Messungen konnten im Labor bereits demonstriert werden. Die Empfindlichkeit der ultrapräzisen Sensorik kann dabei klassische Grenzen überwinden. Anwendungsmöglichkeiten umfassen u. a. präzisere Messinstrumente, medizinische Diagnostik, Umweltanalytik oder die Rohstoff-Exploration.

Ultrapräzise Sensorik

Im Bereich der Quantenkommunikation hat sich als Element der Kryptografie die Quantenschlüsselverteilung als neuer Ansatz etabliert, der die Übertragung von Daten abhörsicher machen soll. Entsprechende optische Kommunikationssysteme haben die ersten Schritte zur Kommerzialisierung bereits bewältigt. Für die zukünftige Entwicklung alltagstauglicher Systeme kommt es auf eine Erhöhung der Reichweite und auf eine Steigerung der Raten des Schlüsselaustauschs an.

Quantenkommunikation

Quanten- Zufallszahlen- generatoren	Zufallszahlen sind ein wesentliches Element in der klassischen Verschlüsselung von Daten und daher von großem Interesse, etwa um PIN- oder TAN-Nummern zu generieren. Mit optischen Quantensystemen lassen sich echte Zufallszahlen erzeugen, weil der quantenmechanische Messprozess inhärent zufällig ist. Künftige Quanten-Zufallszahlengeneratoren benötigen noch eine höhere Verfügbarkeit und eine höhere Erzeugungsrates für die Zufallszahlen.
Quantenbildgebung	Werden die räumlichen Freiheitsgrade von Photonen verschränkt, ergeben sich Quanteneffekte, die zu einer Quantenbildgebung genutzt werden können. Bei der Quantenbildgebung kann die Codierung, Prozessierung und das Auslesen von Information in einem optischen Feld verbessert werden, wodurch die Empfindlichkeit von Messungen klassische Grenzen übersteigen und bspw. eine höhere optische Auflösung erreicht werden kann. In Mikroskopie, Bilderkennung und optischer Datenspeicherung können sich so neuartige Anwendungen ergeben.
Quantenrechner Quantensimulatoren	Langfristiger Natur ist die Entwicklung von Quantenrechnern und Quantensimulatoren. Mit Quantensimulatoren können bestimmte physikalische Systeme analog modelliert werden, deren Berechnung mit etablierten Simulationsverfahren zu aufwendig wäre, um praktisch durchgeführt zu werden. Dadurch können sich z. B. Festkörpersysteme, chemische Verbindungen und Reaktionen effizient berechnen lassen und etwa zur Entwicklung, zum Test und zur Produktion neuartiger Materialien und pharmazeutischer Wirkstoffe verwendet werden. Wenn es langfristig gelänge, Quantenrechner zu realisieren, könnte ihre inhärente, massive Parallelität der Berechnung helfen, das Verständnis komplexer Systeme wesentlich zu verbessern.
Maßgeschneiderte photonische Materialien	
Nanostrukturierte Metalle	Maßgeschneiderte photonische Materialien sind mikro- und nanostrukturierte optische Materialien, die aus dielektrischen Materialien, Metallen, Polymeren bzw. aus Kombinationen dieser Materialien bestehen und die räumlich auf einer Skala strukturiert sind, die im Bereich der Lichtwellenlänge oder darunter liegt. Typische Vertreter dieser Klasse von Materialien sind die sogenannten photonischen Kristalle und Metamaterialien.
Plasmonische Nanostrukturen	Nanostrukturierte Metalle können als plasmonische Elemente in maßgeschneiderten photonischen Materialien als Wellenleiter fungieren und Strecken im Mikrometerbereich überbrücken und zwar mit einer extrem hohen Bandbreite. Damit könnte in Zukunft eine optische Datenübertragung auf zukünftigen Hochgeschwindigkeits-Chips realisiert werden. Plasmonische Nanostrukturen sind auch zur Verbesserung von Solarzellen, Photodetektoren, Leuchtdioden und Halbleiterlasern von großem Interesse. Plasmonische Nanolaser bilden die kleinsten Laser der Welt. Sie könnten bspw. als Lichtquellen für die Mikroskopie subzellulärer Strukturen in der Biologie dienen. Die Gas- und Flüssigkeitssensorik etwa für die Sicherheitstechnologie und Medizintechnik könnte durch
Plasmonische Nanolaser Gas- und Flüssigkeitssensorik	

neuartige plasmonische Strukturen große Leistungssprünge im Bezug auf Empfindlichkeit und Selektivität erfahren.

Maßgeschneiderte photonische Materialien in Form von Super- und Hyperlinsen aus sogenannten Metamaterialien könnten dünne Linsensysteme mit idealen Abbildungseigenschaften ermöglichen. Perspektivische Anwendungen von Metamaterialien umfassen auch sogenannte „optische Tarnkappen“ für makroskopische Gegenstände, wenn es gelingen sollte, die bisher üblichen Verluste beim Durchgang durch die Metamaterialien zu überwinden und praktikable Herstellungsverfahren zu entwickeln.

Super- und
Hyperlinsen aus
Metamaterialien

Maßgeschneiderte plasmonische Materialien könnten in der Krebstherapie Anwendung finden: Metall-Nanoshells können funktionalisiert werden, sodass sich im Tumorgewebe anlagern, und dann mittels Laserstrahlung im Tumor aufgeheizt werden können, um den Tumor zu zerstören.

Metall-Nanoshells

Um diese und andere Anwendungen zu realisieren, ist noch Forschung an den optischen Wirkprinzipien in den Materialsystemen, an den Designmöglichkeiten und geeigneten Strukturierungsverfahren nötig. Um die Schwelle in die industrielle Anwendung zu überwinden, ist es darüber hinaus unerlässlich, industrietaugliche Fertigungsprozesse zu entwickeln.



3.9 Produktion

Entwicklung und Bereitstellung neuer Produktionstechnologien und -techniken

Fragen der ökonomischen und soziokulturellen Gestaltung des Gesamtsystems Produktion

Unternehmensübergreifende Prozessketten

Die Forschung zu industriellen Produktionssystemen umfasst traditionell technologische Schwerpunkte wie die Entwicklung und Bereitstellung neuer Produktionstechnologien und -techniken sowie Fragen der ökonomischen und sozio-kulturellen Gestaltung des Gesamtsystems Produktion. Eine zunehmende Verschränkung unterschiedlicher Technologien in der Produktion erfordert, dass technologieübergreifende Fragestellungen zentrale Bestandteile des zukünftigen Forschungsfelds werden. Bereits heute existieren starke Bezüge zu Informations- und Kommunikationstechnologie, Nano- und Biotechnologie, Photonik oder Nano-/Mikroelektronik. Die Produktion entwickelt sich damit weiter zum technologischen Querschnittsfeld.

Zudem rücken aus organisatorischer Sicht unternehmensübergreifende Prozessketten, die Innovation und Produktion integriert betrachten, in den Fokus von Forschung und Entwicklung. In folgenden Teilgebieten sind eine hohe Dynamik oder bahnbrechende Erkenntnisse bis 2030 zu erwarten: (1) cyber-physische Produktionsprozesse und deren kontinuierliche Weiterentwicklung, (2) generative Verfahren für unterschiedliche Materialien, (3) energie- und ressourcenautarke Wertschöpfungsketten, (4) flexible und robuste Maschinen, Produktionsprozesse und Wertschöpfungsnetze, (5) Mensch-Fabrik-Interaktion, (6) simultanes *System-Engineering* zur Verkürzung globaler Entwicklungszeiten sowie (7) Know-how- und Vulnerabilitätsschutz von digitalen Produktionssystemen. Produktionstechnologie für neue, funktionale Oberflächen wird in Zukunft ebenfalls eine wichtige Rolle einnehmen, hängt aber von den eingesetzten Materialien ab und ist daher auch Bestandteil des entsprechenden Technikfeldes.

Die folgenden Ausführungen beschreiben alle Teilgebiete. Vor dem Hintergrund der zu erwartenden Erkenntnisse und deren Reichweite kommt den beiden Gebieten „Umsetzung cyber-physischer Produktionsprozesse und kontinuierliche Weiterentwicklung“ sowie „Generative Verfahren für unterschiedliche Materialien“ besondere Aufmerksamkeit zu. Sie werden ausführlich dargelegt. Beide Teilgebiete sind seit geraumer Zeit Gegenstand verschiedener Forschungsaktivitäten. Die Entwicklungen und Erkenntnisse zeigen, dass die beiden vorangestellten Felder weiter an Bedeutung gewonnen haben und die Forschungsaktivitäten eher den grundlagenorientierten Anfang markieren. Gerade hinsichtlich der Anwendungspotenziale sind hier sehr viele wissenschaftliche Fragestellungen zu adressieren.

3.9.1 Cyber-physische Produktionsprozesse und deren kontinuierliche Weiterentwicklung

Cyber-physische Systeme (CPS) verbinden die virtuelle Computerwelt mit der physischen Welt der Dinge^{173,174,175,176} weshalb man in diesem Zusammenhang auch vom „Internet der Dinge“ spricht.¹⁷⁷ Technischer Kern und zugleich wesentliche Innovationstreiber von CPS sind Software-intensive, auf moderner Informationstechnik basierende, eingebettete, mechatronische Systeme.¹⁷⁸ Der Begriff CPS beschreibt keine einzelne Primärtechnologie, sondern das informationsbasierte Zusammenspiel mehrerer Techniken und Methoden in einem systemischen Verbund.¹⁷⁹ So aufgefasst haben CPS in der Produktion die Digitalisierung der gesamten Wertschöpfung bzw. die Kopplung von digitalen mit physischen Prozessen zum Gegenstand – und zwar mit dem Ziel, eine sich autonom organisierende Automatisierung der Prozesssteuerung ganzer und gegebenenfalls global verteilter Wertschöpfungsnetzwerke zu ermöglichen.¹⁸⁰ Dazu müssen CPS sämtliche technischen Elemente des Produktionssystems sowie die in ihm bewegten oder in irgendeiner Art manipulierten Objekte als sogenannte *Smart Objects* befähigen, sich weitgehend eigenständig zu organisieren, optimieren, konfigurieren und sich veränderten Bedingungen flexibel anzupassen.¹⁸¹

Cyber-physische Systeme

Internet der Dinge

Digitalisierung der gesamten Wertschöpfung

¹⁷³ Kagermann, H. et al. (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. URL: www.forschungsunion.de/veroeffentlichungen. Abgerufen am 24.04.2014.

¹⁷⁴ Ahrens, V. (2012): Inflation industrieller Revolutionen. In: *Productivity Management*, Bd. 17/Nr. 5, S. 30-31.

¹⁷⁵ Meißner, J. et al. (2013): Cyberphysische Produktionssysteme. In: *Productivity Management*, Bd. 18/Nr. 1, S. 21-24.

¹⁷⁶ Broy, M. (Hrsg.) (2010): *Cyber-physical systems. Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme*. Berlin/Heidelberg, Springer Verlag.

¹⁷⁷ Ahrens, V. (2012): Inflation industrieller Revolutionen. In: *Productivity Management*, Bd. 17/Nr. 5, S. 30-31.

¹⁷⁸ Broy, M. (Hrsg.) (2010): *Cyber-physical systems. Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme*. Berlin/Heidelberg, Springer Verlag.

¹⁷⁹ Gram, M.; Gugg, C. (2013): Einsatzmöglichkeiten von Cyber-Physical Systems im Lebenszyklusmanagement von Anlagen. In: *Industrie Management*, Bd. 29/Nr. 1, S. 39-43.

¹⁸⁰ SSchuld, A.; Gehrke, J. (2013): Software-Plattformen für die kommende Industrie 4.0. Anforderungen und Herausforderungen. In: *Industrie Management*, Bd. 29/Nr. 1, S. 29-32.

¹⁸¹ Hutle, M. (2013): Zukunft der Industriesysteme. Vernetzung und Sicherheit. In: *Industrie Management*, Bd. 29/Nr. 1, S. 62-64.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Zukunftsvision
„Industrie 4.0“

Die Zukunftsvision der modernen Produktion wird unter dem Begriff „Industrie 4.0“ behandelt und basiert im Kern auf CPS.^{182, 183} Die Forschung und Entwicklung zu CPS ist sowohl für die Anwenderseite (die Nutzer von CPS im industriellen Produktionsprozess) als auch für die Angebotsseite (die Hersteller von Produktionsanlagen) von höchster Relevanz, da zukünftige Wettbewerbsfähigkeit der Industrie maßgeblich von den Kompetenzen im Bereich CPS abhängig sein wird. Von ihnen ist eine starke Hebelwirkung für eine ökonomisch wie ökologisch nachhaltige Produktion zu erwarten. Aufgrund des integrierenden und selbstoptimierenden Charakters von CPS wird davon ausgegangen, dass nur mit diesen die politisch gesetzten und aufgrund der wettbewerblichen Entwicklung notwendigen Ressourcenproduktivitäts- und -effizienzziele erreicht werden können. Insbesondere in der Interaktion zwischen Anbieter und Anwender ist in diesem Technologiegebiet bis 2030 ein hohes Maß an Erkenntnisgewinn zu erwarten.

Basistechnologien mit
sehr unterschiedlichen
Reifegraden

Besondere Merkmale der CPS sind neben dem systemischen Verbund unterschiedlicher Technologie-, Wissens- und Managementdisziplinen auch ihre sozio-technische Einbettung im System „Unternehmen“. Dass viele der notwendigen Basistechnologien und Konzepte sich aktuell in noch sehr unterschiedlichen Reifegraden befinden und trotzdem gesamtheitlich integriert werden müssen, ist damit eine zentrale Herausforderung. Das Spektrum reicht dabei von in der Industrie seit Jahrzehnten etablierten Geräten, z. B. speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS), bis hin zu im Vergleich dazu erst seit Kurzem verfügbaren mobilen Endgeräten wie Smartphones und Tablets mit immenser Rechenleistung, zahlreichen Kommunikationsschnittstellen und intuitiven Bedienungskonzepten.¹⁸⁴ Viele der besonders relevanten Basistechnologien und -konzepte befinden sich heute erst am Anfang ihrer Entwicklung¹⁸⁵, teilweise noch im Bereich der Grundlagenforschung.¹⁸⁶ Die technischen Herausforderungen gliedern sich in zwei Themenkomplexe:¹⁸⁷

¹⁸² Kletti, J. (2013): Das MES der Zukunft. MES 4.0 unterstützt Industrie 4.0. In: *Productivity Management*, Bd. 18/Nr. 2, S. 17-20.

¹⁸³ Kagermann, H. et al. (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. URL: www.forschungsunion.de/veroeffentlichungen. Abgerufen am 24.04.2014.

¹⁸⁴ Gram, M.; Gugg, C. (2013): Einsatzmöglichkeiten von Cyber-Physical Systems im Lebenszyklusmanagement von Anlagen. In: *Industrie Management*, Bd. 29/Nr. 1, S. 39-43.

¹⁸⁵ o. A. (2013): VDI-Zukunftskongress entwirft Perspektive für Industrie 4.0. In: *VDI Nachrichten*, Nr. 5, S. 1.

¹⁸⁶ Broy, M. (Hrsg.) (2010): *Cyber-physical systems. Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme*. Berlin/Heidelberg, Springer.

¹⁸⁷ Ebd.

- die Komplexitätsbeherrschung bei der Entwicklung, Gestaltung und Steuerung der Systeme
- die konkrete Erschließung ihrer vielfältigen, spezifischen Anwendungsgebiete.¹⁸⁸

Um die Anwendungspotenziale und die damit verbundenen wirtschaftlichen Potenziale ausschöpfen zu können, gilt es schwerpunktmäßig in nachfolgenden skizzierten Teilbereichen neue Lösungen zu erforschen.¹⁸⁹

Jenseits der technischen Fragestellungen sind überdies Forschungsbereiche zu adressieren, welche die arbeitsgestalterische bzw. organisatorische Umsetzung moderner CPS sowie den rechtlichen Rahmen zum Gegenstand haben, da sich in diesen nicht technischen Feldern in hohem Maße erfolgskritische Faktoren für CPS verbergen.

Rechtlicher Rahmen

Standardisierung und offene Standards für eine Referenzarchitektur: CPS haben die Digitalisierung der gesamten Wertschöpfung bzw. die Kopplung von digitalen mit physischen Prozessen zum Gegenstand. Die effiziente und nachhaltige Überwindung von Systemgrenzen bzw. Integration und Vernetzung der verschiedenen und gegebenenfalls geografisch verteilten Wertschöpfungsprozesse kann nur mit Standards gelingen. Diese dürfen dabei nicht nur die jeweils atomare Vorgabe geeigneter Koordinationsmechanismen auf Informationsebene fokussieren, sondern müssen in ihrer Gesamtheit eine ganzheitliche Referenzarchitektur ergeben. Letztere beschreibt ein gemeinsames Muster für die Produkte und Dienstleistungen aller zusammenarbeitenden Unternehmen (Netzwerk-Perspektive) und bildet den Rahmen für die Strukturierung, Entwicklung und Integration der im Rahmen von CPS relevanten, technischen Systeme (horizontale und vertikale Prozessintegration). Eine einheitliche Referenzarchitektur existiert bis heute nicht. Ihre Entwicklung bedingt die Überwindung etablierter Paradigmen in den Disziplinen der Produktion, insbesondere in der Produktionstechnik, dem Maschinenbau, der Verfahrenstechnik, der Automatisierungstechnik, der Informatik und Telekommunikation. Zu-

Standardisierung

Ganzheitliche Referenzarchitektur

¹⁸⁸ Beispiele ebd.: Anforderungen und Spezifikation: Vollständigkeit, Konsistenz, Validität der Anforderungen, Architekturen, Dekomposition, frühe Bewertung, Validierung und Verifikation; *Hardware/Software Codesign*, Codegenerierung, Integration, umfassende Modellierung und Beschreibung der Systeme und ihrer Eigenschaften, Qualitätssicherung: Testfallerzeugung, automatisierte Analysen, *Concurrent Engineering*, *Distributed Engineering*, arbeitsteilige Entwicklung, interdisziplinäre Entwicklung; Sicherheit: Daten- und Zugriffssicherheit, funktionale Sicherheit, Artefaktmodelle, Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion; Langzeitbetrieb und Evolution, Wartbarkeit, Adaptivität und *Context Awareness*, Produktlinien, Bussysteme, Parallelität und Multicore.

¹⁸⁹ Kagermann et al. (2013). Die dort genannten Punkte lassen sich grundsätzlich auch in anderen Stellungnahmen finden, vgl. etwa Verein Deutscher Ingenieure VDI; Broy (2010); Kletti (2013); Sauer und Kletti (2013); o. A. (2013); Sauer (2013). Die nachfolgenden Ausführungen nehmen Bezug auf die Erkenntnisse des Arbeitskreises Industrie 4.0 zu den wichtigsten mittel- und langfristigen Forschungsbedarfen, vgl. hierzu auch Kagermann et al. (2013); Verein Deutscher Ingenieure VDI; Broy (2010); Kletti (2013); Sauer und Kletti (2013); o. A. (2013); Sauer (2013).

nächst ist dafür eine disziplinübergreifende Klärung der Begrifflichkeiten notwendig.

Beherrschung
komplexer Systeme

Beherrschung komplexer Systeme: Der Integrationsanspruch von CPS führt zu in ihrer Struktur und in ihrem Verhalten immer komplexer werdenden Systemen, die sich nicht mehr mit den in der Industrie etablierten Planungskonzepten, Steuerungskonzepten und -instrumenten sowie Organisationsstrukturen beherrschen lassen. Ähnlich wie in den bereits angesprochenen Bereichen der Standardisierung bzw. der Herleitung einer Referenzarchitektur bedarf es auch zur Komplexitätsbeherrschung zunächst der Ableitung geeigneter Planungs- und Erklärungsmodelle, die ein lebenszyklusübergreifendes Management von CPS zulassen. Als eine wesentliche Herausforderung für die Zukunft ist in diesem Zusammenhang aber nicht nur die Entwicklung geeigneter Methoden und Werkzeuge zu verstehen, die eine Simulation und Steuerung von CPS mittels Modellbildung ermöglichen (Verknüpfung von realer mit virtueller Welt), sondern auch, dass diese in der Breite den Unternehmen sowie Ingenieuren zugänglich gemacht werden.

Flächendeckende
Breitbandinfrastruktur
für die Industrie

Flächendeckende Breitbandinfrastruktur für die Industrie: Der flächendeckende Einsatz von CPS erfordert generell eine wesentlich bessere Infrastruktur zum Datenaustausch als sie gegenwärtig noch bereitgestellt wird. Dies bezieht sich nicht nur auf den Ausbau der Kapazität dieser Netzwerke, sondern auch auf spezifische Qualitätsanforderungen, z. B. geringe Latenzzeiten, hohe Ausfallsicherheit sowie eine flächendeckende Verfügbarkeit der Infrastruktur. Auch wenn derartige Kommunikationsnetze nicht nur für CPS, sondern auch für Anwendungsfelder wie Energie oder Gesundheit eine Basisinfrastruktur darstellen, so gelten für CPS besondere Anforderungen an Einfachheit, Skalierbarkeit, Sicherheit, Verfügbarkeit und Bezahlbarkeit. Die Entwicklung dieser Basisinfrastruktur kann aufgrund der Verschränkung mit anderen volkswirtschaftlich oder gesellschaftlich relevanten Anwendungen nur gesamtheitlich erfolgen.

Sicherheit und
Datenschutz

Sicherheit und Datenschutz: Für die in CPS vorausgesetzte informationstechnische Vernetzung sowie Prozessautonomie stellt die Sicherheit einen erfolgskritischen Faktor dar. Dies betrifft zum einen die Sicherstellung, dass derartige Systeme keine Gefahr für Menschen und die Umgebung darstellen, und zum anderen ihre Absicherung gegenüber unbefugtem Zugriff bzw. Missbrauch. Gerade in komplexen Systemen wie CPS ist Sicherheit immer auch eine Eigenschaft des Gesamtsystems als Summe seiner Einzelelemente. Dementsprechend stellen sich in diesem Zusammenhang Fragestellungen, z. B. *Security by Design*, also einer Berücksichtigung der Betriebs- und Angriffssicherheit schon während der Planung von CPS, sowie IT-Sicherheitskonzepte, -architekturen und -standards, die eine entsprechende Absicherung während des gesamten Lebenszyklus von CPS gewährleisten.

3.9.2 Generative Verfahren für unterschiedliche Materialien

Generative Fertigungsverfahren sind im Unterschied zu subtraktiven (z. B. Drehen, Fräsen) und formativen (z. B. Schmieden, Biegen) Verfahren definiert als „alle Fertigungsverfahren [...], die Bauteile durch Auf- und Aneinanderfügen von Volumenelementen, vorzugsweise schichtweise, herstellen“¹⁹⁰. Hierzu gehören auch laserstrahlbasierte Verfahren. Neben dem Begriff „generative Fertigungsverfahren“ werden in Literatur und Praxis eine Reihe anderer Termini synonym verwendet. So beschreiben die Begriffe „Schichtbauverfahren“, „*Rapid Technology*“, „*Additive Manufacturing*“, „*Layer Manufacturing*“ und „*Solid Freeform Fabrication*“ dieselbe Fertigungstechnologie, stellen aber jeweils einen anderen Aspekt in den Vordergrund. Eine international oder national anerkannte Terminologie oder Normung existiert derzeit nicht.¹⁹¹

Synonyme

Hinsichtlich ihres Einsatzzwecks können generative Fertigungsverfahren in drei Gruppen unterteilt werden. Historisch bedingt entstand schon früh der Begriff *Rapid Prototyping*, da generative Fertigungsverfahren industriell erstmals im Entwicklungsbereich zur Modell- und Prototypenfertigung eingesetzt wurden. *Rapid Prototyping* benennt „die schnelle Herstellung von Muster- und Prototypenbauteilen durch schichtweisen Aufbau“.¹⁹² Der Einsatz in den späteren Phasen der Produktentwicklung wird als *Rapid Tooling* bezeichnet. Hier dienen generative Fertigungsverfahren der „schnellen Herstellung von Werkzeugen für urformende und umformende Fertigungsverfahren“.¹⁹³ Dabei wird häufig schon ein Serienwerkstoff verwendet. Werden generative Fertigungsverfahren zur Herstellung von Bauteilen als marktfähige Produkte eingesetzt, wird dies als *Rapid Manufacturing* bezeichnet. Äquivalente deutsche Begriffe existieren momentan noch nicht.

Rapid Prototyping

Rapid Tooling

Rapid Manufacturing

Generative Fertigungsverfahren fassen Herstellungsverfahren zusammen, die auf einem speziellen technologischen Grundprinzip, dem Schichtbauprinzip, basieren. Trotz der verfahrenstechnischen Heterogenität der generativen Fertigungsverfahren weisen sie neben dem technologischen Grundprinzip weitere prinzipielle Gemeinsamkeiten auf. Ein wichtiges Merkmal ist die direkte Fertigung von physischen Bauteilen aus digitalen Daten, ohne dass produktspezifische Werkzeuge oder fertigungsbedingte Stützkonstruktionen benötigt werden. Die Herstellung der physischen

Schichtbauprinzip

¹⁹⁰ Gebhardt, A. (2007): Generative Fertigungsverfahren – Rapid Prototyping – Rapid Tooling – Rapid Manufacturing. 3. Aufl. München, Carl Hanser Verlag.

¹⁹¹ Levy, G. et al. (2003): Rapid Manufacturing and Rapid Tooling Technologies with Layer Manufacturing Technologies, State of the Art and Future Perspectives. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology, Bd. 55/Nr. 2, S.539-609.

¹⁹² Zäh, M. F. (Hrsg.) (2006): Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien – Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren. München, Carl Hanser Verlag.

¹⁹³ Ebd.

Raum für
Gestaltungsfreiheit
und hohe Komplexität
der Bauteile

Neue Möglichkeiten im
Design

Bauteile erfolgt über das Fügen von Einzelschichten. So entsteht sukzessive das physische Bauteil, dessen Fertigung mit der Nachbearbeitung abschließt. Generative Fertigungsverfahren lassen viel Raum für Gestaltungsfreiheit und hohe Komplexität der Bauteile. Die Schichtbauweise ermöglicht komplexe geometrische Strukturen sowie eine Funktionsintegration in das Bauteil oder Werkzeug (z. B. integrierte Kühlleitungen), die mit konventionellen Verfahren nur schwer oder zum Teil gar nicht realisierbar sind und gegenüber konventionell hergestellten Teilen oder Werkzeugen einen deutlichen Leistungsvorteil erzielen.¹⁹⁴

Im Gegensatz zu konventionellen Verfahren führt eine steigende Komplexität der Bauteilgeometrie nicht zu einem exponentiell steigenden, produktionsbedingten Kosten- und Zeitaufwand, sondern hält ihn auf einem nahezu konstanten Niveau. Diese neuen Möglichkeiten im Design gelten als einer der Haupttreiber für die Verbreitung generativer Fertigungsverfahren und ermöglichen bei geschicktem Einsatz einen erheblichen Wettbewerbsvorteil gegenüber konventionellen Verfahren.

Technologische Vorteile	Technologische Nachteile/Grenzen
<ul style="list-style-type: none"> • Materialvielfalt • komplexe, „unmögliche“ Geometrien sind herstellbar • Funktionsintegration • Reduktion Montagearbeiten • Material- und Gewichteinsparungen • Abfallreduktion und recycelbares Ausgangsmaterial • werkzeuglose Fertigung • hoher Grad an Automatisierung hinsichtlich Datenverarbeitung 	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächenqualität teilweise ungenügend • Nachbearbeitung notwendig • variierende Bauteileigenschaften und -qualität • Qualitätsüberwachung während Bauprozess schwierig • Begrenzung der Baugröße • relativ langsame Fertigung • Einzelschritte wenig automatisiert • einsetzbare Materialien abhängig von Verfahren und Maschine

¹⁹⁴ Wohlers Associates, Inc. (2012): Wohlers Report 2012. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report. Fort Collins, Wohlers Associates, Inc.

Ökonomische Vorteile	Ökonomische Nachteile/Grenzen
<ul style="list-style-type: none"> • nachfrageorientierte Produktion • zeitlich und räumlich nahe Herstellung • geringes Risiko bei kundenindividueller Fertigung • verbesserte Kundenintegration in Entwicklungs- und Produktionsprozesse • Verkürzung <i>Time-to-Market</i> • Bestandsreduzierung • geringerer Personalaufwand in Produktion • neue Geschäftsmodelle und Distributionsnetzwerke (ggf. auch Nachteil) 	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Kosten für Ausgangsmaterialien • wirtschaftliche Fertigung nur bei Einzelfertigung oder Kleinserien aufgrund fehlender Skaleneffekte • Abhängigkeit von wenigen großen Anlagenherstellern (Oligopolmarkt)

Tabelle 15: Übersicht über Vor- und Nachteile von generativen Fertigungsverfahren im Vergleich zu konventionellen Verfahren

Die unterschiedlichen generativen Fertigungsverfahren bergen spezifische Vor- und Nachteile hinsichtlich des einsetzbaren Materials, der Bauteilqualität und des wirtschaftlichen Einsatzes. Dennoch lassen sich wesentliche Aspekte aufgrund der identischen technischen Grundprinzipien verfahrenübergreifend zusammenfassen. Tabelle 15 gibt aus heutiger Sicht einen zusammenfassenden Überblick über die vor- und nachteiligen Eigenschaften der Rapid Technologien. Derzeit wird in mehreren – auch wissenschaftlichen – Zeitschriften teilweise sehr euphorisch dargestellt, dass sich generative Fertigungsverfahren in absehbarer Zeit auch für die industrielle Produktion zu einer attraktiven Alternative für konventionelle Fertigungsverfahren entwickeln könnten. Die industrielle Anwendung wäre dann nicht mehr wie bislang auf Prototypenbau oder Einzelmodellfertigung beschränkt, sondern würde Anwendungspotenziale auch in der Varianten- und Serienproduktion eröffnen. Dies könnte weitreichende Auswirkungen bis hin zur Neujustierung inländischer und globaler Wertschöpfungsketten nach sich ziehen.

Bestehende Studien attestieren Deutschland mit seinem Unternehmensbesatz und dem Mix aus Technologieentwicklern, -anwendern und -dienstleistern eine gute Ausgangsposition, um an diesem Wachstums-

Anwendungspotenzial auch in der Varianten- und Serienproduktion

Deutschland mit guter Ausgangsposition

Disruptives Potenzial

markt zu partizipieren.¹⁹⁵ Die Chancen, diese gute Ausgangsposition tatsächlich in neue Wettbewerbsvorteile umsetzen zu können, wird maßgeblich von der Fähigkeit deutscher Hersteller abhängig gemacht, die bestehenden technischen Einschränkungen generativer Verfahren durch weiterführende Innovationen erfolgreich zu verringern und den technischen Reifegrad zu erhöhen. Die größten Risiken einer Serienfertigung für die deutsche Industrie dürften sich aus der rasanten Technologieentwicklung für Maschinenhersteller und Ausrüsterfirmen ergeben, die einer der wesentlichen Pfeiler der Wettbewerbsfähigkeit des Forschungs- und Industriestandortes Deutschland sind. Möglicherweise sind auch spezialisierte Teilezulieferer betroffen; diese können für ihr Kompetenzangebot aber prinzipiell selbst auf generative Verfahren zurückgreifen. Für Hersteller von Fräs-, Dreh-, Press-, Schleif- oder Laserschneidemaschinen könnten aber ganze Geschäftsfelder wegbrechen, wenn Kunden oder spezialisierte Zulieferer zukünftig vermehrt auf generative Herstellungstechnologien setzen. Dieses durchaus „disruptive Potenzial“ generativer Fertigungsverfahren in der industriellen Herstellung zeigt sich nicht zuletzt darin, dass neben möglichen neuen Akteurskonstellationen auch die geografische Struktur industrieller Wertschöpfungsketten durch die Möglichkeiten einer nachfrageorientierten und räumlich flexiblen Vor-Ort-Produktion einem grundlegenden Wandel unterliegen könnten.

Durch den Einsatz generativer Fertigungsverfahren lassen sich die Eigenschaften vieler Bauteile, Werkzeuge und Materialien in unterschiedlichen Branchen optimieren bzw. sogar grundlegend neue Bauteil- und Werkzeuggeometrien und -eigenschaften realisieren.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Auch wenn generative Fertigungsverfahren bereits in zahlreichen Anwendungen zum Einsatz kommen oder sich in der Entwicklungspipeline befinden, gibt es noch Bedarf an neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen sowohl für die Optimierung bereits bestehender Verfahren als auch die Entwicklung komplett neuer Verfahren. Die größten Herausforderungen werden im Folgenden kurz erläutert:

Qualität, Prozessleistung und -sicherheit

Qualität, Prozessleistung und -sicherheit von generativen Verfahren als Voraussetzung für die Serientauglichkeit generativer Verfahren: Die Qualität und Zuverlässigkeit generativer Verfahren hängt maßgeblich vom eingesetzten Material sowie der eingesetzten Maschine ab, d. h. die industrielle Anwendung wird dadurch erschwert, dass eine bestimmte Maschine für jedes Bauteil jeweils exakt mit dem bestimmten Material kalibriert werden muss. Durch diese relativ langen Rüst- und Anlaufzeiten lassen sich generative Fertigungsverfahren heute nur sehr eingeschränkt flexibel für unterschiedliche Produkte einsetzen. Neben der Va-

¹⁹⁵ Astor, M. et al. (Prognos AG); Prof. Dr. Lukas, U. et al. (Fraunhofer IGD); Jarowinsky, M.; Bartels, H.-J. (MC Marketing Consulting) (2013): Marktperspektiven von 3D in industriellen Anwendungen, Abschlussbericht.

riantenflexibilität ist auch die Volumenflexibilität noch begrenzt, da die Wiederholgenauigkeit der Herstellungsprozesse je nach Material weitaus größeren Schwankungen unterworfen ist als bei vergleichbaren konventionellen Verfahren. Zudem sind bestimmte Produktqualität oder Oberflächengüte mit generativen Verfahren noch nicht oder nur mit erheblicher manueller Nacharbeit realisierbar (z. B. Treppeneffekte durch Schichtbauweise, Härtegrade und mechanische Belastbarkeit, Rauheit der Oberfläche). Bei generativen Verfahren waren bislang Qualitätskontrollen während des Fertigungsprozesses nicht in der Präzision und Zuverlässigkeit möglich, wie dies bei konventionellen Verfahren der Fall ist. Konventionelle Anlagen sind ihnen zudem bei einfacheren (Klein-) Teilen hinsichtlich der Bearbeitungsgeschwindigkeit deutlich überlegen. So dauert es in den meisten Fällen noch mehrere Stunden, um ein wenige cm³ großes Objekt zu „drucken“.

Material einschränkungen und -kosten: Auch wenn die Zahl der einsetzbaren Materialien durch aktuelle Weiterentwicklungen in den unterschiedlichen Verfahren bereits merklich gestiegen ist (z. B. Kunststoffe, Metall, Holz, Sand, Papier), sind einzelne Verfahren bzw. einzelne Maschinen bislang auf ein Material festgelegt, d. h. es ist nicht möglich, mit einer Maschine unterschiedliche Materialien zu verarbeiten. Beispielsweise ist heute noch nicht realisierbar, Werkstoffe wie Kupfer, Aluminium oder andere Reinelemente in generativen Verfahren einzusetzen. Zudem ist es noch nicht möglich, innerhalb eines Herstellungsprozesses unterschiedliche Materialien zu verarbeiten. Dabei sind die Kosten für die Ausgangsmaterialien für generative Verfahren derzeit im Vergleich zu Materialien für konventionelle Verfahren noch erheblich teurer (teilweise um das 10 bis 20-fache) und stellen ein wesentliches Hemmnis für die weitere Verbreitung und Serientauglichkeit dieser Verfahren dar. Hinzu kommt, dass Hersteller von generativen Fertigungsanlagen die bearbeitbaren Materialien speziell auf die Maschinen abstimmen, woraus sich für Anwender eine gewisse Abhängigkeit von einzelnen Ausrüstern und Materialzulieferern ergibt.

Material-
einschränkungen
und -kosten

Begrenzte Bauraumgröße: Generative Verfahren sind heute hinsichtlich der maximal realisierbaren Bauteilgröße beschränkt. Die größte derzeit verfügbare Anlage verfügt über einen Bauraum von 4x2 Metern. Doch gerade bei größeren (Sonder-)Bauteilen (z. B. Flügel für Windkraftanlagen, Tragflächen für Flugzeuge, Großturbinenteile) könnten die Vorteile generativer Verfahren besonders sichtbar werden (Material- und Ressourceneffizienz, neuartige Konstruktionsmöglichkeiten/Leichtbau, Individualisierbarkeit). So könnte nicht zuletzt die Zahl der Sonder- oder Schwertransporte reduziert werden, weil die Bauteile direkt vor Ort „gedruckt“ werden könnten.

Begrenzte
Bauraumgröße

Integration generativer und konventioneller Fertigungsverfahren: Ein bislang noch kaum betrachtetes Feld ist die Integration konventioneller und generativer Fertigungsverfahren im Rahmen intelligenter, vernetzter

Integration
generativer und
konventioneller
Fertigungsverfahren

Produktionssysteme (Industrie 4.0). Dies ist zum einen dem aktuellen technologischen Entwicklungsstand geschuldet, dessen Fokus stärker auf der Identifizierung neuer Anwendungsfelder liegt, zum anderen der Integration in bestehende Lösungen und Verfahren. Sollten generative Verfahren ihren Weg in die industrielle Serienfertigung finden, wird sich diese Frage zunehmend stellen. Nicht zuletzt könnte in der intelligenten Verbindung konventioneller und generativer Verfahren ein großes Potenzial zur Überwindung der oben angeführten bestehenden Probleme im Bereich der Prozess-Performanz liegen.

Neue Geschäftsmodelle und Wertschöpfungsstrukturen

Neue Geschäftsmodelle und Wertschöpfungsstrukturen: Durch die Entkopplung von Konstruktion/Engineering und Produktion, so wie sie durch generative Verfahren vorangetrieben wird, ergeben sich neue Geschäftsmodelle, zum Beispiel im Ersatzteilgeschäft (3-D-Druckzentren, kostengünstige Ersatzteile für hoch-individualisierte Sondermaschinen) oder im Bereich der Logistik (mobile Produktion beim Kunden vor Ort). Als Folge eines breiten Einsatzes generativer Verfahren in der industriellen Serienproduktion wäre damit zu rechnen, dass sich komplette Wertschöpfungsketten der industriellen Fertigung hinsichtlich ihrer Akteure (z. B. aus Branchen wie Chemie- und Kunststoffe) als auch ihrer räumlichen Struktur (z. B. Verlagerung der Produktion zum Kunden) in den kommenden 10-15 Jahren grundlegend verändern könnten.

Zu der Frage, ob, in welchem Umfang und wie schnell diese Entwicklungen eintreten werden, gibt es noch keine belastbaren Untersuchungen. Fest steht jedoch, dass die Erreichung dieser Potenziale aufgrund der technologischen Fortschritte heute realistischer erscheint als noch vor wenigen Jahren. Schließlich liegt ein relevantes, gesamtwirtschaftliches Potenzial für den Industriestandort Deutschland – ggf. aber auch eine Gefahr für die deutsche Ausrüsterindustrie – in den durch 3-D-Druck erschließbaren Möglichkeiten zur Re-Lokalisierung und Verkürzung von Wertschöpfungsketten. In den vergangenen Jahren haben Unternehmen zunehmend nur noch die für ihre Kernkompetenzen zentralen Komponenten im eigenen Haus hergestellt. Sie ließen und lassen heute noch ihre Teile dort gießen, stanzen, drehen oder fräsen, wo es am günstigsten erledigt werden konnte – häufig in Osteuropa, China, Vietnam oder Mexiko. Dies hat in vielen Fällen zu sehr komplexen und vielstufigen Lieferketten geführt, bei denen ein Ausfall oder eine Verzögerung an einer einzigen Stelle zum vorübergehenden Stillstand der ganzen Produktion führen kann. Komponenten, die in einem Teil der Welt in Massenfertigung hergestellt werden, brauchen teilweise sechs bis acht Wochen bis zur Ankunft in der Montagefabrik.

Sehr komplexe und vielstufige Lieferketten

Wertschöpfungsketten könnten wieder stärker integriert und regional werden

3-D-Druck bietet nicht zu unterschätzende Potenziale, dass Wertschöpfungsketten wieder stärker integriert und regional werden, wenn Unternehmen mit 3-D-Drucker-Techniken (wieder) mehr Teile selbst herstellen oder spezialisierte Zulieferer bzw. Dienstleister in ihrer Nähe suchen. Die Preisvorteile der Massenproduktion in Niedriglohnländern verringern

sich durch weniger arbeitsintensive und weniger materialintensive *Just-in-time*-Fertigung mittels 3-D-Druck. Insbesondere bei kleinen Stückzahlen und speziellen Designs könnte sich dies schon bald durchsetzen.

3.9.3 Energie- und ressourcenautarke Wertschöpfungsketten

Vor dem Hintergrund steigender und volatiler Energie- und Ressourcenpreise, knapper werdender Ressourcen sowie aufgrund des existierenden Wettbewerbsdrucks sind „energie- und ressourcenautarke Wertschöpfungsketten“ von hoher strategischer Bedeutung für die produzierende Industrie in Deutschland. Daher wird es eine zentrale Herausforderung für die Industrie sein, unter Einhaltung der Produktionsziele eine maximale Wertschöpfung bei gleichzeitig minimalem Ressourceneinsatz zu erreichen und in diesem Kontext tragfähige Lösungen zu entwickeln. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf der weiteren Ausschöpfung des Energie- und Materialeffizienzpotenzials, auf der Gestaltung interner, kurzer und robuster Kreislaufsysteme sowie auf der Potenzialerkennung für die Nutzung von Sekundärrohstoffen. Ziel wird es sein, die Abhängigkeit von als kritisch eingestuften Ressourcen zu minimieren.

Ausschöpfung des Energie- und Materialeffizienzpotenzials

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Für die produzierende Industrie wird die Reduzierung des Energie-Einsatzes weiterhin ausschlaggebend sein. Insbesondere für den Maschinen- und Anlagenbau wird die Entwicklung von Effizienztechnologie, wie energieoptimierter Prozesssteuerungsansätze, noch wichtiger werden. Hierfür sind neue Anwendungen aus der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik zu erwarten, die ebenso eine Kopplung von Material- und Energieeffizienz ermöglichen. Zudem bedarf es Lösungen zur Substitution von Hochtemperaturprozessen, um ressourcenschonender und emissionsärmer als bisher zu produzieren. Zur Erzielung einer energieautarken Produktion ist nicht zuletzt der Ausbau erneuerbarer Energie und ihre intelligente Verknüpfung mit Produktionsaktivitäten essenziell. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass die Verknüpfung von Energienetz und Energieverbrauchern im Produktionsumfeld zum einen intelligente Steuerungs- und Regelungstechniken voraussetzt. Zum anderen wird künftig der Energieverbrauch als Steuerungsparameter für das Gesamtproduktionssystem in bestimmten Industrien an Bedeutung gewinnen, sodass neben technischen Lösungen auch nach organisatorischen Lösungen, beispielsweise „energieverbrauchsorientierten“ Schichtsystemen oder Konzepten der Arbeitsorganisation, verlangt wird.

Energieverbrauch als Steuerungsparameter

Zukünftige Entwicklungen hängen zudem von der Adaptionsfähigkeit der Wertschöpfungskette an verschiedene und volatile Eingangsressourcen ab. In diesem Zusammenhang spielen insbesondere Materialeffizienz- und Substitutionsstrategien eine wichtige Rolle – ausgehend von der Optimierung bestehender Prozesse bei gleichzeitiger Steigerung des Materialnutzungsgrads bis hin zur Substitution der eingesetzten Rohstoffe oder bestehender Techniken. Aufkommende Herausforderungen betreffen

Materialeffizienz- und Substitutionsstrategien

beispielsweise die Substitution kritischer Rohstoffe, für die zukünftig Lösungsbedarf besteht.

Gestaltung
ultrakurzer
Prozessketten

Ebenso gewinnt die Gestaltung ultrakurzer Prozessketten an Bedeutung, beispielsweise mittels integrierter, generativer Fertigungsverfahren oder durch die räumliche und zeitliche Integration von Fertigungsschritten. Die kurzfristige Materialsubstitution stellt große Herausforderungen an eine wandlungsfähige Produktionstechnologie und an eine im Hinblick auf den Ressourceninput wandlungsfähige Organisation. Bislang wurde die wissenschaftliche Frage der Wandlungsfähigkeit vorrangig im Zusammenhang mit einer sich veränderten Nachfrage diskutiert. Zukünftig müssen sowohl die Input- als auch die Output-Seite betrachtet werden, da aufgrund der Verknappung die Ressourcen- bzw. Materialmärkte längerfristig möglicherweise durch eine zunehmende Volatilität gekennzeichnet sein werden.

Wertstoffkreisläufe
zur stofflichen
Abfallverwertung

Die Schaffung effizienter und kurzer Wertstoffkreisläufe zur stofflichen Abfallverwertung wird insbesondere in den energie- und materialintensiven Branchen an Bedeutung zunehmen. Darüber hinaus werden dem Recyclingmanagement, dem Recycling von beispielsweise Carbon- oder auch Nanomaterialien und der Schaffung von werterhaltenden Materialkreisläufen wesentliche Rollen zukommen. Ein in der Zukunft auszubauender Ansatzpunkt zur Rohstoffrückgewinnung und Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen ist die Gestaltung integrierter, verfahrenstechnischer Prozessketten, die beispielsweise zur Gewinnung von Metallen aus industriellen Prozesswässern eingesetzt werden können.

3.9.4 Flexible und robuste Maschinen, Produktionsprozesse und Wertschöpfungsnetze

Komplexitätszunahme

In den letzten 20 Jahren lässt sich eine erhebliche Komplexitätszunahme in Produktionsprozessen und Wertschöpfungsnetzwerken beobachten. Erstens betrifft dies die technologische Komplexität, da ausgehend von der Mechanik neue produktionstechnische Lösungen in zunehmendem Maße durch die Integration benachbarter Technikgebiete gekennzeichnet sind bzw. neue Entwicklungen an Schnittstellen zu anderen Technologiefeldern liegen, z. B. an der Schnittstelle der Elektronik zur Mechatronik oder jüngst in der Entwicklung von Informations- und Kommunikationstechnologien zu intelligenten Systemen.

Technologische
Komplexität

Integration nano-,
mikro- oder
biotechnologischer
Verfahren in die
Produktion

Für die Zukunft ist zweitens zu erwarten, dass sich dieser Trend sogar in deutlich kürzeren Zyklen fortsetzt, beispielsweise durch die Integration nano-, mikro- oder biotechnologischer Verfahren in die Produktion. Zudem, und nicht zuletzt auch aufgrund der zuvor beschriebenen Entwicklungen, weisen Wertschöpfungsnetzwerke eine zunehmende Heterogenität ihrer Akteure auf. Ließen sich Wertschöpfungsstrukturen bislang überwiegend innerhalb bestimmter etablierter Strukturen wie technologischer „Regime“ oder Branchen abbilden, sind diese heute durch eine steigende Zahl „branchenfremder“ Akteure (z. B. funktionale Textilien in

der Medizinbranche) in vor- oder nachgelagerten Wertschöpfungsstufen gekennzeichnet.

Drittens lässt sich eine Komplexitätszunahme in der geografischen Ausdehnung von Produktions- und Wertschöpfungsnetzwerken konstatieren. Viele Unternehmen produzieren heute global. Der Standort Deutschland ist dabei Teil eines globalen Wertschöpfungsnetzwerkes, in dem verschiedene Akteure arbeitsteilig an der Leistungserstellung beteiligt sind. Nicht zuletzt haben sich mit Blick auf die Marktseite auch die Absatzmärkte immer weiter globalisiert. Gerade die Zugpferde der Deutschen Industrie – die Automobilindustrie, der Maschinen- und Anlagenbau oder die Chemische Industrie – exportieren einen Großteil ihrer in Deutschland hergestellten Produkte oder produzieren bzw. montieren (ggfs. regional angepasste) Produkte für den Markt inzwischen direkt vor Ort: ein Trend der durch Marktwachstum und politische Regulation weiter voranschreiten wird und auch vor einer globalen Aufstellung der Produktentwicklung bzw. FuE nicht haltmachen wird. Doch wie die zurückliegende Finanz- und Wirtschaftskrise deutlich gemacht hat, ist sowohl bei den Faktor- als auch bei den Absatzmärkten von einer steigenden Volatilität auszugehen. Die skizzierten Trends werden sich in der Zukunft fortsetzen. Die sich hierbei abzeichnende „Entgrenzung“ von Produktionssystemen und Wertschöpfungsnetzwerken bedarf jedoch gleichermaßen neuer technischer Lösungen für flexible und robuste Produktionssysteme als auch neuer Analyse-, Planungs- und Gestaltungsansätze des Produktions- bzw. Wertschöpfungsmanagements, um die Leistungsfähigkeit der Produktionsprozesse auch zukünftig auf international wettbewerbsfähigem Niveau zu halten. Hierbei ist das Spannungsfeld der *Economies of Scale* versus kundenindividueller Produktion bzw. ökologischer Produktion zu beachten.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Neben der radikalen Weiterentwicklung der Analyse- und Steuerungslogiken werden auf technischer Ebene der einzelnen Anlagen und Maschinen signifikante Verbesserungen bei der Flexibilität und Variabilität erreicht werden müssen. Schon heute zeigt sich die Anpassungsfähigkeit der Anlagen und Maschinen beispielsweise bei der Umsetzung von wirtschaftlich optimalen Lean-Produktions-Paradigmen in der variantenreichen Kleinserienproduktion als eine der größten Hürden. Zukünftig wird die variantenreiche Kleinserienproduktion – schon aufgrund der Marktschwankungen – möglicherweise eher die Regel als die Ausnahme sein. Daher wird die Fähigkeit zur schnellen und einfachen Re- oder sogar Selbstkonfigurierbarkeit von Anlagen und Maschinen, mit dem Ziel der Anpassung an neue Produktionsaufgaben, notwendig werden, um kostengünstig entsprechende Veränderungsnotwendigkeiten auf der Fabrikebene umsetzen zu können. Die Leistungsfähigkeit im Sinne einer hohen Produktivität muss sichergestellt bleiben. Neben der Fähigkeit zur Selbstkonfiguration von Maschinenmodulen oder verketteten Anlagen

Komplexitätszunahme in der geografischen Ausdehnung von Produktions- und Wertschöpfungsnetzwerken

Radikale Weiterentwicklung der Analyse- und Steuerungslogiken

zur Steigerung der Volumenflexibilität werden, wie im vorigen Abschnitt skizziert, zudem Lösungen benötigt, die beispielsweise die Ver- bzw. Bearbeitung flexibel unterschiedlicher Materialien oder individualisierter Produktvariantenlinien betreffen.

Ziel der
Flexibilisierung

Verbunden mit dem produktionsstrategischen Ziel der Flexibilisierung wird auch ein zunehmender Bedarf an „robuster“ Produktionstechnik einhergehen, d. h. Maschinen und Anlagen, die neben der Fähigkeit, unterschiedliche Materialien gleichermaßen zuverlässig verarbeiten zu können, sind auch in ihrer räumlichen Aufstellung und Anordnung variabel. Dies gilt in besonderem Maße für Produktionsstandorte in wachstumsstarken Schwellenländern, die noch nicht den industriellen Produktionsstandard Deutschlands erreichen. Obgleich die Distanz im Zeitverlauf aufgrund der hohen Lernraten schrumpfen wird, ist davon auszugehen, dass diese zumindest mittelfristig bestehen bleibt. Um am Marktwachstum partizipieren zu können, muss der Markt mit passfähigen Anlagen bedient werden. Die aktuell eingeschlagene *High-Road* der Produktionstechnologie durch hochvernetzte und integrierte – dadurch aber hinsichtlich ihrer Funktionsweise und Einbettung in das Produktionssystem auch sensiblen – Hochleistungsmaschinen wird möglicherweise durch eine *Low-Road* zu ergänzen sein, allerdings ohne dass innovative technische Differenzierungsmerkmale verloren gehen. Für deutsche Ausrüsterfirmen könnte es dann ein entscheidender Vorteil sein, die Voraussetzungen für den Betrieb entsprechender Anlagen so gering wie möglich zu halten; sei es im Hinblick auf die technischen Voraussetzungen oder hinsichtlich der qualifikatorischen Voraussetzungen des Bedien- und Wartungspersonals. So wird es beispielsweise notwendig werden, Maschinen zu entwickeln und anzubieten, die zwar autonom mit ihrer Umwelt agieren, allerdings hierzu keine systemhierarchisch höheren Systeme erfordern.

High-Road

Low-Road

Exogene und
endogene
Unwägbarkeiten
in die Planungs-
rationalität
integrieren

Vor dem Hintergrund der weiter wachsenden Unsicherheit und Komplexität der Produktionsprozesse und Wertschöpfungsketten werden künftig strategische Planungs- und Steuerungsansätze notwendig, die deutlich besser exogene wie auch endogene Unwägbarkeiten in die Planungsrationaltät integrieren. Sie müssen in der Lage sein, dynamische Veränderungen sowohl zu antizipieren (z. B. in Form unterschiedlicher Szenarien) als auch zuverlässig diejenigen Handlungsfelder zu identifizieren, die vor dem Hintergrund der Szenarien das größtmögliche Verbesserungspotenzial versprechen. Bisher verfügbare Ansätze legen den Fokus zumeist noch auf die inhaltliche Erarbeitung der Szenarien in all ihrer Breite. Für die Zukunft wird die wesentliche Herausforderung jedoch darin bestehen, diese Instrumente durch neue, quantitative Methoden zu ergänzen, die die identifizierten inhaltlichen Dimensionen anhand von Zahlen und Fakten überprüf- und damit prognostizierbar machen (z. B. durch Simulationsmodelle). Ziel ist es, mittels solcher Methoden die maßgeblichen strategischen Stellhebel auf technischer und organisatorischer Ebene für die Anpassung an neue Rahmenbedingungen treffsicher zu eruieren und konkre-

te Maßnahmen ableiten zu können. Solche Ansätze müssen als stetige Elemente in den Managementprozess integrierbar sein und die heute noch oft getrennt betrachteten Ebenen „Netzwerk“ und „Fabrik“ integrieren.

3.9.5 Mensch-Fabrik-Interaktion

Längst beschränken sich die Schnittstellen zwischen Menschen und Produktionstechnik nicht mehr auf die bloße Steuerung einfacher Maschinenfunktionen. Die Mensch-Technik-Interaktion nimmt bereits heute eine strategisch wichtige Rolle für die Hersteller und Betreiber von Produktionsmaschinen und Anlagen ein. Sie beschreibt all jene Handlungs- und Entscheidungsbereiche in der industriellen Fertigung, in denen Menschen und technische Maschinen und Anlagen (z. B. Industrieroboter) innerhalb gemeinsamer Arbeitsräume (z. B. einer Fertigungsstation) interagieren. Technische Basis dieser Entwicklung sind Durchbrüche im Bereich der Sensorik, Aktuatorik und bei produktionstechnischen IKT-Lösungen. Galt es bislang zum Beispiel noch, die „tauben“ und „blinden“ Industrieroboter in eigenen, mit Zäunen gesicherten Bereichen sorgfältig vor menschlichem Eingreifen abzuschirmen, ermöglichen neue Sensor- und Antriebslösungen, neue mobile Energieversorgungslösungen, drahtlose Vernetzung sowie „lernende“ und selbstkonfigurierende Softwarelösungen, dass sich Roboter zunehmend frei in „menschensüblichen“ Umgebungen (z. B. Produktionshalle) bewegen oder sogar Arbeitsschritte zeitgleich in Interaktion mit Menschen ausführen können.

Roboter zunehmend frei in „menschensüblichen“ Umgebungen

Die Erfüllung der hiermit verbundenen positiven Erwartungen im Hinblick auf Produktivität, Qualität, Flexibilität und Effizienz – und damit die Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie – wird allerdings in hohem Maße davon abhängen, inwiefern es gelingt, die Mensch-Fabrik-Schnittstelle durch fachübergreifende Forschung aus Technik, Informatik, Arbeitswissenschaften, Arbeitssoziologie, Neurowissenschaften, Psychologie und Humanphysiologie so zu entwickeln, dass technische Lösungen einerseits „Mensch-kompatibler“ werden, andererseits aber auch neue Erkenntnisse über Kognitions- und Emotionsmuster der Beschäftigten als Basis für neuartige Steuer- und Bedienkonzepte zu gewinnen. Daneben ist es erforderlich, Konzepte für den grundlegenden Auf- und Ausbau entsprechender Kompetenzen der Produktionsbeschäftigten im Umgang mit ihren technischen „Kollegen“ zu erarbeiten und die Geräte so zu konzipieren, dass sie eine wirkliche Unterstützung sind und ihre menschlichen Kollegen nicht gefährden. Neben einer entsprechenden Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle muss hierbei zugleich die übergreifende Struktur der Arbeitsorganisation in den Blick genommen werden. Denn deren Ausgestaltung ist mit entscheidend für die Tätigkeits- und Aufgabenstruktur und Handlungsfähigkeit der Beschäftigten an komplex automatisierten Systemen.

Übergreifende Struktur der Arbeitsorganisation im Blick

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Obwohl bereits beträchtliche (vorwiegend technische) Fortschritte erzielt wurden, kann von etablierten bzw. standardisierten Lösungen noch nicht gesprochen werden. Insbesondere im Kontext der Einbettung von Mensch-Maschine-Teams im Rahmen komplexer, cyber-physischer Produktionssysteme der kommenden Generation ergeben sich weiterhin erhebliche zukünftige Forschungsbedarfe:

Gigantische Ströme
von Prozess- und
Sensor-Daten

Die direkte Interaktion von Mensch und Maschine erzeugt durch den komplexen und sprichwörtlich „unberechenbaren“ Kontext menschlichen Verhaltens gigantische Ströme von Prozess- und Sensor-Daten, die von der Maschine bzw. dem technischen Produktionssystem in Sekundenbruchteilen ausgewertet und in Steuerungsbefehle umgesetzt werden müssen. Hierzu müssen in Zukunft neue und zuverlässige Algorithmen der Mustererkennung in großen Datenmengen entwickelt werden. Gleichmaßen erfordert die Realisierung eine verbesserte Erkennung der Umstände, an die die Interaktion angepasst werden soll (z. B. Emotionen). Dies ermöglicht neue Anwendungsbereiche der technischen Informationsverarbeitung, z. B. semantische Informationsverarbeitung oder Fuzzy-Logik-Lösungen.

Forschungsbedarf in
sozial- bzw. human-
wissenschaftlichen
Disziplinen

Um die in Folge der Integration von Mensch und Maschine zunehmende Komplexität beherrschbar zu halten, sind neue Gestaltungslösungen im Hinblick auf Bedienbarkeit, Individualisierbarkeit, Design oder Ergonomie erforderlich. Die Gestaltung der Schnittstellen zwischen Mensch und Technik umfasst neben technischen Lösungen des Maschinenbaus, der Mikroelektronik oder der Informations- und Kommunikationstechnik insbesondere Forschungsbedarf in sozial- bzw. humanwissenschaftlichen Disziplinen, um technische Lösungen besser an unterschiedliche Kognitions-, Handlungs- und Verhaltensmuster von Menschen und Gruppen anpassen zu können.

Einbindung des
menschlichen Körpers

Die Einbindung des menschlichen Körpers in Form eines „Sensors“ wird für die Maschine stark an Bedeutung gewinnen. Sie umfasst beispielsweise die Entwicklung funktionaler, intelligenter Arbeitsbekleidung und Textilien, die anhand von Mikrochips, RFID oder anderen Sensoren der Maschine Auskunft über Position und „Zustand“ des menschlichen Systems geben, um frühzeitig Gefahren erkennen bzw. vermeiden zu können und die Sinneseindrücke des Menschen in Form von Sensordaten für die Maschinensteuerung verfügbar zu machen. Sensoren können mittelfristig auch in die Arbeitskleidung der Menschen integriert sein und weitere Informationen an die Maschinen weitergeben. Dies ermöglicht beispielsweise auch neue Lösungen zur Navigation oder Standortbestimmung für sich autonom bewegende Maschinen, die in ihrem Genauigkeitsgrad über bestehende Systeme wie GSP weit hinausgehen.

Erfolgreiche Mensch-Technik-Teams erfordern ein Verständnis sinnvoller Rollenverteilungen und geeigneter Organisations- und Kooperations-

strukturen. Welche Aufgaben belässt man sinnvollerweise in Menschenhand, welche nicht, und in welchen Strukturen kommen die typisch menschlichen Fähigkeiten optimal zur Geltung? Hierzu sind in enger Kooperation mit der technischen Maschinen- und Anlagenentwicklung neue Lösungen der Arbeits- und Produktionsorganisation zu entwickeln. Folgt man dem Stand der sozialwissenschaftlichen Arbeitsforschung, so ist eine zentrale Voraussetzung hierfür eine ganzheitliche Sicht auf Mensch-Maschine-Systeme und ihr Verständnis als sozio-technisches System mit den Gestaltungsdimensionen Technik, Tätigkeiten (Mensch) und Organisation. Als generelles Gestaltungskriterium für das Gesamtsystem ist hierbei die Möglichkeit der Kompetenzförderung zur Bewältigung und Beherrschung von Systemstörungen verschiedener Art hervorzuheben.

Lösungen der
Arbeits- und
Produktions-
organisation

3.9.6 Simultanes *Systems Engineering* zur Verkürzung globaler Entwicklungszeiten

Produkt- und Prozessinnovationen bilden heute die Basis für Beschäftigung und Wohlstand moderner Industriegesellschaften. Dies gilt in Deutschland mit seinen Kernbranchen Maschinenbau, Automobilindustrie, Elektroindustrie oder Medizintechnik in besonderer Weise. Die Produkte und Prozesse dieser Branchen beruhen heute vielfach auf dem engen Zusammenwirken von Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik. Die abzusehende Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik und ihr Einfluss auf die hier betrachteten Erzeugnisse eröffnen die Perspektive, neue technische Lösungen in Zukunft mit inhärenter Intelligenz auszustatten. Die Anforderungen an die Entstehungsprozesse neuer technischer Lösungen steigen hiermit signifikant: Gleichzeitig ergibt sich aus der Globalisierung mit dem daraus resultierenden Wettbewerbsdruck und geografisch verteilten Kooperationen ein anspruchsvolles Anforderungsprofil. Die notwendige Standardisierung der Systeme steht dabei häufig im Widerspruch zu Individualisierung und kultureller Anpassung. Um das globale Innovationsrennen gewinnen zu können, dürfen trotz steigender Komplexität der Lösungen die Entwicklungszeiten nicht in gleichem Maße steigen. Fachleute verschiedener Nationalitäten und Kulturkreise müssen wirksam und effizient zusammenarbeiten.

Standardisierung
der Systeme
häufig im
Widerspruch zu
Individualisierung und
kultureller Anpassung

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Die meisten technischen Innovationen entstehen bereits heute und mehr noch in Zukunft an den Schnittstellen zwischen unterschiedlichen Fachdisziplinen. Ein Ansatz, der das Potenzial hat, unterschiedliche Disziplinen und die vielfältigen Aspekte eines komplexen, globalen Entwicklungsprozesses zu integrieren, ist das *Systems Engineering*. Die bestehenden Lösungen sind allerdings eher durch ein isoliertes „Nebeneinander“ der fachspezifischen Methoden als ein „Miteinander“ charakterisiert. Diese „Nebeneinander“ zu überwinden erfordert sowohl die Integ-

<i>Systems Engineering</i>	<p>ration und Sicherstellung der gegenseitigen Anschlussfähigkeit bestehender, fachspezifischer Lösungen als auch die Neuentwicklung von passfähigen Instrumenten und Methoden des <i>Systems Engineering</i>, um den Anforderungen der betrieblichen Realität stärker als bisher Rechnung zu tragen. Folgende zukünftige Anwendungsbereiche werden hierfür bis 2030 eine wichtige Rolle spielen:</p>
Neue Werkstoffe	<p>Gerade bei komplexen Produkten haben Fertigungstechniken und neue Werkstoffe bereits großen Einfluss auf das Produktkonzept. Produkt und Produktionssystem sind daher von vornherein im Wechselspiel zu gestalten. Entwicklungsprozesse sind so weiterzuentwickeln, dass sie das Produktionssystem als Gesamtheit technischer und nicht technischer Prozessgestaltung mit einschließen. Zur ganzheitlichen und simultanen Entwicklung von Produkt und zugehörigem Produktionssystem gibt es heute nur erste Ansätze, allerdings keine etablierten Methoden.</p>
Absehbare Entwicklungen in Markt, Technologie und Geschäftsumfeld ins Kalkül ziehen	<p>Der Erfolg eines heute entwickelten Erzeugnisses entscheidet sich in der Zukunft. Daher sollten absehbare Entwicklungen in Markt, Technologie und Geschäftsumfeld und ihre denkbaren Entwicklungen ins Kalkül gezogen werden, um Produkte, Produktionssysteme und Wertschöpfungsnetze zukunftsrobust zu gestalten. Hierzu bedarf es einer engen methodischen Verzahnung von strategischer Geschäfts-, Produkt- und Technologieplanung mit der Methodik der ganzheitlichen Produkt- und Produktionssystementwicklung, die möglichst viele Stakeholder mit einbezieht.</p>
Produkt- und Prozessentwicklung stark virtualisiert	<p>Die Produkt- und Prozessentwicklung sind inzwischen stark virtualisiert, sodass rechnerbasierte Modelle gebildet und analysiert werden, um den zeit- und kostenaufwendigen Bau und Test von realen Prototypen zu reduzieren. Im Vordergrund stehen heute jedoch nur einzelne spezifische Aspekte wie die Materialeigenschaften, das dynamische Verhalten, die Montier- und Demontierbarkeit einer Baugruppe oder die Taktzeiten einer Fertigungsanlage. Die Beherrschung der Komplexität multidisziplinärer Erzeugnisse entlang globaler Entwicklungsprozesse erfordert aber zukünftig eine durchgängige Virtualisierung des gesamten Entwicklungsprozesses, die spezifische Virtualisierungs-Werkzeuge zu kohärenten Werkzeugketten kombiniert.</p>
	<p>Sowohl Forschung als auch industrielle Praxis fokussieren bei der Optimierung globaler Entwicklungsprozesse vorwiegend auf technische Lösungen. Trotz erheblicher Investitionen sind die hohen Erwartungen jedoch im Großen und Ganzen bisher nicht erfüllt worden. Oft wird nur pro forma nach detaillierten Vorgehensmodellen gearbeitet, und Expertensysteme sind bis auf Einzelfälle über das Pilotstadium nicht hinausgekommen, da sie mit der Komplexitätszunahme globaler Entwicklungsprozesse nicht Schritt halten. Die nur auf Technik basierenden Problemlösungsansätze werden aber nicht ausreichen, um dieses Problem zu bewältigen. Es ist daher notwendig, das Geschehen in globalen Entwicklungsprozessen als vernetztes sozio-technisches System zu begreifen und gleichrangig zu technischen Lösungen auch die nicht technische (organisatorische)</p>

Ausgestaltung globaler Entwicklungsprozesse (z. B. durch neue Konzepte des Managements, der Arbeitsorganisation, der Gestaltung organisatorischer Schnittstellen, der individuellen Kompetenzen) voranzutreiben.

3.9.7 Know-how- und Vulnerabilitätsschutz von digitalen Produktionssystemen

Der Transformationsprozess der klassischen industriellen Wertschöpfung in eine wissensbasierte, digitale Produktion ist bereits heute eingeläutet. Der Zukunftsvision einer weitgehend digitalen Vernetzung und autonomen Optimierung der industriellen Wertschöpfung steht die Forderung nach einer umfassenden Sicherheit der Geschäftsprozesse auf der anderen Seite gegenüber. Bereits jetzt ist die Systemsicherheit eine sehr virulente Thematik in Forschung und Anwendung. Der Know-how- und Vulnerabilitätsschutz wird bei der fortschreitenden Digitalisierung von Produktionssystemen sehr stark an Bedeutung gewinnen, da auch die „virtuellen Angriffs- und Gefährdungspunkte“ eines Unternehmens exponentiell zunehmen.

Transformation
zu einer
wissensbasierten,
digitalen Produktion

Daher muss mit dem Streben nach einer höheren Wertschöpfung durch digitale Produktionssysteme gleichzeitig ein Höchstmaß an Sicherheit solcher Systeme vor unerlaubtem Zugriff auf sensible Daten oder der Möglichkeit der Manipulation der Systeme durch Dritte einhergehen. Der Entwicklung hierfür geeigneter und gleichzeitig praktikabler Systeme kommt eine, wenn nicht sogar die Schlüsselposition im Hinblick auf den Markterfolg und Anwendbarkeit digitaler Produktionssysteme zu. Nach heutigem Kenntnisstand darf sich der zukünftige Schutz industrieller Wertschöpfungsprozesse nicht wie bisher allein auf eine Bekämpfung der Symptome konzentrieren, sondern sollte bereits auf konzeptioneller Ebene an den systembedingten Schwachstellen ansetzen (*Security-by-Design*). Zudem darf aufgrund der mit der zunehmenden Digitalisierung der Prozesse ebenfalls einhergehenden Digitalisierung von Wissen nicht ausschließlich die Absicherung digital unterstützter Prozesse im Vordergrund stehen, sondern muss vielmehr auch der Schutz des sich in ihnen unvermeidlich materialisierenden (wettbewerbsrelevanten) Know-hows vor Konkurrenzausspähung und Wirtschaftsspionage in den Blick genommen werden.

Höchstmaß an
Sicherheit

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Der Know-how- und Vulnerabilitätsschutz digitaler Produktionssysteme wird in Zukunft hauptsächlich auf zwei Handlungsfeldern stattfinden: 1. auf konzeptioneller Ebene bei der Etablierung des *Security-by-Design* als wesentliches Entwurfsprinzip digitaler Produktionssysteme, und 2. auf Ebene der Entwicklung und Etablierung geeigneter IT-Sicherheitskonzepte, -architekturen und -standards, um ihre Umsetzung zu vereinfachen und zu beschleunigen. Kennzeichnendes Merkmal sämtlicher Ansätze zum Schutz digitaler Produktionssysteme ist dabei, dass diese nicht nur simultan über die verschiedenen Architekturebenen der

Security-by-Design

IT-
Sicherheitskonzepte,
-architekturen und
-standards

entsprechenden Informationsverarbeitungssysteme ansetzen, sondern integrativ über alle – und insbesondere die frühen – Phasen des Lebenszyklus von Produktionssystemen erfolgen müssen. Die Absicherung der Systeme kann nur unter Einbezug sämtlicher Beteiligten, also Hersteller, Systemintegrator, Betreiber der Anlagen sowie der Öffentlichkeit, gleichermaßen gewährleistet werden. Unter diesen Voraussetzungen sind bereits diverse Anwendungspotenziale abzusehen, von denen die Folgenden besonders hervorzuheben sind:

Die Entwicklung handhabbarer integrierter Sicherheitskonzepte, -architekturen und -standards wurde zwar in Angriff genommen, steckt aber noch in den Kinderschuhen. Es wird grundlegend zu klären sein, welche Daten durch neue technische Lösungen überhaupt sinnvollerweise generiert werden (sollen/müssen). Welche Daten über Fertigungsprozesse und -technologien, Produkte sowie Transaktionsdaten sind geschäfts- oder wettbewerbsrelevant, und welchen Grad an Schutz erfordern sie daher? Die Beantwortung dieser Fragen ist notwendig, um entsprechende Sicherheitsarchitekturen zu entwickeln und Standards zu definieren.

Sichere Identitätsnachweise für systeminhärente Produkte, Prozesse und Maschinen

Die intelligente Vernetzung von Wertschöpfungsprozessen, Maschinen sowie Maschinenkomponenten schafft neue Möglichkeiten, entsprechende Teilsysteme oder Komponenten flexibel und aufwandsschonend in ein Gesamtsystem zu integrieren. Selbstkonfigurierende oder gar autonom agierende technische Systeme verlangen nach eindeutigen und sicheren Identitätsnachweisen für systeminhärente Produkte, Prozesse und Maschinen. Ansonsten wären manipulative Maßnahmen nicht nur virtuell von außen möglich, sondern durch das physische Einschleusen von schadensverursachenden Komponenten in das Produktionssystem. Deshalb wird die Entwicklung sicherer Identifikations- und Verifizierungsmodi auf der Ebene der Wertschöpfungsprozesse ein wesentlicher Schwerpunkt sein.

Technische Sicherheitssysteme und Ebene der Unternehmensorganisation und einzelner Mitarbeiter

Technische Sicherheitssysteme bieten allenfalls einen partiellen Schutz. Ein umfassender Schutz kann sich nur durch ein integratives Sicherheitskonzept realisieren lassen, das auch abgestimmte nicht technische Bestandteile auf der Ebene der Unternehmensorganisation und der einzelnen Mitarbeiter umfasst. Somit wird es einerseits erforderlich sein, die technischen Schutzmechanismen trotz einer bestmöglichen Schutzwirkung anwenderfreundlich ausulegen. Andererseits ist die Organisation auf allen Ebenen weiterzuentwickeln, sodass gegenüber Konkurrenzausspähung und Wirtschaftsspionage ausreichende Sensibilität vorhanden ist und Schutzmechanismen verwirklicht werden. Gerade im Produktionsumfeld spielen solche Aspekte bisher noch keine nennenswerte Rolle. Während Entwicklungsabteilungen teilweise schon heute hermetisch abgeschirmt sind, ist das Produktionsumfeld quasi ein offenes Feld mit Zugang für verschiedene externe Akteure. Hier sind die Systemgrenzen und ihre Durchlässigkeit zu überprüfen und möglicherweise anzupassen.

Auf der Ebene der Mitarbeiter sind Qualifikationsanforderungen zu definieren und durch gezielte Qualifizierungsmaßnahmen zu adressieren.

Eine intelligente, durch die Konkurrenz nicht unmittelbar nachvollziehbare technische Gestaltung der Wertschöpfungsprozesse galt bislang als wirkungsvoller Schutz gegenüber Produktpiraterie. Werden nun die Produktionssysteme selbst zum Angriffspunkt, würde dieser Schutzmechanismus obsolet werden. Einhergehend mit einer durchgängigen Vernetzung werden viele, wenn nicht sämtliche, technische Bestimmungs- und Steuerungsparameter des Produktionssystems nicht nur für die Anwender explizit gemacht, sondern bieten für unbefugte Dritte entsprechende Möglichkeiten der umfassenden Nachvollziehbarkeit sowie der zentralen Beeinflussbarkeit. Daher wird über neue Interaktionsmodi des integrierten Schutzes von Prozess- und Produktinnovation nachzudenken sein.

Produktionssysteme
werden selbst zum
Angriffspunkt



3.10 Zivile Sicherheitsforschung

Schutz von Menschen,
Infrastrukturen oder
Organisationen

Zivile Sicherheitsforschung ist ein vergleichsweise neues interdisziplinäres Forschungsgebiet, welches Forschungsaktivitäten adressiert, die einen Beitrag zum Schutz von Menschen, Infrastrukturen oder Organisationen sowohl vor ungesetzlichen oder vorsätzlich schädigenden Handlungen als auch vor den Auswirkungen natürlicher oder technischer Katastrophen leisten. Im Mittelpunkt stehen Lösungen, die sowohl im öffentlichen als auch privaten Lebensumfeld den Schutz der Bevölkerung und der kritischen Infrastrukturen vor Bedrohungen durch Terrorismus, Sabotage, organisierte Kriminalität, Piraterie sowie vor den Folgen von natürlichen bzw. anthropogenen Naturkatastrophen oder Großunfällen sicherstellen. Dazu zählen insbesondere technologische und organisatorische Entwicklungen und Maßnahmen, die zur Prävention, Vorsorge, Reaktion bzw. zur Wiederherstellung und Auswertung vor, während und nach einem Krisenereignis beitragen können. Übergeordnetes und langfristiges Ziel der Forschung ist der Aufbau widerstandsfähiger, fehlertoleranter und robuster Infrastrukturen in Staat, Wirtschaft und Gesellschaft.

Aufbau widerstands-
fähiger, fehler-
toleranter und
robuster
Infrastrukturen

Querschnittsgebiet

Zivile Sicherheitsforschung ist ein Querschnittsgebiet, in dem Wissen und Kompetenzen aus Ingenieurs- und Naturwissenschaften sowie Geistes- und Sozialwissenschaften systematisch zusammengeführt werden, um zu koordinierten Lösungen von zivilen Sicherheitsproblemen zu gelangen. Im Mittelpunkt stehen übergreifende Forschungsansätze, die naturwissenschaftlich-technisches Basiswissen, z. B. aus der IuK-Technologie, Werkstoffforschung, Mikrosystemtechnik oder Biotechnologie, erschließen und innovative Sicherheitslösungen entwickeln. Als eine von unterschiedlichsten Querschnittstechnologien und Anwendungsszenarien geprägte Disziplin ist in der zivilen Sicherheitsforschung eine klar abgegrenzte Definition von Teilgebieten schwierig, nicht zuletzt vor dem Hintergrund einer stark heterogenen Marktstruktur in der zivilen Sicherheitswirtschaft. Jedoch lassen sich unter Berücksichtigung zentraler Technologie- und Marktentwicklungen sieben Teilgebiete ableiten, die eine hohe Relevanz für Forschung und Innovation bis 2030 aufweisen: (1) IuK-Technologien und -Systeme, (2) Sensor- und Detektionstechnologien, (3) Künstliche Intelligenz/Robotik, (4) Schutztechnik und -ausrüstung, (5) Simulation und Modellierung, (6) Biometrie und Mustererkennung, (7) Navigations-, Beobachtungs- und Ortungstechnologien.

3.10.1 IuK-Technologien und -Systeme

Der Einsatz und die Vernetzung digitaler IuK-Technologien und intelligenter Informationsmanagementsysteme sind Grundvoraussetzung für die Entwicklung moderner ziviler Sicherheitssysteme. Sie sind in Einsatzleitstellen und -einrichtungen unverzichtbarer Bestandteil für ein in-

tegriertes Risiko- und Krisenmanagement in den unterschiedlichsten Anwendungsszenarien. Dazu zählt beispielsweise die Koordination von Einsatzkräften bei der Rettung und Versorgung von Verletzten (z. B. bei einem Massenanfall von Verletzten bzw. im Katastrophenfall) oder die störungsfreie Steuerung und Überwachung kritischer Infrastrukturnetze und -prozesse (z. B. im Bereich der Stromversorgung, im Finanzsektor, der Lebensmittelwarenketten oder Containerlogistik). Die systematische Einbindung mobiler Kommunikationssysteme, moderner Visualisierungstechnologien und drahtloser Übertragungstechniken ist dabei von ebenso großer Bedeutung wie der Einsatz web- oder datenbankbasierter Systemlösungen, die für eine schnelle Erfassung, Weitergabe und Analyse von Daten und Informationen sowohl in organisations- als auch infrastrukturübergreifenden Entscheidungsunterstützungssystemen sorgen.

IuK Bestandteil
unterschiedlichster
Anwendungsszenarien

Die nachfolgende Auflistung von Anwendungsbeispielen aus der zivilen Sicherheitsforschung bietet einen querschnittartigen Überblick zu Themen und Technologieansätzen, die den Stand der Forschung und Technik im Bereich der IuK-Technologien und -systeme repräsentieren:

- Sicherung der Lebensmittel- und Medikamentenversorgung: Risikomanagement-Software zum akteursübergreifenden Informationsaustausch und zur Entscheidungsunterstützung bei der Sicherstellung der Lebensmittel- und Medikamentenversorgung in Krisenfällen,
- Sicherung der Warenketten: automatisierte IT-Systeme zur Rückverfolgung von Warenbewegungen und Logistikprozessen auf Basis sensorintegrierter Überwachungslösungen bzw. Auto-ID-Datenträgern,
- Schutz von Versorgungsinfrastrukturen: intelligente Krisenmanagementsysteme zur verbesserten Lagedarstellung und Abschätzung von Kaskadeneffekten unter Einbindung realitätsnaher 3-D-Simulationen, einschließlich der digitalen Informationssammlung, -aufbereitung und -weitergabe an relevante Akteure, (z. B. Energieversorger, Krisenstäbe und die Bevölkerung),
- Schutz und Rettung von Menschen: mobile, sich weitgehend selbstorganisierende Kommunikations- und Datenplattformen zur Koordination und Vernetzung von Einsatzkräften bei Großschadenslagen.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

So wie in anderen IuK-Forschungsfeldern ist auch im Bereich der zivilen Sicherheit damit zu rechnen, dass die Trends zu wachsender Konvergenz, Ubiquität, Flexibilität sowie Datennutzbarkeit digitaler Informations- und Kommunikationstechnologien dazu führen werden, dass die Einsatz-

Selbstorganisierter Aufbau von Ad-hoc-Kommunikationsnetzen bei Ausfall oder Störung bestehender Kommunikationsstrukturen in Katastrophenlagen	<i>Cognitive Radio</i> (kognitiver Funk) ¹⁹⁸ : Konzept zur optimalen Nutzung von unbenutzten bzw. wenig belegten Funkfrequenzbereichen. Cognitive Radio soll dafür sorgen, dass die zur Verfügung stehenden Frequenzbänder intelligenter, flexibler und ökonomischer belegt werden
Echtzeitfähige Rechnersysteme für den Einsatz in mobilen Applikationen für Polizei und Rettungskräfte	Quantencomputer könnten auf lange Sicht die Entwicklung von Krisenmanagementsystemen ermöglichen, in denen Verteilungswege von Rettungskräften, Hilfsgütern und Informationen in Echtzeit optimiert und an eine sich wandelnde Einsatzlage angepasst werden können.
Aufbau selbstorganisierter Kommunikations- und/oder Sensornetze zur Lagefeststellung und Unterstützung von Rettungs- und Einsatzkräften in Krisenlagen	<i>Body-to-Body-Network</i> (BBN) ¹⁹⁹ : mobiles Breitbandkommunikationsnetzwerk auf Basis energieautarker drahtloser Sensoren, die z. B. in mobilen Endgeräten oder Textilien integriert werden.

Tabelle 16: Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich IuK-Technologien und Systeme

Im Folgenden werden zwei mögliche Anwendungsbeispiele aus dem Teilgebiet IuK-Technologien näher vorgestellt.

Intelligente Leitstellen

Die automatisierte Zusammenführung heterogener Daten, die aus unterschiedlichen intelligenten Netzen sowie verteilten, eingebetteten Systemen stammen, z. B. GPS-Sensoren, Verkehrsüberwachungskameras, *Smart Metern* oder Gebäudeautomatisierungssystemen, werden auch zu Fortschritten bei der Entwicklung intelligenter Leitstellen und Kommu-

Daten aus unterschiedlichen intelligenten Netzen sowie verteilten, eingebetteten Systemen

¹⁹⁸ Gongolsky, M. (2009): Katastrophenschutz: Kanal-Kidnapping für Notfälle. URL: www.spiegel.de/netzwelt/tech/katastrophenschutz-kanal-kidnapping-fuer-notfaelle-a-620978.html. Abgerufen am 22.04.2014.

¹⁹⁹ TecChannel (2010): Vision: Menschen werden Netzwerkknoten. URL: www.techannel.de/netzwerk/news/2032134/vision_menschen_werden_netzwerkknoten. Abgerufen am 22.04.2014.

Virtuelle
Leitzentralen

nikationsnetzwerke im Bereich des Risiko- und Krisenmanagement führen. Bereits heute existieren integrative Leitstellenkonzepte, in denen Informationstechniken (z. B. GPS, Foto, Video und Funk) zusammen mit interaktiven 3-D-Visualisierungs- und Displaytechniken zu einem System verbunden werden, das flexibel an unterschiedliche Anwendungsszenarien und Infrastrukturen angepasst werden kann.²⁰⁰ Langfristig wird die Entwicklung virtueller Leitzentralen möglich, in denen neue Bedienkonzepte integriert sind und die einen automatisierten Datentransfer zwischen den Netzen bzw. einen durchgängigen Datenaustausches sowohl mit mobilen Einsatzkräften als auch der Bevölkerung ermöglichen.

Cognitive Radio

Die Fähigkeit, autonome Systeme mit kognitiven Fähigkeiten einzusetzen, wird zukünftig in der zivilen Sicherheit eine zentrale Voraussetzung für die Realisierung einer Vielzahl von Anwendungsszenarien darstellen. Das gilt beispielsweise für elektronische Verletztenfassungssysteme, die auf Basis fernerkasster Patientendaten Entscheidungen über notwendige Interventionen seitens des medizinischen Personals treffen. Das betrifft aber auch die Sicherstellung der Einsatzkommunikation im Katastrophenfall durch den selbstorganisierten Aufbau von Ad-hoc-Kommunikationsnetzwerken. Ein wichtiger Entwicklungsschritt stellt hier der sogenannte „kognitive Funk“ (*Cognitive Radio*) dar. Dieser neue Ansatz löst sich vom derzeitigen technischen Standard, streng getrennte Frequenzbereiche für bestimmte Aufgaben zuzuweisen, sondern versucht, durch eine an die Situation angepasste Nutzung von vorhandenen Übertragungsressourcen aus verschiedenen Frequenzbändern selbstorganisierte Ad-hoc-Netzwerke zu bilden. Der kognitive Funk soll dabei in der Lage sein, im Falle überlasteter öffentlicher Kommunikationsnetze selbstständig alle Übertragungs- und Empfangsmöglichkeiten in der Umgebung zu erkennen und bestmöglich auszunutzen. Ob sich das Konzept in Zukunft durchsetzen wird, hängt dabei nicht nur von der weiteren technischen Entwicklung (z. B. hinsichtlich einer verbesserten Interoperabilität verschiedener Systeme und geeigneter Lösungen zur Vermeidung von Interferenzen) ab, sondern ist auch wesentlich von der Lösung vorhandener regulatorischer Probleme abhängig.

Durch Nutzung von
vorhandenen Über-
tragungsressourcen
aus verschiedenen
Frequenzbändern
selbstorganisierte
Ad-hoc-Netzwerke
bilden

3.10.2 Sensor- und Detektionstechnologien

Mobile oder stationäre Detektionstechnologien decken in zivilen Sicherheitssystemen ein breites Einsatzspektrum ab. Entweder berührungslos oder über den Einsatz von Probeentnahmesystemen funktionierend, sind sie in erster Linie auf eine schnelle Detektion und präzise Identifizierung von gefährlichen bzw. verbotenen Substanzen (z. B. Explosivstoffen) oder Objekten (z. B. Waffen) ausgerichtet. Die einsatztechnische Band-

²⁰⁰ Fraunhofer IOSB (2013): SmartControlRoom. URL: www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/6620. Abgerufen am 24.04.2014.

breite von Detektionssystemen und Sensorkomponenten reicht dabei von der frühzeitigen Erkennung von CBRNE-Gefahrstoffspuren²⁰¹ im Trinkwasser bis hin zur Kontrolle und Durchleuchtung von Gepäckstücken, Fahrzeugen oder Frachtcontainern. Zum Einsatz kommen dabei unterschiedlichste chemische, biologische oder physikalische Sensortechnologien, die das Aufspüren toxischer bzw. explosiver Substanzen oder verdächtiger Gegenstände sowohl vor Ort als auch über große Distanzen hinweg ermöglichen.

Chemische,
biologische oder
physikalische Sensor-
technologien

Die nachfolgende Auflistung von Anwendungsbeispielen aus der zivilen Sicherheitsforschung bietet einen querschnittartigen Überblick zu Themen und Technologieansätzen, die den Stand der Forschung und Technik in diesem Bereich repräsentieren:

- Trinkwasserversorgung: biologisches Breitband-Sensorsystem zur Online-Diagnose und die Qualitätsüberwachung von Wasserversorgungsanlagen,
- Gesundheitlicher Bevölkerungsschutz: portables *Lab on Chip*-Detektionssystem zur Vor-Ort-Analyse von Tierseuchenerregern bzw. pathogenen Keimen oder Schadstoffen,
- Sicherheit von Gefahrguttransporten: mobiles Ionenmobilitätsspektrometer zur Identifizierung bzw. Vor-Ort-Analyse austretender Gefahrstoffe bei Gefahrgutunfällen,
- Containersicherheit: hochauflösendes Durchleuchtungssystem zur Inspektion von Luftfrachtcontainern auf explosive oder radioaktive Substanzen,
- Flughafensicherheit: transportable Detektionsplattform zum Aufspüren von Sprengstoffspuren auf Kleidungs- oder Gepäckstücken auf Basis multispektroskopischer Nachweismethoden.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Aufgrund der in den letzten Jahren gestiegenen Zahl von Anwendungsfeldern und Einsatzszenarien im Bereich der zivilen Sicherheit ist der Bedarf nach modernen, mobilen und stationären CBRNE-Detektorssystemen gewachsen. Insbesondere die berührungslose Nah- und Ferndetektion von missbräuchlich oder waffenmäßig einsetzbaren Gefahrstoffen gewinnt an Bedeutung. Intensiv werden derzeit in Deutschland vor allem Ansätze zur Ferndetektion von Explosivstoffen, Drogen und toxischen Industriechemikalien, beispielsweise für die Kontrolle von Personen und Gütern im Transportsektor oder für den Einsatz im Katastrophenschutz

Ansätze zur
Ferndetektion

²⁰¹ Die Abkürzung steht für Chemische, Biologische, Radiologische, Nukleare und Explosive.

(z. B. bei Chemieunfällen), verfolgt. So erfordern insbesondere die hohen Steigerungsraten bei den Passagierzahlen bzw. Warenmengen im Bereich des Flughafenwesens und der Logistik die Entwicklung verbesserter Sensor- bzw. Detektionstechnologien, um notwendige Kontrollen in vertretbaren Zeit- und Kostenrahmen bewältigen zu können. Einen weiteren wichtigen Anwendungsbereich stellt die Identifizierung biologischer Gefahrstoffe, beispielsweise zur schnellen Vor-Ort-Analyse von Infektionserregern, im Rahmen des gesundheitlichen Bevölkerungsschutzes bzw. der Lebensmittelsicherheit dar.

Eine exemplarische Auswahl möglicher zukünftiger Anwendungen mit hohem Potenzial zur Problemlösung bis 2030 werden in Tabelle 17 dargestellt:

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Echtzeitfähige Frühwarnsysteme für die Spurendetektion von Gefahrstoffen	<i>Smart Dust/eGrain</i> -Technologie: autonome, miniaturisierte Systeme, die – energieautark und mit entsprechender Sensorik und drahtlosen Kommunikationskomponenten – für Mess- und Überwachungsaufgaben zur Informationsübertragung in drahtlosen Netzwerk genutzt werden könnten
<i>Stand-off</i> -Detektoren für Sprengstoffe und biologische und chemische Gefahrstoffe und Agenzien	passive oder aktive Detektorsysteme, wie z. B. THz-Detektoren ²⁰² , die z. B. Sprengstoffe oder Drogen unter Kleidung nachweisen können

²⁰² Homeland Security News Wire (2012): Standoff explosive detection takes step backward. URL: www.homelandsecuritynewswire.com/dr20121211-terahertz-waves-for-explosives-detection. Abgerufen am 22.04.2014.

Mobile Detektorsysteme zur Spurendetektion von Sprengstoffen und biologische und chemische Gefahrstoffe und Agenzien	Nanosensoren ²⁰³ : auf funktionalisierte Nanopartikel bzw. nanostrukturierete Materialsysteme basierende Sensorkonzepte (z. B. künstliche Nasen), die bereits geringste Gefahrstoffspuren in flüssigen oder gasförmigen Medien nachweisen oder als integraler Bestandteil von Schutzkleidung z. B. zum <i>Humanbiomonitoring</i> eingesetzt werden können
Mobile bzw. integrierbare Detektoren zur Spurendetektion von Sprengstoffen und gasförmigen Gefahrstoffen	Smarte <i>Low-Cost-Sensorik</i> ²⁰⁴ : über Tintenstrahl-Druckverfahren auf Basis funktionaler Polymermaterialien hergestellte intelligente Sensorsysteme

Tabelle 17: Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Sensor- und Detektionstechnologien

Darüber hinaus werden im Folgenden zwei Anwendungsbeispiele der *Stand-off*- bzw. Spurendetektion näher vorgestellt.

***Stand-off*- oder Spurendetektorsysteme**

Ein besonderes Augenmerk wird in Zukunft auf die Entwicklung autonomer, multisensorischer und miniaturisierter Detektionssysteme gerichtet sein, die z. B. auf Basis mikrosystemtechnischer Entwicklungen (z. B. *Lab on Chip*-Systeme) und neuer Sensorkonzepte – ermöglicht z. B. durch den Einsatz von Nanomaterialien – sowohl schnellere und genauere Vor-Ort-Analysen als auch den Aufbau autonom arbeitender Detektionssysteme erlauben. Langfristiges Ziel ist es, CBRNE-Sensoren zu entwickeln, die eine hohe Langlebigkeit und Robustheit mit einem breiten Einsatzspektrum in unterschiedlichen zivilen Sicherheitsszenarien verbinden.

Gerade in den wichtigen Anwendungsbereichen der *Stand-off*- oder Spurendetektion von chemischen oder biologischen Gefahrstoffspuren wird die Entwicklung autonomer bzw. miniaturisierter Lösungen wesentlich durch Forschungs- und Technologiebeiträge aus der Nanotechnologie,

Autonome,
multisensorische und
miniaturisierte
Detektionssysteme

²⁰³ Nanowerk News (2011): Nano-Sensor erkennt kleinste Mengen Plastiksprengstoff. URL: www.nanowerk.com/news/newsid=22221.php. Abgerufen am 22.04.2014.

²⁰⁴ Kuchinskas, S. (2011). Printed Sensor Detects Improvised Explosive Devices. URL: www.designnews.com/document.asp?doc_id=235216&dfpPPParams=ind_183,aid_235216&dfpLayout=article. Abgerufen am 22.04.2014.

MEMS
NEMS
Smart Dust
eGrain

Mikrosystemtechnik und den optischen Technologien bestimmt werden. So wird es durch schrittweise verbesserte Miniaturisierungstechnologien in Zukunft möglich werden, MEMS²⁰⁵- bzw. zunehmend auch NEMS²⁰⁶-Sensorkomponenten zu entwickeln, mit denen, z. B. über die *Smart Dust*²⁰⁷- oder *eGrain*-Technologie²⁰⁸, echtzeitfähige Frühwarnsysteme auf Basis drahtloser Sensornetzwerke realisiert werden können. Langfristiges Ziel der Entwicklung sind autonome, in großen Stückzahlen produzierbare Sensormodule, die wie „Staub“ in einem Gebiet verteilt werden können, um dort – energieautark und mit einer geeigneten Kommunikationsschnittstelle ausgestattet – Daten zu sammeln und an zentrale Leitstellen weiterzuleiten. Ein weiterer Ansatz der Entwicklung neuer *Stand-off*-Detektorsysteme, mit denen über größere Entfernungen hinweg Sprengstoffspuren oder bio-chemische Agenzien identifiziert werden können, bietet die Terahertz-Spektroskopie. Im THz-Bereich weisen zahlreiche chemische und biochemische Substanzen charakteristische Molekülschwingungen auf, die eine individuelle „spektrale Signatur“ erzeugen. Mittels THz-Strahlung ist es prinzipiell möglich, solche Signaturen in der Umgebungsluft oder auch durch Verpackungen hindurch zerstörungsfrei nachzuweisen. Wesentliche Voraussetzung für die Realisierung und breitere Nutzung von Terahertz-Detektorsystemen ist jedoch, dass noch bestehende technologische Hürden bisheriger Lösungsansätze, beispielsweise hinsichtlich Komplexität, geringer Effizienz und hoher Kosten, überwunden werden.

Terahertz-
Spektroskopie

3.10.3 Künstliche Intelligenz/Robotik

Fernmanipulatoren

Mobile autonome bzw. ferngesteuerte Robotersysteme stehen noch am Anfang der Erschließung für zivile (hoheitliche und privatwirtschaftliche) Sicherheitsanwendungen. Einsatzfelder sind die Bereiche Katastrophenschutz und -prävention, so z. B. für Such- und Rettungsmissionen bei Katastropheneinsätzen sowie die polizeiliche Gefahrenvorsorge und -abwehr, z. B. für die Überwachung von kritischen Infrastrukturen oder zur kurzfristigen Lageerkundung in Gefahrensituationen. Robotersysteme können Verwendung als Fernmanipulatoren bei der Bombenentschärfung finden oder sie werden als vollständig autonome Sensorplattformen eingesetzt, um wasser-, land- oder luftbasiert Gefahrensituationen frühzeitig zu erkennen und operative Entscheidungsunterstützung für Rettungs- und Einsatzkräfte zu leisten.

²⁰⁵ Abkürzung für *Micro Electro Mechanical System* (mikroelektromechanisches System).

²⁰⁶ Abkürzung für *Nano-Electro-Mechanical System* (nanoelektromechanisches System).

²⁰⁷ [berkeley.edu](http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/) (2013); *Smart Dust*. URL: <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/>. Abgerufen am 22.04.2014.

²⁰⁸ cyberphysicalsystem.de (2013); *eGrain*. URL: <http://cyberphysicalsystem.de/>. Abgerufen am: 22.04.2014.

Die nachfolgende Auflistung von Anwendungsbeispielen aus der zivilen Sicherheitsforschung bietet einen querschnittartigen Überblick zu Themen und Technologieansätzen, die den Stand der Forschung und Technik im Bereich der künstlichen Intelligenz/Robotik repräsentieren:

- Katastrophenschutz: landgestützte Robotersysteme zur Erkundung und zur Ortung verschütteter Personen,
- Gefahrenstoffdetektion: Flugroboterplattformen mit integrierter Gassensorik zur Aufklärung, Eingrenzung und Bekämpfung großflächiger Gefahrenlagen, die beispielsweise bei Chemieunfällen bzw. Großbränden auftreten,
- Krisenmanagement: intelligente Erkundungs- und dezentrale Kommunikationssysteme auf Basis kombinierter luft- und boden-gestützter Robotersysteme für den Einsatz bei großflächigen Katastrophenlagen mit zerstörter Infrastruktur.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Es ist zu erwarten, dass weitere Fortschritte zu einer erheblichen Verbesserung der Einsatz-, Steuerungs- und Kommunikationsmöglichkeiten sowohl von Einzel- als auch von Multirobotersystemen führen werden. Dazu werden Verhaltens- und Kognitionsforschung bzw. die Neurowissenschaften ebenso beitragen wie die Nanotechnologie, die Materialwissenschaften oder die Mikrosystemtechnik. Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele mit hohem Potenzial zur Problemlösung bis 2030 werden in Tabelle 18 dargestellt:

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Bergungs- und Rettungsaufgaben, Lageaufklärung (z. B. bei Großbränden bzw. Naturkatastrophen) bzw. Aufbau von Ad-hoc-Kommunikationsnetzwerken im Katastrophenfall	Schwarmrobotik ²⁰⁹ : autonom operierende und miteinander kommunizierende bzw. sich zu komplexen Systemen verbindende Multirobotersysteme

²⁰⁹ Golem.de (2013): Roboterwürfel sollen Möbel und Brücken bauen. URL: www.golem.de/news/m-blocks-roboterwuerfel-sollen-moebel-und-bruecken-bauen-1310-101993.html. Abgerufen am 22.04.2014.

Lageaufklärung bei Katastropheneinsätzen, innerhalb von Gebäuden	<i>Nano Air Vehicles</i> (NAV): miniaturisierte autonome Flugroboter
Autonome Inspektion von Frachtgütern bzw. Transportcontainern (z. B. zur Erkennung von CBRNE-Gefahren)	<i>Chemical Robots</i> (ChemBots) ²¹⁰ : weiche, flexible, die Gestalt verändernde Bodenroboter
Überwachung kritischer maritimer Infrastrukturen (z. B. Hafenanlagen, Unterseekabel oder -pipelines)	Biomimetische AUV ^{211 212} : miniaturisierte autonome Unterwasserrobotersysteme, die durch biomimetische Antriebsformen (z. B. Flossen) angetrieben werden und Sensoren (z. B. akustische Sensoren) zum Einsatz bringen können

Tabelle 18: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich künstliche Intelligenz und Robotik

Exemplarisch werden im Folgenden zwei Anwendungen aus dem Teilgebiet Künstliche Intelligenz/Robotik vorgestellt, die für den Zeithorizont 2030 und darüber hinaus zukunftsweisend sein können.

Schwarmrobotik

Nutzung der
Schwarmintelligenz

Mit den sich abzeichnenden Weiterentwicklungen in der Servicerobotik, bei den drahtlosen Sensor- und Netzwerktechnologien und im Bereich der Kommunikation und Mensch-Maschine-Interaktion wird auch die Entwicklung von Robotersystemen für unterschiedlichste Anwendungsszenarien der zivilen Sicherheit forciert werden. So wird die Weiterentwicklung mobiler Roboter für Rettungs- bzw. Katastropheneinsätze z. B. auch wesentlich von Fortschritten in der Schwarmrobotik bestimmt werden. Mit der Nutzung der sogenannten Schwarmintelligenz, wie sie beispielsweise in der Natur bei Fischschwärmen zu beobachten ist, sollen Multirobotersysteme zukünftig in die Lage versetzt werden, auf Basis bioinspirierter Algorithmen komplexe Aufgaben eigenständig zu lösen und sich damit auch in unübersichtlichem oder unbekanntem Terrain bewegen zu können.

²¹⁰ scitechdaily.com (2011): Harvard Scientists Develop \$5 Rubber Robot. URL: <http://scitechdaily.com/harvard-scientists-develop-5-rubber-robot/>. Abgerufen am 22.04.2014.

²¹¹ AUV: Abkürzung für *Autonomous Underwater Vehicles* (autonome Unterwasserfahrzeuge).

²¹² Festo AG & Co. KG (2009): AquaPenguin. URL: http://www.festo.com/cms/de_corp/9777.htm. Abgerufen am 22.04.2014.

Inwieweit die Potenziale der Schwarmrobotik bis 2030 ausgeschöpft werden können, wird nicht zuletzt von zukünftigen Entwicklungen zur Konstruktion kleiner, einfacher und kostengünstig herzustellender Einzelsysteme abhängen. Hürden in der Schwarm-Forschung stellen beispielsweise die Entwicklung verbesserter Konzepte der Schwarmkommunikation sowie von sensorbasierten Lösungen dar, mit denen man Kollisionen unbemannter autonomer Luftrobotersysteme verhindern kann (die sogenannte *Sense-and-Avoid*-Problematik).

Hürde
Sense-and-Avoid-
Problematik

Nano Air Vehicles (NAV)

Entwicklungen in der Nanotechnologie, der Mikroelektronik und Mikromechanik ermöglichen schon heute eine deutliche Verkleinerung elektronischer und mechanischer Systeme. Mit der daraus resultierenden Miniaturisierung von Bauteilen wird es auch im Bereich der Robotik möglich sein, Robotersysteme insgesamt zu verkleinern oder bei gleicher Größe und Gewicht mehr Sensoren und Aktoren zu integrieren. Das wird zwangsläufig auch zu neuen Roboter-Konzepten führen. Ein Beispiel dafür ist die Entwicklung von sogenannten *Nano Air Vehicles (NAV)*, miniaturisierten autonomen Flugrobotern in der Größe von kleinen Vögeln oder Insekten. Sie bieten u. a. neue Möglichkeiten der Aufklärung und Gefahrenabwehr in Gebäuden, können schnell zum Einsatz gebracht werden und besitzen ein geringeres Gefährdungspotenzial für den Fall, dass sie außer Kontrolle geraten sollten. Im Gegensatz zu Makro- beziehungsweise Mikrooptern, die starre Flügel oder Propeller für den Auftrieb nutzen, zeichnen sich NAV dadurch aus, dass sie das Prinzip des Fluges von Insekten oder kleinen Vögeln auf robotische Plattformen übertragen. Obwohl die aerodynamischen Effekte der Flügelbewegungen bislang noch nicht vollständig verstanden sind und beispielsweise auch der Flügelbau von Insekten hoch komplex ist, gelingt es bereits durch Vereinfachungen und Optimierungen insektengroße NAV unter Laborbedingungen ferngesteuert fliegen zu lassen.²¹³ Autonome Flüge werden bis 2030 möglich sein, wenn weitere Fortschritte in der Steuerung der Flügelbewegung gemacht werden. Darüber hinaus müssen entsprechende Konzepte und Standards für die Integration von NAV in bestehende Krisenmanagement- bzw. Entscheidungsunterstützungssysteme entwickelt werden.

Flugroboter in der
Größe von kleinen
Vögeln oder Insekten

²¹³ Harvard Microrobotics Lab (2013): Flapping-wing microrobots. URL: <http://micro.seas.harvard.edu/research.html#flapping>. Abgerufen am 22.04.2014.

3.10.4 Schutztechnik und -ausrüstung

Materialsysteme

Für den physischen Schutz kritischer Infrastrukturen ebenso wie im Bereich der persönlichen Schutzausrüstung von Rettungs- und Einsatzkräften ist die Entwicklung und permanente Verbesserung von Schutztechnologien von zentraler Bedeutung. Dazu zählen Materialsysteme, die, z. B. auf Basis hochfester Verbundmaterialien oder technischer Textilien, eine passive Sicherheitsfunktion wahrnehmen und Gebäude wie Menschen vor den Auswirkungen von Explosionen, Bränden oder CBRN-Gefahrstoffen schützen sollen. Ein wesentliches Augenmerk gilt der Entwicklung aktiver Schutzsysteme – beispielsweise über die Verwendung intelligenter Textilien – indem grundlegende schutztechnische Materialeigenschaften mit Sensor- und/oder Kommunikationskomponenten kombiniert werden. Auf diese Weise erhalten die Systeme eine zusätzliche Schutzfunktion, sodass z. B. präventiv die Vitalfunktionen von Feuerwehrleuten während eines Einsatzes überwacht oder im Nachgang einer Katastrophe der Schädigungsgrad eines Bauwerks festgestellt werden kann. Die nachfolgende Auflistung von Anwendungsbeispielen aus der zivilen Sicherheitsforschung bietet einen querschnittartigen Überblick zu Themen und Technologieansätzen, die den Stand der Forschung und Technik in diesem Bereich repräsentieren:

Aktive
Schutzsysteme

- Feuerwehr und Katastrophenschutz: intelligente oder semipermeable Schutzkleidung mit textilintegrierter Sensorik bzw. integrierter Dekontaminationsschicht zur Überwachung von Vitalparametern und zur automatischen Umgebungserfassung bzw. Detektion und Zersetzung von Gefahrstoffen,
- Gebäude- und Tunnelsicherheit: autonomes Risiko- und Informationssystem auf Basis integrierter Sensornetzwerke zur Strukturanalyse und Überwachung sicherheitsrelevanter Bauwerke.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Konzentration der
Bevölkerung in
Städten, urbanen
Regionen oder
Megacities

Vor dem Hintergrund sich erhöhter Anforderungsprofile beim Schutz von Infrastrukturen, Gebäuden und Menschen wird die Entwicklung von innovativen und anpassungsfähigen Schutztechnologien eine wichtige Zukunftsaufgabe der zivilen Sicherheitsforschung bleiben. So ist weltweit der Trend zur Konzentration der Bevölkerung in Städten, urbanen Regionen oder Megacities zu beobachten. Nach Schätzungen des UN-Zentrums für menschliche Siedlungen (UN-Habitat)²¹⁴ wird im Jahr 2050 etwa zwei Drittel der Weltbevölkerung in derartigen Regionen leben. Entsprechend müssen neben notwendigen IuK- und Sensorinnovationen

²¹⁴ UN-Habitat (2008): State of World Cities Report 2008/9. URL: www.unhabitat.org/content.asp?cid=6040&catid=7&typeid=5. Abgerufen am 22.04.2014.

auch neue Bautechnologien und -werkstoffe entwickelt werden, um zentrale Funktionen wie Sicherheit und Nachhaltigkeit zu garantieren.

Mit der fortschreitenden Entwicklung neuer Technologien und Verfahren in der Materialwissenschaft und Nanotechnologie sowie der Mikrosystemtechnik wird es zukünftig immer mehr möglich sein, für unterschiedliche zivile Sicherheits- und Einsatzszenarien maßgeschneiderte Schutzsysteme zu realisieren, in denen z. B. hochfeste keramische Werkstoffe oder bioazide Nanobeschichtungen mit robusten Aktor-Sensor-Schnittstellen für die Umfelderkennung kombiniert werden. Der Technologiebereich stellt zudem eine wichtige Entwicklungs- und Testplattform dar, auf der neueste wissenschaftliche und technische Erkenntnisse, z. B. aus der Materialforschung, einfließen und zur Entwicklung anwendungs- und branchenübergreifender Material- und Systeminnovationen, z. B. im Leichtbau, in der Textiltechnik oder im Bereich des *Systems Engineering*, beitragen.

Maßgeschneiderte
Schutzsysteme
möglich

Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele mit hohem Potenzial zur Problemlösung bis 2030 werden in Tabelle 19 dargestellt:

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Passive Schutzausrüstung bzw. -technologien für Einsatz- und Rettungskräfte	selbstheilende Werkstoffe: Materialsysteme bzw. -verbünde oder Oberflächenbeschichtungen, die z. B. über bioinspirierte Ansätze Beschädigungen selbstständig und automatisch reparieren können und so die Funktionsfähigkeit eines Bauteils aufrecht erhalten.
Integrierte Monitoringsysteme für den Schutz und die Erstversorgung von Einsatz- und Rettungskräften	<i>Drug Delivery</i> -Systeme: therapeutische mikro- bzw. nanoskalige Trägersysteme für den geschützten Transport und die gezielte Freisetzung von Wirkstoffes vor Ort (<i>targeted drug delivery</i>)

Schutz kritischer Infrastrukturen und Bauwerke (z. B. Tunnel und Brücken)	<i>Structure Health Monitoring (SHM)</i> ²¹⁵ : autonome sensorbasierte Systeme, die energieautark den Strukturzustand von Gebäuden bzw. Bauwerken überwachen
---	---

Tabelle 19: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Schutztechnik und Ausrüstung

Im Folgenden werden zwei Anwendungen aus dem Bereich der Schutztechnik und -ausrüstung näher dargestellt.

Intelligente Schutztechnologien mit autonomen Selbstreparaturmechanismen

Integration von
Mikrokapseln oder
künstlichen Gefäß-
systemen mit einem
autonomen Selbstre-
paraturmechanismus

Ein wichtiger Fortschritt für die zukünftige Realisierung intelligenter Schutztechnologien ist die Entwicklung von keramischen, metallischen oder polymeren Werkstoffen bzw. Verbundsystemen, die z. B. durch die Integration von Mikrokapseln oder künstlichen Gefäßsystemen mit einem autonomen Selbstreparaturmechanismus versehen sind, durch die auftretende strukturelle Schäden behoben werden können.²¹⁶ Solche selbstheilenden Eigenschaften sind beispielsweise für Beton, Kunststoffe oder Lacke teilweise schon in ersten kommerziellen Anwendungen realisiert und bieten im Bereich passiver Schutzsysteme vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Insbesondere im Gebiet der keramischen und metallischen Werkstoffe steht die Erforschung z. B. auch für größere strukturelle Schäden geeigneter Selbstheilungs-Mechanismen noch am Anfang. Ein wesentlicher Erfolgsfaktor für die langfristige Integration selbstheilender Werkstoffe in zivilen Sicherheitsanwendungen liegt zudem in der Entwicklung kostengünstiger Herstellungsverfahren.

²¹⁵ Sullivan, J. (2013): The walls have ears: Princeton researchers develop walls that can listen, and talk. URL: www.princeton.edu/main/news/archive/S37/69/38140/index.xml?section=topstories. Abgerufen am 22.04.2014.

²¹⁶ Meier, C. (2012): Selbstheilende Materialien – Risse, die sich von selbst schließen. URL: www.nzz.ch/wissen/wissenschaft/risse-die-sich-von-selbst-schliessen-1.17477538. Abgerufen am 22.04.2014.

Aktive Schutz- und Monitoringsysteme

Zukunftsweisende Beiträge für die Verbesserung persönlicher Schutzausrüstungssysteme sind vor allem auch aus der Nanotechnologie zu erwarten. Neben der bereits heute möglichen Realisierung funktionaler Nano-beschichtungen, z. B. für die Herstellung chemikalien- oder hitzeresistenter Kleidung, wird dabei insbesondere die Entwicklung von aktiven Monitoringsystemen eine Rolle spielen. Diese sollen nicht nur in der Lage sein, Vitalfunktionen zu überwachen und Expositionen zu erfassen, sondern z. B. in Falle von Vergiftungen oder Infektionen aktiv therapeutische Maßnahmen auf zellulärer Ebene einzuleiten. Solche auf Basis biokompatibler Nanosensoren und nanoskaliger Wirkstofftransportsysteme (oder auch *Drug-Delivery-Systeme*) zu entwickelnden nanodiagnostischen bzw. -therapeutischen Plattformen befinden sich derzeit noch im Konzeptstadium und sind Gegenstand langfristig angelegter Grundlagenforschungsprogramme.²¹⁷

Vitalfunktionen
überwachen

Expositionen erfassen

3.10.5 Simulation und Modellierung

Simulation und Modellierung im Kontext ziviler Sicherheitsszenarien hat durch die fortschreitende Vernetzung der digitalen mit der physikalischen Welt an Bedeutung gewonnen. So ist ein effektiver Schutz kritischer Infrastrukturen mit den zunehmenden geographischen und sektorspezifischen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen der Infrastruktursysteme (z. B. im Bereich Energie und Telekommunikation) immer mehr auch davon abhängig, ob Risiken oder Störfälle frühzeitig vorhergesagt bzw. beim Ausfall von Versorgungsnetzen ein koordiniertes Krisenmanagement gelingen kann. Insbesondere bei der Erkennung und Kontrolle von Paniksituationen bei Großveranstaltungen oder für die Gefahrenabschätzung bei Großschadenslagen spielen Verfahren und Methoden der Simulation und Modellierung eine immer größere Rolle. Als integrativer Bestandteil von Lage- und Entscheidungsunterstützungssystemen sollen detaillierte Risiko- und Vorhersagemodelle sowie leistungsfähige Simulationsumgebungen es ermöglichen, dass Rettungs- und Einsatzkräfte in Krisensituationen zeitnah vernetzte und koordinierte Warnungs-, Planungs-, Evakuierungs- und Versorgungsaktivitäten durchführen können.

Risiko- und
Vorhersagemodelle

Die nachfolgende Auflistung von Anwendungsbeispielen aus der zivilen Sicherheitsforschung bietet einen querschnittartigen Überblick zu Themen und Technologieansätzen, die den Stand der Forschung und Technik im Bereich der Simulation und Modellierung repräsentieren:

²¹⁷ Defense Advanced Research Projects Agency (2013). In Vivo Nanoplatforms (IVN). URL: [www.darpa.mil/Our_Work/MTO/Programs/In_Vivo_Nanoplatforms_\(IVN\).asp](http://www.darpa.mil/Our_Work/MTO/Programs/In_Vivo_Nanoplatforms_(IVN).asp). Abgerufen am 22.04.2014.

- Sicherheit von Großveranstaltungen: simulationsbasierte Entwicklung eines Evakuierungsassistenten für Multifunktionsarenen zur Vermeidung gefährlicher Stauungen bzw. hoher Personendichten bei der Evakuierung von Großveranstaltungen,
- Hochwasserschutz: Simulationssystem zur Verbesserung des Krisenmanagements bei Überschwemmungskatastrophen auf Basis der Kopplung einer Hochwasserausbreitungssimulation und der Simulation und Optimierung von Verkehrsabläufen,
- Urbane Sicherheit: simulationsbasiertes Software-Tool zur Analyse und Vorhersage der Detonationsauswirkungen (z. B. im Vorfeld von Bombenentschärfungen) bzw. zur Unterstützung der Einleitung geeigneter Gegenmaßnahmen.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Krisenprävention und
Vorsorge

Krisenreaktion und
Auswertung

Modellierung und
Simulation industrieller
Produktions- und
Logistiksysteme

Schwerpunkte von Anwendungen und Methoden der Simulation und Modellierung in zivilen Sicherheitssystemen sind sowohl im Bereich der Krisenprävention und Vorsorge (z. B. bei der Umsetzung virtueller Schulungs- oder Trainingskonzepte) als auch der Krisenreaktion und Auswertung (z. B. bei der Vorhersage infrastrukturübergreifender Kaskadeneffekte) gegeben. Wichtige Anwendungsbereiche liegen in der kontinuierlichen Steuerung und Überwachung kritischer Infrastruktursysteme, im Bereich des Katastrophenschutzes oder bei der urbanen Sicherheit.

Bedeutsame Entwicklungsimpulse sind dabei insbesondere durch das wachsende Know-how bei der Modellierung und Simulation industrieller Produktions- und Logistiksysteme, z. B. in Verbindung mit *Rapid Manufacturing* bzw. dem Konzept der digitalen Fabrik zu erwarten. Der anhaltende Ausbau von Hochleistungsrechnernetzen sowie absehbare Technologiesprünge in den Feldern *Mobile Computing*, *Computer Vision* bzw. 3-D-Technologien werden – neben der notwendigen Weiterentwicklung mathematisch-physikalischer Modelle und Softwareplattformen – in der zivilen Sicherheitsforschung die Integration von Simulations- und Modellierungsanwendungen zunehmend erleichtern.

Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele mit hohem Potenzial bis 2030 werden in Tabelle 20 dargestellt:

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Trainings-, Planungs- und Informationstools im Bereich des Krisenmanagements bzw. Katastrophenschutzes	<i>Augmented Reality (AR)</i> : computergestützte Erweiterung und kontextspezifische Anreicherung der realen Welt mit virtuellen Informationen in Echtzeit, beispielsweise erhalten Bilder oder Videos zusätzliche Informationen oder virtuelle Objekte durch Überlagerung/Einblendung.
Informations- und Entscheidungsunterstützungssysteme Bereich des Krisenmanagements bzw. Katastrophenschutzes	Kontaktlinsendisplay: Displaytechnologie, mit dem Informationen in einer Kontaktlinse vor dem Auge des Nutzers angezeigt werden können.
Softwarebasierte Stadtmodellierung und Modellierung ganzer Regionen	bis 2030 werden weltweit Städte in hoher Detailgenauigkeit im Rechner abgebildet werden können und neue Planungspotenziale im Bereich des Schutzes der Bevölkerung und der kritischen Infrastrukturen eröffnen

Tabelle 20: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Simulation und Modellierung

Die genannten Beispiele im Bereich der Simulation und Modellierung werden im Folgenden ausführlicher dargestellt und stellen beispielhaft Anwendungsmöglichkeiten dar, die für den Zeithorizont 2030 und darüber hinaus besonders zukunftsweisend sein könnten.

Augmented Reality (AR) und Augmented Vision (AV) Ansätze

Mit der ubiquitären Präsenz digitaler Kommunikationstechnologien und den wachsenden technologischen Fähigkeiten zur Verarbeitung und Handhabung großer Datenmengen werden zukünftig auch immer mehr Verfahren der *Augmented Reality (AR)* bzw. *Augmented Vision (AV)* im

Anzeige von
Echtzeit-
Informationen

Virtuelle, interaktive
Trainings- und
Schulungskonzepte

Bereich der Simulation und Modellierung Einzug halten.²¹⁸ Denkbare Anwendungsszenarien in der zivilen Sicherheit sind beispielsweise neben der Anzeige von Echtzeit-Informationen in Planungs- und Simulationstools vor allem mit der Realisierung virtueller, interaktiver Trainings- und Schulungskonzepte verbunden. Wichtige Voraussetzung für die Integration von AR- bzw. AV-Systemen ist dabei die Entwicklung intuitiver und natürlicher zu bedienender Interaktionstechniken, die beispielsweise auf neuen und verbesserten 3-D-Visualisierungstechniken basieren. Im Fokus stehen dabei u. a. stereoskopisch arbeitende Displays und Ausgabegeräte sowie Interaktionslösungen für räumliche Daten. Das betrifft die Weiterentwicklung multimodaler Benutzerschnittstellen, die über Sprache, Gestik sowie Haptik Echtzeit-Interaktionen mit virtuellen Welten ermöglichen, aber auch neuartige AR-Displaykonzepte. Ein zukunftsweisendes Konzept – neben den zu erwartenden Fortschritten bei der Einführung von Datenbrillen – stellt hier die Entwicklung von hoch auflösenden, farbigen Kontaktlinsendisplays dar, mit denen Daten direkt auf das Auge projiziert werden können. Bisherige Forschungsergebnisse²¹⁹ zeigen zwar die generelle Machbarkeit, jedoch sind bis zur marktfähigen Realisierung noch zahlreiche Herausforderungen zu lösen, u. a. im Bereich der Energieversorgung und Datenübertragung.

Hoch auflösende,
farbige
Kontaktlinsendisplays

3.10.6 Biometrie und Mustererkennung

Zuweisung physischer
Zugangsrechte

Moderne Mustererkennungstechnologien zur automatisierten Erkennung und Auswertung von Rohdaten (z. B. in Form von Bild-, Sprach oder Textinformationen) kommen in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen der zivilen Sicherheit zum Einsatz, z. B. im Bereich der Detektion, der Videoüberwachung, der Identifizierung von Produktfälschungen oder in der digitalen Forensik. Sie sind darüber hinaus Grundlage der Entwicklung biometrischer Systeme, durch die auf Basis elektronisch lesbarer biometrischer Daten (z. B. Fingerabdrücke oder Iris) Personen identifiziert und verifiziert werden können. Als integraler Bestandteil intelligenter, IT-gestützter Sicherheitssysteme ermöglichen sie sowohl die Zuweisung physischer Zugangsrechte für sicherheitsrelevante Gebäude und Flächen (z. B. in Flughäfen) als auch logische Zugangssicherungen (z. B. zu mobilen Internetdiensten oder Kommunikationsgeräten).

Zugangssicherungen

Die nachfolgende Auflistung von Anwendungsbeispielen aus der zivilen Sicherheitsforschung bietet einen querschnittartigen Überblick zu The-

²¹⁸ Doolin, C. et al. (2013): Augmented Government: Transforming government service through augmented reality. Deloitte Consulting LLP. URL: http://www.deloitte.com/assets/Dcom-UnitedStates/Local%20Assets/Documents/Federal/us_fed_augmented_government_060613.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.

²¹⁹ CHIP Digital GmbH (2011): Kontaktlinsen-Display: Pixel im Auge. URL: www.chip.de/news/Kontaktlinsen-Display-Pixel-im-Auge_53038271.html. Abgerufen am 22.04.2014.

men und Technologieansätzen, die den Stand der Forschung und Technik im Bereich der Biometrie und Mustererkennung repräsentieren:

- Kriminalitätsbekämpfung: multibiometrische Software-Systemlösung für die (semi-) automatisierte Erkennung von Straftätern aus Bild- bzw. Videodaten,
- Krisenmanagement: *Visual Analytics*-System zur Darstellung komplexer Krisensituationen anhand von grafischen Auswertungen zur Unterstützung von Leitstand- oder Einsatzverantwortlichen,
- Kritische Infrastrukturen: mobiles, in IuK-Endgeräten integriertes Biometriesystem zur Benutzerauthentifikation auf Basis eines Netzhautscanners,
- Flughafensicherheit: Röntgenbildanalysesoftware für Gepäckscanner zur automatischen Erkennung gefährlicher Gegenstände (z. B. Schusswaffen) im Fluggepäck,
- Öffentlicher Personennahverkehr: automatisiertes Detektionssystem zur präventiven und datenschutzkonformen Erkennung interventionsbedürftiger Situationen in öffentlichen Räumen (z. B. auf Bahnhöfen) auf Basis intelligenter Videoanalyse.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Der Einsatz und die Entwicklung zukünftiger Mustererkennungstechnologien, z. B. für mobile biometrische Authentifizierungssysteme oder Analyse-Werkzeuge in der IT-Forensik, wird im wesentlichen Maße von weiteren Fortschritten digitaler Informations- und Internettechnologien, aber auch von der wachsenden Bedeutung von Datenschutztechnologien und *Privacy-by-Design*-Konzepten bestimmt.

Privacy-by-Design

Mit weiteren technologischen Fortschritten, beispielsweise im Bereich optischer Technologien oder der maschinellen Bildverarbeitung, und mit der wachsenden Vernetzung von Anwendungen im „Internet der Dinge und Dienstleistungen“ wird die Entwicklung innovativer biometrischer Verfahren und Mustererkennungstechnologien – beispielsweise für mobile Einsatzszenarien oder für die automatisierte Informations- und Datenanalyse – einen breiten Raum einnehmen.

Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele werden in Tabelle 21 dargestellt:

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Lagedarstellung und Entscheidungsunterstützung von BOS bzw. Leitstellen kritischer Infrastrukturen	<i>Visual Analytics</i> : interdisziplinärer Ansatz zur automatischen Analyse und interaktiven Visualisierung sehr großer Datenmengen, in dem u. a. Ansätze aus den Bereichen <i>Data Mining</i> , Datenbankmanagement und der Informationsvisualisierung einfließen.
Frühwarnsysteme für den Schutz und die Überwachung kritischer Infrastrukturen; Untersuchungsmethoden im Bereich der digitalen Forensik zur Strafverfolgung von Cyberkriminellen	Verhaltensanalyse bzw. -biometrie: umfasst biometrische Mustererkennungs- bzw. Identifikationsverfahren, die sich auf verhaltenstypische Charakteristika von Menschen beziehen, wie etwa die Anschlagsdynamik auf Tastaturen, Gestik, Gangstil oder Sprachverhalten

Tabelle 21: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Biometrie und Mustererkennung

Technologien wie RFID, *Ambient Intelligence*, Smartphones, die immer stärkere Nutzung von *Social Networking*-Plattformen, drahtlose Maschine-zu-Maschine-Lösungen und sensorbasierte Messungen jeglicher Art führen zu einem exponentiellen Anstieg des Datenaufkommens. Der intelligente Umgang mit großen Datenmengen (*Big Data*) könnte in Zukunft ein wichtiger Anwendungsbereich der zivilen Sicherheitsforschung sein und wird hier daher exemplarisch näher vorgestellt.

Intelligenter Umgang mit großen Datenmengen (*Big Data*)

Bis 2017 sollen jährlich etwa 1,4 Zettabyte ($1,4 \times 10^{21}$ Byte) an elektronischen Daten generiert werden.²²⁰ IBM geht davon aus, dass 90% aller weltweit verfügbaren Daten allein in den letzten zwei Jahren entstanden sind.²²¹

²²⁰ Cisco Systems (2013): The Zettabyte Era—Trends and Analysis. URL: www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/VNI_Hyperconnectivity_WP.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.

²²¹ IBM (2013): What is Big Data?. URL: www.ibm.com/big-data/us/en. Abgerufen am 22.04.2014.

Ein zentraler Entwicklungsraum zukünftiger Daten- und Mustererkennungstechnologien ist mit dem Begriff *Big Data* verbunden, der für den intelligenten Umgang mit großen Datenmengen steht. Technologisch umfasst er u. a. die echtzeitnahe Prozessierung, Analyse, Speicherung und Bereitstellung großer digitaler Datenmengen bzw. das Auffinden neuartiger oder bislang unbekannter Informationen und Muster. Kennzeichnend für *Big Data* ist, dass solche Massendaten zumeist heterogen und in vielfältigsten Modi und medialen Formen (z. B. Audio, Video, Grafik, Bild, Text) vorliegen und von derzeitigen Technologien auf Basis relationaler Standarddatenbanken und Daten-Management-Tools nicht oder nur unzureichend verarbeitet werden können. Einen vielversprechenden Weg zur automatischen Analyse komplexer Datenmengen und ihrer graphischen Darstellung eröffnet die *Visual Analytics*-Forschung, in der in interdisziplinären Ansätzen *Data-Mining*-Methoden und dreidimensionale Visualisierungstechnologien mit Erkenntnissen aus der Kognitionsforschung kombiniert werden. Durch die Integration von *Visual Analytics*-Tools können zukünftig beispielsweise logistische Prozesse optimiert, Lagebilder in Katastrophenfällen zeitnäher dargestellt oder Verbreitungsmuster von Krankheiten frühzeitiger identifiziert werden. In zivilen Sicherheitsszenarien werden *Social Media*- bzw. *Crowdsourcing*-Anwendungen²²² oder die Nutzung und Fusion verfügbarer Sensordaten gerade im Risiko- und Krisenmanagement in Zukunft immer bedeutsamer werden, um z. B. im Katastrophenfall aus der Masse häufig unstrukturierter Daten, wertvolle Lageinformationen zur Entscheidungsunterstützung oder zur Einleitung von Gegenmaßnahmen (z. B. zur Evakuierung der Bevölkerung) erhalten zu können. Neben weiteren notwendigen Fortschritten bei der Speicherung und Bereitstellung großer Datenmengen wird zukünftig ein Hauptaugenmerk auf die Entwicklung neuer Algorithmen und Strategien zur *Big Data*-Analyse gerichtet sein, in der verschiedene Analysearchitekturen und -technologien miteinander verknüpft und große Datenmengen – unabhängig von Umfang, Variabilität und Komplexität der Daten – mit hoher Verarbeitungsgeschwindigkeit analysiert werden können. Als eine der zentralen Herausforderungen wird überdies die datenschutzverträgliche Gestaltung von *Big Data*-Technologien angesehen.²²³

Prozessierung, Analyse, Speicherung und Bereitstellung großer digitaler Datenmengen

Auffinden neuartiger oder unbekannter Informationen und Muster

Visual Analytics

Data-Mining

Nutzung und Fusion verfügbarer Sensordaten

Datenschutzverträgliche Gestaltung

²²² Gangadharan, S. P. (2013): How can big data be used for social good?. URL: www.theguardian.com/sustainable-business/how-can-big-data-social-good?CMP=&et_cid=36922&et_rid=231470&Linkid=How%20can%20big%20data%20be%20used%20for%20social%20good?. Abgerufen am 22.04.2014.

²²³ Weichert, T. (2013): Prism, Big Data und der Datenschutz – bei uns und in den USA. URL: www.datenschutzzentrum.de/bigdata/20130709-bigdata-und-prism.html. Abgerufen am 22.04.2014.

3.10.7 Navigations-, Beobachtungs- und Ortungstechnologien

Lageinformationen
Such- und Ortungs-
technologien
Fernerkundungs-
systeme
Geoinformations-
dienste

Mit der weltweit wachsenden Zahl von Naturkatastrophen, humanitären Notsituationen und zivilen Gefahrenlagen ist auch der Bedarf nach zeitnahen, präzisen und flächendeckenden Lageinformationen sowie leistungsfähigen Such- und Ortungstechnologien gestiegen. So können im Rahmen eines modernen Katastrophenschutzes satellitengestützte und luftgestützte²²⁴ Fernerkundungssysteme sowie Geoinformationsdienste dabei helfen, die immer komplexeren und zunehmend grenzüberschreitenden Einsatz- und Entscheidungsabläufe durch Bereitstellung zeitnaher Kriseninformationen zu beschleunigen. Darüber hinaus sind die Einsatz- und Rettungskräfte gerade bei großräumigen Katastrophenlagen darauf angewiesen, in unübersichtlichem Terrain (z. B. in Gebäuden oder auf einem Trümmergelände) mit hoher Genauigkeit und über größere Distanzen hinweg die Position von Helfern oder verschütteten Personen zu bestimmen. Die nachfolgende Auflistung von Anwendungsbeispielen aus der zivilen Sicherheitsforschung bietet einen querschnittartigen Überblick zu Themen und Technologieansätzen, die den Stand der Forschung und Technik in diesem Bereich repräsentieren:

- Katastrophenschutz und -hilfe: mobiles, radargestütztes Ortungssystem zur Lokalisierung verschütteter Personen auf Basis eines Bioradars (Doppler-Radarsystem) und passiver Handyortung,
- Feuerwehr und Katastrophenschutz: mobile Orientierungs- und Navigationssysteme auf Basis verteilter Sensoreinheiten, die im Falle schlechter Sichtbedingungen die Einsatzkräfte bei der Erkundung von Einsatzorten unterstützen oder textilintegrierte Ortungssysteme, die sowohl über ein körpernahes Sensornetz Vital- und Umgebungsparameter erfassen als auch über selbstorganisierende Funksensorknoten die Lokalisierung von Einsatzkräften ermöglichen.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Entwicklung mobiler
Endgeräte und
Anwendungs-
umgebungen

Die immer größere zeitliche und räumliche Verfügbarkeit globaler Fernerkundungsdaten hat auch deren breitere Anwendung und Integration im Sektor des nationalen und europäischen Krisen- und Katastrophenmanagements begünstigt. Unterstützt wird diese Entwicklung durch die in den letzten Jahren kontinuierlich gesunkenen Kosten für die Datenübertragung und -speicherung und die mit der Technologie verbundenen Automatisierungspotenziale (z. B. bei der Interpretation von Fernerkundungsdaten). Mit der zu erwartenden Weiterentwicklung satelliten- und landge-

²²⁴ Etwa über unbemannte HALE(*High Altitude Long Endurance*)-Flugsysteme, die in großer Flughöhe (über 15.000 m) agieren können und über eine große Reichweite (über 24 h) verfügen.

stützter Krisenmanagementsysteme, Geoinformationsdienstleistungen, z. B. im Rahmen des europäischen Copernicus-Programms,²²⁵ und den Fortschritten im Bereich funk- bzw. radarbasierter Ortungs- und Lokalisierungssysteme wird insbesondere die Entwicklung mobiler Endgeräte und Anwendungsumgebungen ein zentrales Forschungsthema bleiben.

Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele werden in Tabelle 22 dargestellt:

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Koordinierung von Rettungs- und Einsatzkräften bzw. Lagedarstellung bei Rettungs- und Bergungseinsätzen innerhalb von Gebäudestrukturen	<i>Indoor Navigation</i> : drahtlose, echtzeitbasierte Systeme zur Ortung und Navigation von Personen innerhalb von Gebäuden und urbanen Umgebungen
Unterstützung von Rettungs- und Einsatzkräften bei der Lokalisierung, Bergung und Rettung gefährdeter bzw. verschütteter Personen	<i>Through-the-Wall-Radar</i> : ²²⁶ radarbasiertes System zur Detektion und Ortung von Personen in Gebäuden
Echtzeitfähige Lagedarstellung in Risiko- und Krisenmanagementsystemen zur lageangepassten Einsatzvorbereitung, Gefährdungsbeurteilung und Einsatzdurchführung bei Naturkatastrophen	Nano-/Pico-/Femto-Satelliten: ^{227,228} Kleinstsatelliten mit der Masseneinteilung: Nano (1–10 kg), Pico (0,1–1 kg) und Femto (< 0,1 kg)

Tabelle 22: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen im Bereich Navigations, Beobachtungs- und Ortungstechnologie

²²⁵ Das europäische Erdbeobachtungsprogramm „Copernicus“ (bis Dezember 2012 unter dem Kürzel GMES – *Global Monitoring for Environment and Security* – bekannt) ist eine gemeinsame Initiative der Europäischen Union und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA). Das Copernicus-System besteht aus einer Beobachtungs-Infrastruktur und Informationsdiensten. Bei den Beobachtungen unterscheidet man zwischen den satellitengestützten Messungen der Weltraumkomponente und den sonstigen (in situ) Beobachtungen.

²²⁶ Schmidt, F. (2012): Mit einem Radar durch Wände sehen. URL: www.dw.de/mit-einem-radar-durch-waende-sehen/a-16314472. Abgerufen am: 18.10.2013.

²²⁷ Institut für Luft- und Raumfahrt TU Berlin(2013): Berliner Experimental- und Ausbildungssatellit (BEESAT-4). URL: www.raumfahrttechnik.tu-berlin.de/menue/forschung/aktuelle_projekte/beesat-4/. Abgerufen am: 18.10.2013.

²²⁸ www.pro-physik.de (2012). Schlaue Nanosatelliten: aus dem Hörsaal ins All. URL: www.pro-physik.de/details/news/1669219/Schlaue_Nanosatelliten_aus_dem_Hoersaal_ins_All.html. Abgerufen am: 18.10.2013.

Nachfolgend werden exemplarisch zwei der aufgelisteten Anwendungen aus den Bereichen der *Urban* bzw. *Indoor Navigation* vorgestellt.

Urban bzw. Indoor Navigation

Navigation in engen
Häuserschluchten,
Tunneln oder
Gebäuden

Ein Hauptentwicklungsfeld liegt zukünftig im Bereich *Urban* bzw. *Indoor Navigation*, d. h. der Entwicklung von Navigationssystemen, die auch in engen Häuserschluchten, Tunneln oder Gebäuden bzw. in kritischen Umgebungen (z. B. in Katastrophengebieten) funktionieren. Derartige Navigationssysteme beinhalten eine Vielzahl technischer Herausforderungen. Da eine alleinige Positionierung mittels Satellitennavigationssignalen, z. B. aufgrund des erheblichen Abschirmungseffektes in Gebäuden aus Stahlbeton, nicht realisiert werden kann. In zahlreichen Ansätzen wird deshalb an hybriden Lösungen auf Basis mobiler IuK-Geräte (z. B. Smartphones) bzw. drahtloser Kommunikationstechnologien (z. B. RFID-, WLAN- oder Ultrabreitbandtechnologie) gearbeitet. So werden beispielsweise sensorbasierte Trägheitsnavigationssysteme²²⁹ mit verschiedenen funkbasierten Lokalisierungstechniken kombiniert, um mittelfristig echtzeitfähige und positionsgenaue Navigations- und Ortungssystemen entwickeln zu können.

Wichtige Impulse für die weitere Entwicklung stammen dabei aus der MEMS-Technologie (z. B. zur Herstellung präziserer Bewegungssensoren) oder aus den Bereichen der Sensor-Daten-Fusion, des maschinellen Lernens bzw. der *Machine to Machine*-Kommunikation. Zukünftige Herausforderungen betreffen vor allem die unterbrechungsfreie *Indoor-Outdoor*-Navigation und Positionsbestimmung (*Seamless Navigation*), die insbesondere für *Location based Service*-Anwendungen in zivilen Sicherheitsszenarien als Schlüsseltechnologie angesehen wird.²³⁰ Ein langfristiges Ziel stellt die Realisierung visueller Navigationssysteme dar, die über geräteintegrierte Kameras und unabhängig von Funknetzen auch in unübersichtlichen oder dynamischen 3-D-Navigationsumgebungen genutzt werden können.

Seamless Navigation

Radarbasierte Personenortung

Detektion und Ortung
von Personen inner-
halb von Gebäuden
oder in großflächigen
Trümmergebieten

Einen weiteren, zukünftig im Kontext der zivilen Sicherheit relevanter Ansatz ist die radarbasierte Detektion und Ortung von Personen innerhalb von Gebäuden oder in großflächigen Trümmergebieten, mit denen z. B. verschüttete Menschen oder im Einsatz befindliche Rettungskräfte lokalisiert werden können. Hier werden es beispielsweise Verbesserun-

²²⁹ Trägheitsnavigationssystem oder auch Inertiales Navigationssystem (*Inertial Navigation System* (INS)): Navigationssystem, das mithilfe von z. B. in Smartphones integrierten Bewegungssensoren kontinuierlich die Position, die Orientierung, und die Geschwindigkeit eines Objekts bzw. des Gerätebesitzers bestimmen kann.

²³⁰ Ein Entwicklungsbeispiel im Kontext ziviler Sicherheitsanwendungen stellt das DLR-Projekt „Galileo/GPS Indoor Navigation & Positionierung (INDOOR)“ dar (Laufzeit 12/2005 bis 12/2012) URL: www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2439/3577_read-5290/. Abgerufen am 22.04.2014.

gen und Weiterentwicklungen bestehender *Through the Wall-Radar*(TWR)-Technologien, z. B. im Bereich der Ultrabreitbandtechnologien (z. B. beim Antennendesign oder bei den Radarauswertungsverfahren und -algorithmen), künftig ermöglichen, leichte und mobile Ortungssysteme zu realisieren, die in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung sowohl sich bewegende als auch ruhende Objekte bzw. Personen erfassen und dreidimensional darstellen können.

Through the Wall-Radar



3.11 Materialwissenschaft und Werkstofftechnik

Erforschung und Entwicklung von Materialien und Werkstoffen

Konstruktions- und Funktionswerkstoffe

Verstehen und Nutzen des Zusammenhangs zwischen der inneren Struktur und den Eigenschaften von Materialien

Trend zu Multimaterialsystemen

In Anlehnung an die englischsprachige Bezeichnung *Materials Science and Engineering* hat sich in Deutschland seit einigen Jahren der Begriff Materialwissenschaft und Werkstofftechnik für die interdisziplinären Fachgebiete, die sich mit der Erforschung und Entwicklung von Materialien und Werkstoffen befassen, etabliert. Als Werkstoffe bezeichnet man Materialien, aus denen technisch relevante Bauteile hergestellt werden. Entsprechend der jeweiligen Aufgabe, die sie erfüllen, lassen sie sich grob in Konstruktions- und Funktionswerkstoffe trennen. Während die Materialwissenschaft eher naturwissenschaftlich geprägt ist und die Herstellung und Charakterisierung von Materialien zum Gegenstand hat, beschäftigt sich die Werkstofftechnik mit der ingenieurwissenschaftlichen Entwicklung von Werkstoffen, Fertigungs- und Verarbeitungsverfahren sowie der Prüfung von Werkstoffen in Bauteilen im Einsatz. Beide Teilbereiche des Fachgebiets sind eng miteinander verknüpft und befassen sich mit einem breiten Spektrum an Materialklassen und Werkstoffgruppen.²³¹

Kern der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik ist das Verstehen und Nutzen des Zusammenhangs zwischen der inneren Struktur von Materialien und den sich daraus ergebenden mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften. Dabei stehen Materialien und Werkstoffe am Anfang der Wertschöpfungskette für ein breites Spektrum an Produkten mit einer erheblichen wirtschaftlichen Hebelwirkung in unterschiedlichen Industriezweigen. So hängt das Vorantreiben der Grenzen des technisch Möglichen in vielen Bereichen von der Entwicklung von Werkstoffen mit passgenauen, zum Teil einzigartigen Eigenschaftsprofilen und deren Integration in komplexe Systemlösungen ab. Der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik kommt somit eine zentrale Schlüssel- und *Enabler*-Rolle zu für Innovationen und technische Lösungen in nahezu allen gesellschaftlich relevanten Bedarfsfeldern – wie Energieversorgung, Klima- und Umweltschutz, Mobilität, Gesundheit, Sicherheit und Kommunikation.²³²

Ein wesentlicher Trend in der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik ist die zunehmende Diversifizierung der eingesetzten Werkstoffe und die Entwicklung hin zu Multimaterialsystemen. Dabei verfolgt man das

²³¹ Wikipedia (ohne Jahreszahl): Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. URL: www.de.wikipedia.org/wiki/Materialwissenschaft_und_Werkstofftechnik. Abgerufen am 22.04.2014.

²³² BMBF (2010): 10-Punkteprogramm zu Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. URL: www.bmbf.de/pubRD/10_Punkteprogramm_zu_Materialwissenschaft_und_Werkstofftechnik.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.

Prinzip, für jedes Bauteil oder jede Einzelkomponente den Werkstoff auszuwählen, der die jeweiligen Anforderungen am besten erfüllt. Dadurch nimmt die Zahl der eingesetzten Materialien und Werkstoffvarianten stetig zu. Es entstehen neuartige Materialkombinationen in Verbundwerkstoffen und Hybridbauweisen, und die Entwicklung von Techniken zum Fügen verschiedenartiger Werkstoffe gewinnt an Bedeutung. Weitere wichtige Randbedingungen, die bei der Auswahl des richtigen Werkstoffs eine immer größere Rolle spielen, sind die Verfügbarkeit der erforderlichen Rohstoffe, der Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz der jeweiligen Anwendung und die Möglichkeit zum Recycling oder zur Wiederverwendung nach der Nutzungsphase des jeweiligen Produkts.

Hybridbauweisen
Techniken zum Fügen
verschiedenartiger
Werkstoffe

Der aktuelle Entwicklungsstand, das Anwendungspotenzial, die technologischen Herausforderungen und die Entwicklungsdynamik variieren von einem Werkstoff zum anderen sehr stark. Ebenso sind die Entwicklungen in den verschiedenen Werkstoffgruppen sehr eng mit der jeweiligen Verfahrens- und Prozesstechnik zur industriellen Herstellung und Verarbeitung verknüpft. Daher erfolgt die Gliederung der weiteren Betrachtung anhand der Werkstoffgruppen: (1) Eisenbasis-Legierungen, Stahl, (2) Nichteisenmetalle, (3) Keramiken, (4) Glas, (5) Polymere/Kunststoffe, (6) Halbleiter, (7) Biowerkstoffe, (8) Verbundwerkstoffe, (9) textile Werkstoffe, (10) Funktionsmaterialien, (11) mineralische Baustoffe.

3.11.1 Eisenbasis-Legierungen, Stahl

Nach DIN EN 10020 sind Stähle Eisen-Kohlenstoff-Verbindungen mit 0 bis maximal 2,06% Kohlenstoffanteil.²³³ Damit werden jedoch einige der heute bekannten und genutzten Stahlliegierungen nicht vollständig abgedeckt. Es besteht eine große Vielfalt an Stahlsorten, die sich in ihrer Zusammensetzung und ihren Eigenschaften zum Teil erheblich voneinander unterscheiden. Eine grobe Einteilung erfolgt in die drei Hauptgüteklassen: unlegierte Stähle (unlegierte Qualitätsstähle und unlegierte Edelstähle), nicht rostende Stähle (mit einem Chromanteil von mindestens 10,5%²³⁴, oft umgangssprachlich als „Edelstahl“ bezeichnet) und andere legierte Stähle. Allein in der Datenbank der europäischen Stahlregistratur sind über 2.500 Stahlsorten verzeichnet.²³⁵ Neben dem Hauptbestandteil Eisen können Stähle weitere Metalle und nicht metallische Komponenten enthalten. Je nach Zusammensetzung und Abkühlungsgeschwindigkeit bei der Herstellung ergibt sich eine innere Gefügestruktur, die die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs bestimmt. Wichtige

Große Vielfalt an
Stahlsorten

²³³ DIN (Hrsg.) (2000): Begriffsbestimmungen für die Einteilung der Stähle; Deutsche Fassung EN 10020:2000. Berlin, Beuth Verlag.

²³⁴ Ebd.

²³⁵ StahlDat SX. (ohne Jahreszahl): Startseite. URL: www.stahldaten.de/de/startseite/. Abgerufen am 22.04.2014.

Legierungselemente für Stahl sind Kohlenstoff, Chrom, Kupfer, Cobalt, Mangan, Molybdän, Nickel, Niob, Vanadium, Wolfram, Zirkon, Bor, Phosphor und Silizium.

Ausdifferenzierter
Massenwerkstoff

Stahl ist ein ausgereifter und für viele Anwendungen ausdifferenzierter Massenwerkstoff. Dennoch werden Stahlsorten den Anforderungen der jeweiligen Anwendung entsprechend weiterentwickelt und optimiert. Je nachdem welche Legierungselemente mit welchem Mengenanteil beigelegt werden, können Härte, Zugfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Verschleißfestigkeit und Hitzebeständigkeit des Stahlwerkstoffs gesteigert werden. Solche Entwicklungen finden in der Regel durch enge Zusammenarbeit der Stahlindustrie mit den entsprechenden Anwenderbranchen (Maschinenbau, Automobilbau, Bauwesen etc.) in Innovationsverbänden statt. Sollen neue Anwendungen erschlossen werden, sind neue, passgenaue Lösungen der Stahlhersteller erforderlich. Dabei geht es nicht nur um die Entwicklung neuer Eigenschaftsprofile sondern häufig um Prozessinnovationen bei der Herstellung und Verarbeitung von Stahlprodukten. Insbesondere mit dem Maschinenbau und der Automobilindustrie bildet die deutsche Stahlindustrie einen im internationalen Wettbewerb erfolgreichen Innovations-Cluster.²³⁶

Prozessinnovationen
bei der Herstellung
und Verarbeitung von
Stahlprodukten.

Sehr breites Anwen-
dungsspektrum

Stahl ist ein Massenwerkstoff mit einem sehr breiten Anwendungsspektrum. Die folgende Auflistung enthält daher nur einige innovative Anwendungsbeispiele, ist aber bei Weitem nicht vollständig. Neben den vielfältigen Anwendungen als Konstruktionswerkstoff werden auch viele Werkzeuge aus besonders verschleißfesten Stahlsorten hergestellt. Anwendungsbeispiele, die ein hohes Lösungs- und Innovationspotenzial aufweisen bzw. voraussichtlich auch noch bis 2030 aufweisen werden, sind:

- Leichtbau im Fahrzeugbau mit hoch- und höchstfesten Stählen in Karosserie, Fahrwerk und Antriebsstrang,
- Komponenten aus hochfesten und temperaturbeständigen Stählen zur Steigerung des Wirkungsgrads thermischer Kraftwerke,
- Getriebekomponenten, Rotorwelle, Generatorgehäuse, Turmsegmente, Fundament (bei *Offshore*-Anlagen) für Windkraftanlagen,
- Bewehrungsstahl für Stahlbetonbauweisen; Leichtbauelemente aus Stahl für Dächer, Fassaden, Gebäudehüllen, Tragkonstruktionen.

²³⁶ RWI (2011): Die volkswirtschaftliche Bedeutung einer Grundstoffindustrie am Beispiel der Stahlindustrie. URL: www.stahl-online.de/Deutsch/Linke_Navigation/MedienLounge/_Dokumente/120118_RWI_Studie.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Stahl wird auch im Jahr 2030 ein Grundwerkstoff für ein breites Anwendungsspektrum sein, das sich von dem heutigen nicht grundlegend unterscheiden wird (siehe Anwendungsbeispiele oben). Vor allem durch die Wirkungsgradsteigerung fossiler Kraftwerke, den Ausbau der erneuerbaren Energien und Leichtbaukonzepte im Fahrzeugbau mit innovativen Stahlwerkstoffen bestehen große Potenziale zur Einsparung von CO₂-Emissionen in diesen Anwendungsfeldern. Allerdings ist die Herstellung von Stahlprodukten mit einem hohen Energieeinsatz und entsprechend hohen CO₂-Emissionen verbunden. Für den Zeithorizont 2030 und darüber hinaus besteht daher die zentrale Aufgabe darin, das Verhältnis aus eingesparten CO₂-Emissionen durch die Anwendung neuer Stahlwerkstoffe und den Emissionen, die bei der Produktion dieser Stähle entstehen, zu verbessern.²³⁷ Die Stahlindustrie in Europa hat sich daher zum Ziel gesetzt, die CO₂-Intensität der Stahlproduktion mittelfristig drastisch zu reduzieren.^{238,239}

Große Potenziale zur Einsparung von CO₂-Emissionen in Anwendungsfeldern von Stahl

CO₂-Intensität der Stahlproduktion mittelfristig drastisch reduzieren

Es wird geschätzt, dass in den EU-27-Staaten 4% bis 7% der anthropogenen CO₂-Emissionen auf den Stahlsektor zurückgehen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die modernsten Anlagen der europäischen Stahlindustrie hinsichtlich Energieeffizienz bereits heute nahe an dem Limit dessen arbeiten, was mit den derzeit verfügbaren Technologien erreicht werden kann. Unter der Voraussetzung, dass die besten verfügbaren Technologien flächendeckend eingesetzt werden, ist in Europa bis 2030 eine weitere Reduktion der CO₂-Emissionen bei der Stahlproduktion von höchstens 21% möglich, bezogen auf das Jahr 2010.²⁴⁰ Daher wird eine signifikant darüber hinausgehende Reduzierung der CO₂-Emissionen des

²³⁷ The Boston Consulting Group et al. (Hrsg.) (2010): CO₂-Bilanz Stahl – Ein Beitrag zum Klimaschutz. URL: www.stahlonline.de/medien_lounge/Hintergrundmaterial/ReportCO2BilanzStahl20100226adjustedfinalwithchangesv3.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.

²³⁸ EUROFER (Hrsg.) (2013): A steel roadmap for a low carbon Europe 2050. URL: www.eurofer.be/eurofer/Publications/pdf/2013-Roadmap.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.

²³⁹ The Boston Consulting Group, Stahlinstitut VDEh (Hrsg.) (2013): Steel's contribution to a low-carbon Europe 2050 – Technical and economical analysis of the sector's CO₂ abatement potential. URL: www.stahlonline.de/Deutsch/Linke_Navigation/MedienLounge/_Dokumente/130613_BCG_Low-Carbon_Roadmap.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.

²⁴⁰ Pardo, N. et al. (2012): Prospective scenarios on energy efficiency and CO₂ emissions in the EU iron & steel industry. Luxembourg, Joint Research Centre of the European Commission.

Stahlsektors ohne die Einführung neuer, bahnbrechender Technologien bei der Stahlproduktion nicht zu bewerkstelligen sein.²⁴¹

Projekt ULCOS

Im Rahmen des von der Europäischen Kommission geförderten Projekts ULCOS (*Ultra Low CO₂ Steelmaking*) haben sich die führenden Stahlhersteller der Europäischen Union, Partner der Energie- und Bauwirtschaft, Forschungseinrichtungen und Universitäten zusammengeschlossen, um neue Technologien zu entwickeln, mit denen der CO₂-Ausstoß bei der Stahlproduktion um mindestens 50% gegenüber den gegenwärtig effektivsten Technologien reduziert werden kann. Dabei gelten die folgenden vier technologischen Ansätze als vielversprechende Kandidaten für eine technische Umsetzung zwischen 2020 und 2040: *Hochofenverfahren mit Gichtgasrückführung*, *Hlsarna Schmelz-technologie*, *Direktreduktions-Technologie*, *Elektrolyse-Technologie*.²⁴²

3.11.2 Nichteisenmetalle

Metall-Legierungen, bei denen Eisen nicht das Hauptelement ist

Generell werden als Nichteisenmetalle (NE-Metalle) alle Metalle außer Eisen bezeichnet sowie alle Metall-Legierungen, bei denen Eisen nicht das Hauptelement ist bzw. der Anteil an reinem Eisen unter 50% liegt. Die reinen NE-Metalle lassen sich technisch unterteilen in Edelmetalle (z. B. Gold, Silber, Platinmetalle), Schwermetalle (z. B. Kupfer, Blei, Zink) und Leichtmetalle (z. B. Aluminium, Magnesium, Titan). Insgesamt bilden die reinen NE-Metalle, einschließlich den Selten-Erd-Metallen, die größte Gruppe im Periodensystem mit etwa 70 natürlich vorkommenden chemischen Elementen. Zu den typischen Metalleigenschaften, die bei den verschiedenen NE-Metallen allerdings unterschiedlich stark ausgeprägt sind, gehören Leitfähigkeit für Elektrizität und Wärme, Festigkeit und Duktilität, also die Fähigkeit sich plastisch zu verformen ohne zu brechen, Reflexion von Licht, Reaktionsfähigkeit (z. B. mit Sauerstoff) bzw. Korrosionsbeständigkeit.

Legierungen aus zwei oder mehreren Komponenten

Für viele Anwendungen werden nicht die reinen Metalle, sondern Legierungen aus zwei oder mehreren Komponenten eingesetzt. Kupfer-Zink-Legierungen sind beispielsweise als Messing bekannt. Durch die Kombination von verschiedenen Metallen kann das Eigenschaftsprofil der daraus entstehenden Legierung gezielt verändert und für die jeweilige Anwendung optimiert werden. Welche innere Struktur die Elemente einer Legierung miteinander bilden und welche Auswirkungen sich daraus auf die Eigenschaften der Legierung ergeben, hängt von der Art und Anzahl

²⁴¹ Europäische Kommission (2013): Aktionsplan für eine wettbewerbsfähige und nachhaltige Stahlindustrie in Europa. URL: http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/metals-minerals/files/steel-action-plan_de.pdf. Abgerufen am: 22.04.2014.

²⁴² ULCOS Website. URL: www.ulcos.org/de/research/home.php. Abgerufen am 22.04.2014.

der Legierungspartner, ihrem Massenanteil an der Legierung und der Temperatur ab.

In der Metallurgie von NE-Metallen wie Kupfer oder Aluminium unterscheidet man zwischen Gusslegierungen und Knetlegierungen. Gusslegierungen werden entweder in Form von Barren oder als noch flüssige Schmelze in Gießwerken in die gewünschte Bauteilform gegossen. Knetlegierungen hingegen sind durch ihre Zusammensetzung so optimiert, dass sie sich als Halbzeug durch Pressen, Walzen, Ziehen und Schmieden weiterverarbeiten lassen. Viele NE-Legierungen sind zudem zum Schweißen oder Löten geeignet. Moderne Legierungen weisen immer komplexere Zusammensetzungen auf. Dabei gewinnen Methoden der Simulation und Modellierung bei der Legierungsentwicklung zunehmend an Bedeutung.

Gusslegierungen
Knetlegierungen

Nichteisenmetalle werden aus natürlich vorkommenden Erzen gewonnen, deren Vorkommen und wirtschaftliche Verfügbarkeit mehr oder weniger stark begrenzt sind. Insbesondere ist die strategische Verfügbarkeit bestimmter metallischer Rohstoffe, z. B. einige der Seltenerd-Metalle, mittelfristig als kritisch zu betrachten. Daher besteht ein nicht unerheblicher Teil zukünftigen FuE-Bedarfs darin, seltenerdarme oder -freie Alternativmaterialien für Magneten in Windrädern und Elektroantrieben oder für Elektronikkomponenten zu entwickeln.

Verfügbarkeit einiger
Seltenerd-Metalle
mittelfristig kritisch

Die Herstellung der reinen NE-Metalle ist generell sehr energieintensiv und mit hohen CO₂-Emissionen verbunden. Andererseits sind NE-Metalle in der Regel ohne Verlust ihrer Eigenschaften sehr gut recycelbar, sodass durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen der Ressourcen- und Energiebedarf deutlich reduziert werden kann.

Gut recycelbar

Anwendungsbeispiele, die ein hohes Lösungs- und Innovationspotenzial aufweisen bzw. voraussichtlich auch noch bis 2030 aufweisen werden, sind:

- Leichtbau mit Legierungen auf Basis von Aluminium, Magnesium, Titan im Fahrzeug- und Flugzeugbau,
- elektrische Leitungen und Kontakte aus Kupfer, Aluminium, Silber, Gold in Elektronik und Elektrotechnik,
- Hochtemperaturbauteile aus Nickel-Basis-Legierungen („Superlegierungen“) in Fluggasturbinen und Kraftwerksturbinen,
- Elektrodenmaterialien in Batterien und Brennstoffzellen,
- Wasserstoffspeicher aus hochporösen Metallhydriden,
- Platinmetalle für Katalysatoren,
- Hochleistungsmagnete für Windräder und Elektroantriebe.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Ein immer besseres Verständnis der Zusammenhänge zwischen innerer Struktur und Werkstoffeigenschaften, die Entwicklung aufwendigerer Legierungszusammensetzungen, eine kontrolliertere Prozessführung bei der Herstellung von Legierungen sowie die Kombination mit anderen Materialien zu Hybridwerkstoffen ermöglichen die Realisierung stetig anspruchsvollerer Eigenschaftskombinationen von NE-Metallen. Dadurch bleiben Metalle in vielen Anwendungsfeldern auch gegenüber neueren alternativen Werkstoffen weiter konkurrenzfähig, z. B. die Leichtmetalle für den Leichtbau in Konkurrenz zu faserverstärkten Kunststoffen. Beispiele für mögliche zukünftige Anwendungsfelder im Teilgebiet Nichteisenmetalle zeigt Tabelle 23.

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Metallische Gläser	hochwertige Sportgeräte, Skalpelle, Implantate, Luft- und Raumfahrtkomponenten, mikromechanische Bauteile
Metall-Luft-Batterien	Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge
Informations- und Kommunikationstechnik	Plasmonikbauteile aus nanostrukturierten Metalloberflächen
Zellulare metallische Werkstoffe	neuartige Leichtbaukomponenten
Medizintechnik	permanente Implantate, Herzschrittmacher (z. B. neue Titanlegierungen), Stents (Nickel-Titanlegierungen) usw.; biologisch abbaubare Implantate (Magnesium-, Calcium- oder Eisenbasislegierungen)

Tabelle 23: Zukünftige Anwendungsbeispiele für Nichteisenmetalle

Als besonders zukunftsweisend für den Zeithorizont bis 2030 und darüber hinaus sind Entwicklungen im Bereich metallischer Gläser und Anwendungen im Bereich elektrochemischer Energiespeicher zu sehen.

Anwendungsbeispiel Metallische Gläser

Aus bestimmten Metalllegierungen lassen sich unter besonderen Voraussetzungen sogenannte metallische Gläser herstellen. Darunter versteht man Legierungen, die nicht in kristalliner sondern in amorpher, glasartiger Struktur vorliegen und diesen Zustand über einen Phasenübergang (den sogenannten „Glasübergang“) erreichen. Dazu ist es notwendig, die Kristallisation beim raschen Abkühlen der Schmelze zu verhindern. Durch immer komplexere Legierungszusammensetzungen aus Komponenten mit unterschiedlichen Atomgrößen kann dieser Vorgang gezielt verzögert werden. Während nach ihrer Entdeckung Mitte der 1950er Jahre zunächst nur sehr dünne Folien, Bänder und Fasern aus metallischen Gläsern hergestellt werden konnten, ist es daher heute auch möglich, kleine massive Bauteile mit Abmessungen von einigen Millimetern aus diesem Material zu fertigen. Solche massiven metallischen Gläser können einzigartige Kombinationen von Werkstoffeigenschaften besitzen, die anders nicht zu realisieren sind: Sie sind härter als kristalline Legierungen und haben eine sehr hohe Festigkeit. Dadurch sind sie besonders verschleißbeständig und kratzfest. Sie weisen zudem eine hohe Elastizität auf, d. h. eingebrachte mechanische Energie führt nicht zu einer Verformung, sondern wird als Rückfedern des Materials zurückgegeben. Dabei zeigen sie gleichzeitig eine höhere Korrosionsbeständigkeit als metallische Legierungen ähnlicher Zusammensetzung. Einige metallische Gläser haben außergewöhnliche weichmagnetische Eigenschaften und gleichzeitig einen hohen elektrischen Widerstand, was sie vor allem für den Einsatz in Transformatoren interessant macht. Nachteilig ist, dass metallische Gläser sehr spröde sind und bei zu starker Belastung sich nicht verbiegen sondern schlagartig zerbrechen. Allerdings deuten neuere Entwicklungen darauf hin, dass einige Legierungen eine für bestimmte technische Anwendungen ausreichende Zähigkeit aufweisen, die teilweise durch mechanische Vorverformung verbessert werden kann.

Neben den besonderen mechanischen und magnetischen Eigenschaften metallischer Gläser besteht eine wesentliche Motivation zur Verwendung dieser Werkstoffgruppe auch in den Möglichkeiten der Formgebung, die für Metalle eher ungewöhnlich sind und sich an Verfahren aus der Kunststoffindustrie orientieren. Dazu gehören die Formgebung beim Abschrecken der Schmelze, z. B. beim Druckguss, oder auch das thermoplastische Formen im Temperaturfenster der unterkühlten Schmelze knapp über der Glastemperatur. Die Möglichkeit des Gießens mit Dauerformen eröffnet eine wirtschaftliche Alternative zum Feinguss mit verllorener Form. Durch thermoplastische Formgebungsverfahren wie „Prägen“ oder „Blasformen“ können hochfeste Bauteile in Endform hergestellt werden. Die amorphe Struktur ermöglicht dabei eine Oberflächenstrukturierung im Submikrometerbereich und erfordert nur noch sehr geringen Aufwand für die Nachbearbeitung. Die endkonturnahe Fertigung wird erleichtert

Kristallisation beim raschen Abkühlen der Schmelze verhindern

Massive metallische Gläser können einzigartige Kombinationen von Werkstoffeigenschaften besitzen

Möglichkeiten der Formgebung

Immer größere
Bauteile aus
metallischen Gläsern

durch den im Vergleich zum kristallinen Material geringeren Schrumpf bei der Abkühlung aus der Schmelze.

Durch Weiterentwicklung der Legierungszusammensetzungen und der Prozesstechnologie werden in Zukunft immer größere Bauteile aus metallischen Gläsern hergestellt werden können. Mit der Legierungsentwicklung einhergehend werden auch Umformverfahren, z. B. Kalt- und Warmwalzen, und Verbindungstechniken wie Löten oder Schweißen für metallische Gläser nutzbar. Dadurch lassen sich eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten für diese vergleichsweise junge Werkstoffklasse erschließen.

Das Anwendungspotenzial reicht von hoch belastbaren Sportgeräten, etwa Golf- und Tennisschläger, Skier und Fahrräder, über extrem robuste und schwingungsdämpfende Konstruktionen in der Luft- und Raumfahrt, medizinische Anwendungen, z. B. Skalpelle und Implantate, hochwertigen Schmuck und Gerätegehäuse bis zu Anwendungen in der Energieversorgung, etwa in verlustarmen Großtransformatoren oder in Wasserstoffspeichern.^{243,244}

Anwendungsbeispiel Metall-Luft-Batterien

Deutlich höhere Spei-
cherkapazitäten mit
reinen Metallanoden

Die Steigerung der Energiedichte von wiederaufladbaren Batterien ist bei der aktuellen Lithium-Ionen-Technologie durch die begrenzte Fähigkeit limitiert, Lithium-Ionen durch Interkalation in den Elektrodenmaterialien zu konzentrieren. Deutlich höhere Speicherkapazitäten sind mit reinen Metallanoden zu erreichen. Das wesentliche Problem einer Li-Metall-Elektrode besteht bislang im unkontrollierten verästelten Wachstum von auf der Elektrodenoberfläche angelagerten Li-Ionen. Dieser Effekt führt zu irreversiblen Kapazitätsverlusten und bei einem Kurzschluss zwischen den Elektroden zur Zerstörung der Batteriezelle. Dies war ursprünglich die Hauptmotivation für die Entwicklung der heute verwendeten Aktivmaterialien, in die die Lithium-Ionen dispergiert eingelagert werden, auf Kosten der erreichbaren Energiedichte. Auf der Kathodenseite kann weiteres Gewicht eingespart werden, wenn statt eines aktiven Elektrodenmaterials der Luftsauerstoff als Reaktionspartner genutzt wird. Die theoretische Energiedichte einer Lithium-Luft-Zelle beträgt nahezu 12.000 Wh/kg. Man geht davon aus, dass in einer realen Batterie über 4.000 Wh/kg möglich sind. Batterien mit solchen Energiedichten würden das Problem der geringen Reichweite von heutigen Elektroautos endgültig lösen. Allerdings gibt es hier noch großen Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Steigerung der Zyklenfestigkeit solcher Metall-Luft-

Problem der geringen
Reichweite von heuti-
gen Elektroautos
endgültig lösen

²⁴³ Faupel, F. et al. (2010): Metallische Gläser – robust und extrem vielseitig. URL: www.weltderphysik.de/gebiete/stoffe/metalle/metallische-glaeser/. Abgerufen am 22.04.2014.

²⁴⁴ Langner, R. et al. (2012): Metallische Gläser. URL: <http://werkstoffzeitschrift.de/blogwerkstoffe/metallische-glaeser/>. Abgerufen am 22.04.2014.

Batterien. Bisher sind nur Zelldemonstratoren im Laboraufbau realisiert worden. Da Lithium mit Wasser exotherm reagiert, muss die Luft, aus der der Sauerstoff für die Kathodenreaktion entnommen wird, vollständig von Wasserdampf und auch CO₂ befreit werden. Parallel zu Lithium-Luft-Batterien wird auch an Zink-Luft-, Magnesium-Luft- und Aluminium-Luft-Systemen gearbeitet. Darüber hinaus befinden sich auch Systeme metallischer Anode und Schwefel als Kathodenmaterial (z. B. Na-S, Li-S) für zukünftige Batteriegenerationen der Post-Lithium-Ionen-Ära in der Entwicklung.²⁴⁵

3.11.3 Keramiken

Keramiken sind aufgrund ihrer werkstofftechnischen Alleinstellungsmerkmale in mehreren ganz unterschiedlichen Industrien und Branchen wirtschaftlich bedeutende Werkstoffe. Keramiken sind nichtmetallisch-anorganische Festkörper, die sowohl in kristalliner als auch nicht kristalliner Form vorliegen können. Grundsätzlich zeichnen sich Keramiken durch ihre herausragende mechanische, thermische und chemische Beständigkeit aus. Keramische Werkstoffe werden unterteilt in Gebrauchskeramiken und technische Keramiken. Bei den technischen Keramiken wird wiederum unterschieden zwischen Struktur- und Funktionskeramiken. Die Strukturkeramiken stehen in vielen konstruktiven Anwendungen in direkter Konkurrenz zur etablierten Werkstoffklasse der Metalle und ihre Legierungen. Vorteile gegenüber Metallen sind vor allem das meist deutlich geringere Gewicht bei extremer chemischer und thermischer Beständigkeit sowie erheblich höhere Bruchfestigkeit und Härte. Aus Funktionskeramiken bestehen überwiegend elektrische Isolatoren, Weich- und Hartmagneten und eine Vielzahl leitender Keramiken. Zu letzteren zählen Halbleiter, Ionenleiter und elektrische Leiter. Aufgrund dieser herausragenden Eigenschaften sind Keramiken trotz ihrer im Allgemeinen sehr hohen Herstellungskosten unentbehrlich für viele technologische Industriezweige.

Technische Keramiken

Strukturkeramiken

Funktionskeramiken

Im Folgenden sind einige Anwendungsbeispiele von Keramiken aufgelistet, die ein hohes Innovationspotenzial aufweisen bzw. voraussichtlich auch noch bis 2030 aufweisen werden:

1. Gebrauchskeramiken z. B. für Bau- und Sanitärkeramik wie Ziegel, Fliesen, Dachziegel, Steingut und -zeug, Porzellan, Tonwaren,
2. Strukturkeramiken z. B. für Lager, Dichtungen, Ventile, Filter Auskleidungen/Beschichtungen, in mechanisch und thermisch beanspruchter hochkorrosiver Umgebung wie in Kraftwerken, Turbinen, Motoren, Maschinen, Photovoltaikanlagen, bei Kataly-

²⁴⁵ Thielmann, A. et al. (2010): Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterie 2030. Karlsruhe, Fraunhofer ISI.

satorträgern, Zerspanungswerkzeugen, Hochleistungsbremsen, Implantaten und Wirkstoffträgern für die Medizin,

3. Funktionskeramiken für Bauelemente der Elektrotechnik (z. B. Isolatoren in Mikrochips, Platinen, Schutzschaltern und bei Hochspannungsleitungen), (opto-)elektronische und sensorische Komponenten (z. B. Kondensatoren, Frequenzfilter), der Aktorik (Piezo- und Pyroelektrizität), Katalysatoren, Stromtransport (z. B. ionenleitende Membranen, Hochtemperatur-Supraleitung).

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Die momentane Forschung beschäftigt sich mit der Entwicklung von Keramiken hinsichtlich der Optimierung der Herstellungsverfahren und Bauteileigenschaften für verschiedene Anwendungen. Mit neuen Fertigungsverfahren lassen sich komplexe, hochbeanspruchbare Bauteile in größerer Dimension ebenso wie filigrane hochpräzise Mikrobauteile in einem Formgebungsschritt kostengünstig herstellen. Das Keramik-Spritzgussverfahren beispielsweise eröffnet höhere Formgebungsfreiheitsgrade im Vergleich zu herkömmlichen Fertigungsverfahren, sodass aufwendige mechanische Nachbearbeitungen entfallen. Auch durch Ultraschallbearbeitung keramischer Werkstoffe gelingt es, die Serienfertigung keramischer Präzisionsbauteile erheblich zu beschleunigen und dabei gleichzeitig die Materialausbeute zu verbessern. Solche alternativen Verfahrensentwicklungen gelten als ressourcenschonende und wirtschaftliche Alternative zum konventionellen Fräsen und Schneiden aus einem Vollmaterial.^{246,247} Tabelle 24 zeigt zukünftige Anwendungsbeispiele von Hochleistungskeramiken.

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt	hochintegrierte keramische Elektronik- und Sensorikmodule in der Elektronik und Informations- und Kommunikationstechnik, besonders für extreme Bedingungen in der Fahrzeugtechnik, Luft- und Raumfahrt, Satellitentechnik sowie Datenverarbeitung und –

²⁴⁶ Kläger Spritzguss GmbH & Co. KG (ohne Jahreszahl): Zukunftswerkstoff Keramik. Dornstetten.

²⁴⁷ Fraunhofer IKTS (ohne Jahreszahl): Pulverspritzguss. URL: www.ikts.fraunhofer.de/de/forschungsfelder/verfahrenbauteile/formgebung/pulverspritzguss.html. Abgerufen am 22.04.2014.

	speicherung, dafür werden Hochleistungskeramiken in Form von Substraten, Folien, Dickschichten und dünnen (Multilagen-)Schichten zur Realisierung hochdielektrischer Gateoxide in Leistungshalbleitern benötigt
Energietechnik, Elektronik	Hochtemperatur-Wärmedämmung in Kraftwerken; neuartige keramische Energiewandler (piezoelektrische und thermoelektrische Systeme, ²⁴⁸ Brennstoffzellen) für einen zuverlässigeren und kostengünstigeren Einsatz in der Energietechnik, beispielsweise werden hocheffiziente integrierte thermoelektrische Energiekonverter entwickelt zur Gewinnung elektrischer Energie aus Systemabwärme für energieautarke Systeme (u. a. tragbare, mobile Konsumerelektronik wie Notebooks, Tablets, Mobiltelefone, Nutzung der Abgaswärme für die Bordnetzversorgung im Auto) und zur Wärmeabfuhr bei elektronischen Komponenten, z. B. lokale Kühlung von Halbleiterchips.

²⁴⁸ Piezoelektrische Systeme sind elektromechanische Wandler, die mechanische Energie in elektrische Energie umwandeln, thermoelektrische Systeme wandeln Wärme in elektrische Energie um. In beiden Fällen geht es um die Energiegewinnung aus ambienten Energiequellen, d. h. aus Umgebungstemperaturen, Sonnenlicht, Vibrationen, Druck oder anderen physikalischen Größen.

Automobil- und Maschinenbau	mechanisch hoch beanspruchbare Keramikkomponenten (z. B. Einspritz- und Brennerdüsen, Ventile, Turbolader, Gleitlager, Pumpen, Schneid- und Schleifwerkzeuge)
Umwelttechnik und Lebensmittelindustrie	Keramiken mit definierter Porosität bzw. Filterfunktion für die Wasseraufbereitung und Gasseparation
Medizintechnik	Keramik-Implantate (z. B. Gelenkprothesen, Zahnersatz); aufgrund ihrer Biokompatibilität, Verschleißbeständigkeit und Unempfindlichkeit gegenüber Chemikalien oder Korrosion sind biomedizinische keramische Implantate die optimale Lösung für durch Krankheiten, Infektionen oder andere durch Komplikationen bedingte Probleme

Tabelle 24: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen von Hochleistungskeramiken

In dem besonders zukunftsweisenden Anwendungsbeispiel „Wärmedämmschichten in Kraftwerken“ wird das Innovationspotenzial von Hochleistungskeramiken für den Zeithorizont bis 2030 und darüber hinaus näher beschrieben.

Wärmedämmschichten in der Kraftwerkstechnik

Für die fossile Energieerzeugung müssen bestehende und zukünftige Keramikkomponenten gesteigerte thermische und mechanische Belastbarkeit aufweisen, um die geforderten Effizienzverbesserungen durch Betriebstemperaturen oberhalb 1500 °C zu erreichen. Hochleistungskeramiken mit ihrer enormen Verschleißfestigkeit, Temperaturbeständigkeit und hohen Korrosionsbeständigkeit können künftig als verbesserte Schutzschichten in Gas- oder Dampfturbinen von Kraftwerken genutzt werden, um die Betriebszuverlässigkeit und Lebensdauer entscheidend zu erhöhen. Diese Schichten müssen widerstandsfähig sein gegen kontinuierliche extreme Bedingungen wie sehr hohe Temperaturen, Lastwechsel und variierende Zusammensetzungen der Brennstoffe. Dazu werden zukünftig neue Keramiken und neue mikroporöse Strukturen zum Einsatz kommen. Mikroporöse Strukturen wirken durch ihre Luftporen isolierend. Je größer die Anzahl der Poren ist, desto besser ist die Wärme-

Hochleistungskeramiken als verbesserte Schutzschichten in Gas- oder Dampfturbinen von Kraftwerken

Mikroporöse Strukturen

dämmung. Bis zu 95% der Wärmestrahlung können durch solche mikro-porösen Strukturen reflektiert werden. Um dies zu erreichen, werden neue Keramiken (Pyrochlore wie das $Gd_2Zr_2O_7$, Perowskite wie $SrZrO_3$ oder (Hexa-) Aluminate) entwickelt. Auf diese Weise wird angestrebt, einen neuen Markt für Gasturbinen in der dezentralen Energieversorgung, insbesondere auch für den Synthesegaseinsatz, zu β en.^{249,250}

3.11.4 Glas

Allgemein ist Glas ein Sammelbegriff für amorphe (d. h. nicht kristalline) Feststoffe, die in der Regel durch Erstarren einer Schmelze hergestellt werden. Prinzipiell können Gläser aus sehr vielen, unterschiedlichen Materialien hergestellt werden. Die technisch mit Abstand bedeutendsten Glasarten sind jedoch die Silikatgläser, deren Hauptbestandteil Sand (Siliziumdioxid) ist. Wichtigste Vertreter dieser Gruppe von Gläsern sind die Kalknatronsilikatgläser, Borosilikatgläser und Bleisilikatgläser. Glas aus reinem Siliziumdioxid bezeichnet man als Quarzglas.

Silikatgläser

Glas ist ein sehr vielseitiger und wandlungsfähiger Werkstoff mit einer Reihe von günstigen Eigenschaften. So ist Glas formstabil und trotzdem formbar, es ist weitgehend chemisch resistent, inert, geschmacksneutral und gasdicht. Gläser, die Menschen im Alltag begegnen sind in der Regel optisch transparent und gegebenenfalls gefärbt. Je nach Anforderungen an die Eigenschaften, die sich aus der jeweiligen Anwendung ergeben, wird die Zusammensetzung sowie das passende Herstellungs- und Formgebungsverfahren gewählt. Flachglas wird beispielsweise heute überwiegend im sogenannten Floatverfahren produziert. Bei diesem Verfahren wird die Glasschmelze über ein flüssiges Zinnbad geleitet. Die Herstellung von Behälterglas erfolgt größtenteils in einem zweistufigen Verfahren. Zuerst wird in einer Vorform das sogenannte Kübel hergestellt und daran anschließend in der Fertigform zum fertigen Produkt ausgeblasen. Darüber hinaus werden zahlreiche Glasprodukte durch Press- oder Gießverfahren gefertigt. Für viele Einsatzzwecke durchläuft Glas weitere Veredelungsschritte. So können etwa durch chemisches Härten in einem Salzbad die Festigkeitseigenschaften von Glas erheblich verbessert werden. Durch Aufbringen von Schichten lassen sich die Transmissionseigenschaften für Licht, Wärme- und UV-Strahlung verändern.

Flachglas

Behälterglas

Veredelungsschritte

²⁴⁹ Synthesegas ist ein brennbares Gasgemisch aus Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Wasserstoff, das als Endprodukt beim Vergasungsprozess von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen entsteht, z. B. bei der Vergasung von Kohle, Biomasse, Abfällen zur Energiegewinnung oder der Dampfreformierung von Erdgas.

²⁵⁰ Jülich Forschungszentrum (2012): Hitzeschutz in der Turbine. URL: [http://www.fz-jue-lich.de/portal/DE/Forschung/EnergieUmwelt/DynamischeKraftwerke/Waermedaemmschichten/artikel.html?nn=362930](http://www.fz-juelich.de/portal/DE/Forschung/EnergieUmwelt/DynamischeKraftwerke/Waermedaemmschichten/artikel.html?nn=362930). Abgerufen am 22.04.2014.

Gute Recycling-
eigenschaften

Da Glas sehr gute Recyclingeigenschaften hat, spielen bei der Glasproduktion neben den Primärrohstoffen auch aufbereitete Glasscherben eine große Rolle. So bestehen Glasflaschen heute zu 60 bis 90% aus Altglas. Bei Flachglas und anderen Glasprodukten ist die Quote deutlich geringer. Zudem wird dort aus Qualitätsgründen meist nur auf Produktionsscherben zurückgegriffen und nicht auf gesammelte Altprodukte.

Anwendungsbeispiele, die aktuell ein hohes Lösungs- und Innovationspotenzial aufweisen bzw. voraussichtlich auch noch bis 2030 aufweisen werden, sind:

- Behälterglas: Getränkeflaschen, Verpackungen für Lebensmittel, Kosmetik- und Pharmaprodukte,
- Flachglas: Fenster- und Architekturglas im Bauwesen, Automobilverglasungen, Spiegel, Displayglas, Solarglas für Photovoltaik und Solarthermie,
- optisches Glas: optische Bauteile (Linsen, Prismen, Spiegel) für optische Systeme wie Objektive, Mikroskope, Teleskope,
- Glasfaserkabel zur optischen Datenübertragung mit hoher Bandbreite,
- glasfaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau, Bootsbau, Windkraftanlagenbau.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Glas immer mehr ein
Hightech-Werkstoff

Nachgelagerte Veredelungsschritte, Kombinationen mit anderen Werkstoffen und Integration neuer Eigenschaften führen dazu, dass Glas immer mehr ein Hightech-Werkstoff wird, der in etablierten Anwendungsbereichen zusätzlich Funktionen übernimmt und neue Anwendungsfelder erschließt. Beispiele hierfür, die besonders zukunftsweisend für den Zeithorizont bis 2030 und darüber hinaus sind, sind der Einsatz von intelligenten, schaltbaren Verglasungen in verschiedenen Anwendungsbereichen und die Nutzung von Glas im Straßenbau. Beispiele für mögliche zukünftige Anwendungsfelder im Teilgebiet Glas zeigt Tabelle 25.

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Schaltbare Verglasungen	Fenster und Glasfassaden mit intelligenter Verschattungsfunktion
<i>Solar Roadways</i>	Straßenbelag aus Glasmodulen, in die Solarzellen und weitere Funktionen integriert sind
Luft- und Raumfahrt	Flugzeuge mit Panoramadach

Tabelle 25: Zukünftige Anwendungsbeispiele von Glas

Anwendungsbeispiel Schaltbare Verglasungen

Aus architektonischen, ökobilanziellen und bauökonomischen Gründen werden für moderne Gebäudefassaden zur effektiven Nutzung der einstrahlenden Sonnenenergie verschiedene Verglasungs- und Verschattungssysteme entwickelt. Insbesondere kann durch eine intelligente Tageslichtnutzung der Energiebedarf zum Heizen oder Kühlen von Gebäuden reduziert werden. Dabei werden die Glasflächen entweder mit thermisch oder elektrisch schaltbaren Schichten beschichtet.²⁵¹

Intelligente
Tageslichtnutzung

Thermische schaltbare Schichten, welche die Transmissionseigenschaften des Glases verändern, sind im Normalzustand strahlungsdurchlässig, verringern bei Überschreiten eines bestimmten Temperaturbereichs ihren Transmissionswert und werden teilweise absorbierend oder streuend für Strahlung. Aufgrund dieser Effekte wird zwischen thermochromen und thermotropen Schichten unterschieden. Eine thermochrome Schicht verändert ihre Farbe bzw. ihr Absorptionsverhalten oder ihr Reflexionsverhalten ab einer bestimmten Temperatur. Diese Schicht absorbiert bei hohen Temperaturen die auftreffende Strahlung und wandelt diese in Wärme um, sodass diese nicht durch die Fensterscheibe treten kann. Auf diese Weise wird verhindert, dass bei hohen Temperaturen Wärme in den Raum eindringen kann, während bei niedrigen Temperaturen die solare Wärme eintreten und im Raum genutzt werden kann. Bei einer thermotropen Schicht erfolgt oberhalb einer bestimmten Schalttemperatur ein Wechsel von Transparenz zu einem milchig-weißen Zustand. Die dabei sich ausbildenden bzw. frei werdenden Partikel oder Kristalle besitzen gegenüber dem restlichen Material einen unterschiedlichen Brechungsindex. Dadurch wirkt die Scheibe streuend bzw. reflektierend für das auftreffende Licht.

Thermische
schaltbare Schichten

Elektrisch schaltbare Schichten erreichen eine Änderung der optischen Eigenschaften durch einen elektrischen Strom oder ein elektrisches Feld. Insbesondere elektrochrome Schichten, die in Wärmeschutzverglasungen integriert werden, können als Sonnenschutzverglasungen in Fassaden bzw. Fenstern oder auch Fahrzeugscheiben eingesetzt werden. Solche Verglasungen bestehen aus einem Doppelglas, in das ein funktionaler Schichtverbund eingeschlossen ist. Wird eine Spannung angelegt, so findet ein Transport von Ladungsträgern innerhalb der funktionalen Schicht statt, die zur Ausbildung von Farbzentren und damit zu einem Farbwechsel bzw. zu einer Änderung der Lichtdurchlässigkeit führt.

Elektrisch
schaltbare Schichten

²⁵¹ Lang, J. (ohne Jahreszahl): Hightech-Materialien für Gebäudefassaden. URL: www.ecotec-energiesparhaus.de/fileadmin/Daten/BINE-Hightech-fuer-Gebaeuefassaden.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.

Anwendungsbeispiel *Solar Roadways*

Module aus extrem hartem Glas

Das in den USA entwickelte Konzept der *Solar Roadways* sieht vor, dass ein Großteil des Straßennetzes dazu genutzt wird, durch Photovoltaik elektrische Energie zu erzeugen. Dazu sollen bisherige Straßenbeläge aus Beton und Asphalt durch Module aus extrem hartem Glas ersetzt werden, in die neben Solarzellen zur Stromerzeugung noch eine Reihe weiterer Funktionen integriert sind:

Solarzellen zur Stromerzeugung

LEDs zur Beleuchtung, zur Anzeige von Markierungen und Warnhinweisen

So können beispielsweise LEDs zur Beleuchtung, zur Anzeige von Markierungen und Warnhinweisen eingebaut werden und Heizelemente können helfen Schnee- und Eisglätte zu vermeiden. Für die Verkehrsflussoptimierung können Sensoren in den Straßenbelag integriert werden. Außerdem kann das Straßennetz gleichzeitig als Verteilernetz für den erzeugten Strom fungieren. Dieses Anwendungsszenario stellt eine anspruchsvolle Kombination von hohen Anforderungen an den zu verwendenden Glaswerkstoff. Zunächst muss das Glas extreme Härte und Tragfähigkeit aufweisen, um auch hohen Belastungen etwa durch darüberfahrende Lkw standhalten zu können. Zudem muss die Oberfläche durch ein entsprechendes Herstellungsverfahren derart strukturiert sein, dass sie einen mit Asphalt vergleichbaren Grip gewährleistet. Damit durch Verschmutzungen die Effizienz der solaren Energiegewinnung nicht beeinträchtigt wird, ist eine selbstreinigende Funktionalität der Glasoberfläche vorgesehen.²⁵²

3.11.5 Polymere/Kunststoffe

Enorme Entwicklungen auf dem Gebiet der Polymere

Auf dem Gebiet der Polymere hat es in den letzten Jahrzehnten enorme Entwicklungen gegeben. Durch die stetige Entwicklung verschiedener Kunststoffmaterialien wurden immer mehr Einsatzmöglichkeiten mit unterschiedlichen Anforderungen, insbesondere im Maschinenbau, in der Bau-, Elektro- und Automobilindustrie sowie bei Verpackungen realisiert. Kunststoffe ersetzen als hochwertige Werkstoffmaterialien immer häufiger Metalle, Glas, Holz, Baumwolle und andere Materialien.

Makromolekulare chemische Verbindungen

Polymere sind makromolekulare chemische Verbindungen, welche in Form von Ketten oder verzweigten Molekülen aus einer großen Anzahl von sich wiederholenden, kleinen Grundbausteinen (Monomere) aufgebaut sind. Polymere können aus verschiedenen Monomer-Arten zusammengesetzt sein, wobei die Anzahl der Monomere typischerweise zwischen 1.000 und 100.000 betragen kann. Daraus ergeben sich zahlreiche unterschiedliche Strukturvarianten. Neben den polymeren Naturstoffen wie Holz, Wolle oder Bernstein stellt die chemische Industrie synthetische Polymere bzw. Kunststoffe zur Verfügung. Je nach strukturellem

²⁵² Trösch, T. (2012): Auf der Sonnenseite der Straße. URL: www.spektrum.de/alias/zukunft-der-mobilitaet/auf-der-sonnenseite-der-strasse/1151889. Abgerufen am 22.04.2014.

Aufbau und den Eigenschaften der Polymere wird zwischen Elastomeren, Duroplasten²⁵³ und Thermoplasten²⁵⁴ unterschieden. Elastomere sind breitmaschig vernetzt und sehr elastisch. Duroplaste weisen ein engmaschiges Netzwerk auf und sind spröde. Diese beiden Kunststoffgruppen lassen sich nicht schmelzen. Thermoplaste bestehen aus fadenförmigen oder nur leicht verzweigten Molekülketten, sie können aus der Schmelze geformt und unter bestimmten Bedingungen wieder aufgeschmolzen und erneut geformt werden, ohne einen Verlust ihrer Eigenschaften zu erfahren.

Elastomere

Duroplaste

Thermoplaste

Die große Eigenschaftsvielfalt der Polymere, welche durch Blends (Mischung aus Polymeren) und Komposite (Mischung aus Polymeren und anorganischen Additiven bzw. Fasern) noch stark erweitert werden kann, führt zu einem breiten Anwendungsspektrum von sehr kostengünstigen Massenprodukten wie Einkaufstüten und Trinkbecher aus Polyethylen (PE) oder Bodenbeläge aus Polyvinylchlorid (PVC) bis hin zu technischen Kunststoffen für Hightech-Anwendungen, z. B. flexible Schaltungsträger für Elektronikbauteile, Knochenimplantate oder Flachbildschirme. Durch den Einsatz moderner Verarbeitungsverfahren, z. B. Mehrkomponentenspritzguss oder Laserstrukturierung, lassen sich heute bereits große Mengen an verschiedenen Kunststoffprodukten sehr effizient herstellen.²⁵⁵

Blends und
KompositeKunststoffe für
Hightech-
Anwendungen

Die verschiedenen Kunststoffe weisen aktuell ein hohes Anwendungs- und Innovationspotenzial auf wie an den folgenden Anwendungsbeispielen deutlich wird:

1. Standardkunststoffe (Massenkunststoffe) für Alltags- und Verbrauchsartikel: z. B. Tragetaschen, Flaschen, Haushaltswaren, Verpackung, Behälter
2. technische Kunststoffe für Gehäuse in der Konsumerelektronik, Elektrogeräte, Fahrzeugbauteile im Exterieur und Interieur, Möbel, Bau- und Dämmstoffe, etc.,
3. Hochleistungskunststoffe für Maschinen- und Motorenbauteile, Zahnräder, Rollen, Walzen, Gleitlager Dichtungen, Elektro- und Elektronik-Bauteile, Batterien, Medizintechnik, etc.

²⁵³ Duroplaste sind harte Kunststoffe wie Epoxidharze oder Polyesterharze, die nach ihrer Aushärtung nicht mehr verformt werden können.

²⁵⁴ Thermoplaste sind Kunststoffe wie Polyamide oder Polypropylene, die sich in einem bestimmten Temperaturbereich („thermo-plastisch“) reversibel verformen lassen.

²⁵⁵ Kunststoff Magazin Online (ohne Jahreszahl): Werkstoffe. URL: www.kunststoffmagazin.de/Werkstoffe.htm. Abgerufen am 22.04.2014.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Polymere werden auch in Zukunft ihre etablierten Anwendungsbereiche wie Verpackungs-, Automobil-, Bau- und Elektrotechnik weiter ausbauen und dabei zunehmend klassische Werkstoffe wie Metalle ersetzen.

Hochleistungs-
polymere

Hier werden Hochleistungspolymere eine immer wichtigere Rolle spielen, da sie Standardkunststoffen und technischen Kunststoffen in mindestens einer Materialeigenschaft überlegen sind.²⁵⁶ Innerhalb der Hochleistungspolymere lassen sich Struktur- und Funktionspolymere unterscheiden. Die Strukturpolymere umfassen hochtemperaturbeständige Kunststoffe, Polymere mit speziellen mechanischen Eigenschaften (z. B. flüsigkristalline Kunststoffe) sowie Polymere, die über eine hohe Chemikalienbeständigkeit verfügen.

Funktionspolymere

Funktionspolymere besitzen besondere elektrische Eigenschaften, z. B. elektrisch leitfähige Polymere oder piezoelektrische Polymere,²⁵⁷ optische Eigenschaften (z. B. elektrisch leitfähige Polymere oder piezoelektrische Polymere) oder auch besondere biologische Eigenschaften (z. B. biokompatible Polymere). Diese Kunststoffe werden immer weniger als Bulkware hergestellt, sondern für spezifische Anwendungen (u. a. Hochleistungskomponenten im Automobilbau wie ABS/ESP-Systeme, Bremskraftverstärker oder Vakuumpumpen sowie Präzisionszahnräder, -gleitlager oder -pumpen für den Maschinenbau) „maßgeschneidert“. Dafür ist das Wissen über den Zusammenhang zwischen Struktur bzw. Dynamik und der Eigenschaft eines Polymers von großer Bedeutung. Wie bei einem Lego-Bausatz lassen sich so z. B. leichtere sowie chemisch und physikalisch stabilere Materialien für ihren Einsatz in Flugzeugen oder diversen Fahrzeugen, aber auch in speziellen Produkten kreieren. Kunststoffe gewinnen zudem in Form von Verbundwerkstoffen kontinuierlich an Bedeutung. Beispielsweise sind kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (auch CFK genannt²⁵⁸) dank ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften bei geringem Gewicht bevorzugte Leichtbaumaterialien für den Einsatz in Automobilen, Flugzeugen und Windanlagen. Tabelle 26 zeigt zukünftige Anwendungsbeispiele von Polymeren.

²⁵⁶ Ensinger (ohne Jahreszahl): Kunststoffgrundlagen. URL: www.ensinger-online.com/de/hochleistungskunststoffe-werks/kunststoffgrundlagen/. Abgerufen am 22.04.2014.

²⁵⁷ Piezoelektrische Polymere erzeugen eine elektrische Spannung, wenn sie elastisch verformt werden, und umgekehrt verformen sie sich bei Anlegen einer elektrischen Spannung.

²⁵⁸ CFK ist die Abkürzung für Carbon faserverstärkte Kunststoffe.

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Luft- und Raumfahrt, Fahrzeugtechnik	Leichtbau für Konstruktionsteile, Hochleistungskomponenten für Antriebsbauteile
Maschinen- und Anlagenbau	Maschinenbauteile wie Präzisionszahnäder, -gleitlager oder -pumpen aus Polymeren
Bauindustrie	dünne, flexible Dämmschichten
Medizintechnik	Katheter, chirurgische Instrumente, Infusionsequipment, Implantate, Augenlinsen, Hörgeräte, <i>Homecare</i> -Produkte etc. aus biokompatiblen Polymeren
Elektronik	Polymerelektronik, z. B. Speicherchips, Displays, Solarzellen, Sensoren und Batterien aus Polymeren, polymere Lichtwellenleiter, Polymere für die optische Datenspeicherung

Tabelle 26: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen von Polymeren

Besonders zukunftsweisend für den Zeithorizont bis 2030 und darüber hinaus sind Anwendungen im Bereich der Polymerelektronik und Medizintechnik. In beiden Bereichen werden innovative und kostengünstige Massenprodukte benötigt.

Polymerelektronik

Polymerelektronik

Die auf Polymeren basierende Elektronik ermöglicht dünne, flexible Elektronikbauteile auf flexiblen Substraten, in großen Stückzahlen, preiswert und für neue Massenmärkte.²⁵⁹ Mit einer auf Polymeren aufgebauten Fertigung von elektronischen Bauteilen wird es bis 2030 möglich sein, neue Massenprodukte von Speicherchips, Displays, Solarzellen, Sensoren und Batterien mit deutlich reduzierten Preisen auf den Markt zu bringen. Ein Beispiel dafür sind Funketiketten, sog. RFID²⁶⁰, die im Handel und in der Logistik den Barcode ablösen können und unter der Schlagzeile „Intelligente Milchtüte“ durch die Presse bekannt geworden sind. Ein weiteres Einsatzbeispiel ist die Vision von preiswerten großflächigen, transparenten Solarzellen zur Integration in Fenster und Gebäudedefassaden. Inwieweit die Potenziale der Polymerelektronik bis 2030

Dünne, flexible Elektronikbauteile auf flexiblen Substraten

Massenprodukte von Speicherchips, Displays, Solarzellen, Sensoren und Batterien

²⁵⁹ PolyIC GmbH & Co. KG (ohne Jahreszahl): Vision. URL: www.polyic.de/unternehmen/vision.html. Abgerufen am 22.04.2014.

²⁶⁰ RFID ist die Abkürzung für Radio-Frequenz-Identifikation.

ausgeschöpft werden können, wird nicht zuletzt von künftigen Entwicklungen zur Konstruktion kleiner, einfacher und kostengünstig herzustellender Bauteile abhängen. Vielversprechend sind Fortschritte in der Nanotechnologie, der Mikroelektronik und Mikromechanik, die schon heute eine deutliche Miniaturisierung elektronischer und mechanischer Systeme ermöglichen. Auch die Entwicklung einer kostengünstigen mit Polymeren großflächig prozessierbaren Drucktechnologie für Schaltkreise und Leiterbahnen schreitet weiter voran. Hiermit lässt sich der eigentliche Vorteil der Polymerelektronik gegenüber der konventionellen, auf einer kostenintensiven Fertigung basierenden Halbleiterelektronik erst ausspielen.

Großflächig
prozessierbare
Drucktechnologie für
Schaltkreise und
Leiterbahnen

Medizintechnik

In vielen medizinischen Produkten wie Schläuchen, Klebstoffen, Schmiermitteln sowie Materialien zur Wundversorgung werden bereits heute Polymere eingesetzt. Sie werden wegen ihrer höheren Chemikalien- und Schlagbeständigkeit sowie ihrer mechanischen und thermischen Eigenschaften geschätzt.

Hochleistungs-
polymere für
medizintechnische
Produkte

Zukünftige Wachstumstreiber in der Gesundheitsbranche sind leichtgewichtige, tragbare und stoßfeste medizinische Geräte sowie der Ersatz von Metallen und der Trend zur Miniaturisierung für kleinere Geräte. Polymere mit außergewöhnlicher Widerstandsfähigkeit, Flexibilität und Festigkeit, die zudem ein ästhetisches Produktdesign erlauben, entsprechen solchen Anforderungen und Nachfragen. Auf Basis von Hochleistungspolymeren entwickelte und anvisierte medizintechnische Produkte sind z. B. Katheter für die Gefäßtherapie, chirurgische Instrumente, Infusionsequipment, spezielle Implantate, Augenlinsen und Hörgeräte. Aufgrund des demografischen Wandels wird insbesondere der Bedarf an *Homecare*-Produkten und damit auch die Nachfrage nach Hochleistungspolymeren für Medizingerätehersteller zukünftig stark zunehmen.²⁶¹

3.11.6 Halbleiter

Elementhalbleiter

Verbindungshalbleiter

Halbleiter sind Festkörper, die mit ihren elektrischen Eigenschaften zwischen den Isolatoren und den elektrisch leitenden Metallen liegen. Abhängig von ihrem inneren Zustand können sie leitend oder nicht leitend sein. Prinzipiell unterscheidet man zwischen Elementhalbleitern, die aus einem chemischen Element bestehen, und Verbindungshalbleitern, die aus zwei oder mehr chemischen Elementen zusammengesetzt sind.

Silizium

Das mit Abstand wichtigste Halbleitermaterial für die Halbleiterelektronik ist Silizium. Zentrales Prinzip der siliziumbasierten Halbleiterelektronik ist der integrierte Schaltkreis (*Integrated Circuit*, IC), der die grundlegenden Elemente elektronischer Schaltungen – wie Transistoren,

²⁶¹ Frost & Sullivan (2012): Market Report: Western European Market for Polymers in Medical Devices.

Dioden, Kondensatoren, Widerstände und Induktivitäten – auf einem Halbleitersubstrat vereinigt. Dazu werden hochreine und möglichst defektfreie Silizium-Einkristalle benötigt. Da Gitterstruktur und Verunreinigungen unter anderem die Leitungseigenschaften des Substrats maßgeblich beeinflussen, muss sich die Anordnung der Halbleiteratome über das ganze Material möglichst regelmäßig fortsetzen. Die Ansprüche an Reinheit und Defektfreiheit steigen zudem mit zunehmender Miniaturisierung der Bauelemente an. Je kleiner die Strukturen sind, desto mehr fallen einzelne Unregelmäßigkeiten in der Kristallstruktur ins Gewicht und können die fehlerfreie Funktion des Bauelements gefährden. Durch das präzise Einbringen von Fremdatomen, sogenannten Dotieratomen, kann die Leitfähigkeit gezielt eingestellt und so die gewünschten Bauelementstrukturen auf dem Substrat geschaffen werden.

Die beiden wichtigsten Bauelemente der Siliziumelektronik sind Transistoren (als elementares Bauteil für Mikroprozessoren) und Speicher. Die günstigen Eigenschaften des Siliziums, die Skalierbarkeit der CMOS-Technologie²⁶² und die Fortschritte in der Fotolithografie²⁶³ ermöglichten es, diese Bauelemente permanent zu verkleinern. Entsprechend dem sogenannten Moore'schen Gesetz verdoppeln sich seit Mitte der 1960er Jahre die Leistungsfähigkeit eines ICs und die Anzahl der Bauteile auf einem Chip – bei gleichem Preis pro Chip – alle 18–24 Monate. Aktuelle Mikroprozessoren vereinen über eine Milliarden Transistoren auf einer Fläche von nur wenigen Quadratzentimetern.

CMOS-Technologie

Verbindungshalbleiter werden durch Kombination von Elementen aus den Hauptgruppen III und V, II und IV oder Elementen aus der Gruppe IV des Periodensystems gebildet. Die technisch interessantesten Verbindungen sind vor allem die III-V-Halbleiter, von denen Galliumarsenid (GaAs) der bekannteste Vertreter ist. Verbindungshalbleiter mit besonders großer Bandlücke, z. B. Galliumnitrid (GaN) oder Siliziumcarbid (SiC), bezeichnet man auch als *Wide Band Gap*-Halbleiter. Die große Bandlücke hat zur Folge, dass Bauelemente aus diesen Materialien temperaturbeständiger sind und eine höhere Durchbruchfeldstärke besitzen als Bauelemente aus Silizium, wodurch sie vor allem für leistungselektronische Anwendungen besonders geeignet sind. Darüber hinaus kommen sie aufgrund ihrer optischen Eigenschaften auch in optoelektronischen Bauelementen, wie LEDs, Lasern oder optischen Sensoren zum Einsatz.

Verbindungshalbleiter

Auch organische Materialien, etwa bestimmte Polymere, können halbleitende Eigenschaften aufweisen, unterscheiden sich aber in ihren sonstigen Eigenschaften und den Herstellungsverfahren deutlich von den hier beschriebenen anorganischen Halbleitern. Organische Halbleiter gewin-

Organische Halbleiter

²⁶² CMOS steht für *Complementary Metal Oxide Semiconductor* und bezeichnet das Standardverfahren zur Realisierung von Halbleiterbauteilen und integrierten Schaltungen.

²⁶³ Standardverfahren der Chipherstellung mithilfe von Laserlicht.

nen zunehmend an Bedeutung für besonders preiswerte und flexibel einsetzbare Solarzellen und Elektronikkomponenten (siehe Anwendungsbeispiel Polymerelektronik im Teilgebiet Polymere/Kunststoffe).

Die nachfolgende Auflistung von Beispielen aus verschiedenen Anwendungsbereichen gibt einen Einblick in das breite Anwendungsspektrum von Silizium und von den wichtigsten Verbindungshalbleitern und zeigt Entwicklungen auf, die ein hohes Lösungs- und Innovationspotenzial aufweisen bzw. voraussichtlich auch noch bis 2030 aufweisen werden:

- kompakte, leistungsfähige Endgeräte in der Informations- und Kommunikationstechnik (Smartphones, Tablets etc.),
- leistungselektronische Komponenten für kompakte, verlustarme Gleichrichter, Wechselrichter, Spannungswandler für Elektromobilität, Energiespeicher, erneuerbare Energien,
- Hochleistungs-Solarzellen, Dünnschicht-Solarzellen,
- LEDs für energieeffiziente Allgemeinbeleuchtung.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Die durch die Fortschritte der Halbleiterelektronik geprägte Informations- und Kommunikationstechnik hat die Art und Weise der heutigen Lebensart verändert und wird dies zukünftig weiter tun. Laut internationaler Roadmap der Halbleiterindustrie (ITRS) wird auch in den kommenden Jahren durch die Weiterentwicklung der Fertigungsverfahren die Miniaturisierung der Bauteilstrukturen stetig fortgesetzt. Allerdings werden dabei bis zum Jahr 2030 zunehmend alternative Technologien und auch andere Materialien als Silizium an Bedeutung gewinnen, z. B. Verbindungshalbleiter, Kohlenstoff-Nanoröhren oder Graphen.²⁶⁴ Entscheidend wird dabei sein, dass diese neuen Technologien und Materialien mit der weiterhin genutzten CMOS-Technologie möglichst kompatibel sind. Besonders zukunftsweisend für den Zeithorizont bis 2030 und darüber hinaus sind Anwendungen im Bereich der Silizium-Photonik.

Anwendungsbeispiel Silizium-Photonik

Moderne Mikroprozessoren auf Siliziumbasis werden durch unzureichende Verbindungen, etwa zu den Speicherbausteinen, zunehmend ausgebremst und können ihre Leistungsfähigkeit nicht voll ausschöpfen. Die metallischen Leitungen zwischen den Halbleiterkomponenten weisen eine limitierte Datenrate auf und die Dämpfungsverluste bei der Signalübertragung nehmen mit zunehmender Leitungslänge und steigender Taktrate zu. Dies betrifft sowohl Verdrahtungen im Platinenbereich als

²⁶⁴ International Technology Roadmap for Semiconductors (2011): ITRS 2011 Edition. URL: www.itrs.net/Links/2011ITRS/Home2011.htm. Abgerufen am 22.04.2014.

auch kurzreichweitige Datentransfers zwischen Komponenten innerhalb von Computergehäusen, zwischen Computern und Peripheriegeräten und auch in kurzreichweitigen Rechnernetzen. Demgegenüber sind optische Verbindungsleitungen erheblich leistungsfähiger und ermöglichen deutlich höhere Übertragungsraten als metallische Leitungen, kommen aber aufgrund der hohen Kosten nur für große Übertragungstrecken zum Einsatz. So beruhen etwa die globalen Telekommunikationsnetze seit Langem auf photonischen Übertragungstechnologien. Die dafür erforderlichen optoelektronischen Komponenten werden aus Verbindungshalbleitern hergestellt, deren Fertigungsverfahren nicht kompatibel zur in der Mikroelektronik etablierten CMOS-Prozesstechnologie sind. Ihre Herstellung ist im Vergleich zu Siliziumkomponenten aufwendig und teuer. Das Gleiche gilt für Platinen, und Chipstrukturen, die solche photonischen Bauelemente enthalten. Demgegenüber eignet sich Silizium nur schlecht zur Erzeugung, Modifikation und Detektion von Licht, sodass es bisher nicht gelungen ist, leistungsfähige optoelektronische Komponenten aus Silizium für die Datenübertragung zur Anwendungsreife zu bringen. Die Vision der Forschung im Bereich der Silizium-Photonik ist eine kostengünstige Herstellung photonischer Bausteine und integrierter photonischer Schaltkreise idealerweise auf Basis bereits bestehender CMOS-Fertigung. Sollte es gelingen, diese Fabrikationstechnologie auch zur Herstellung von Silizium-Lasern und anderer photonischer Komponenten zu nutzen, ließen sich große Übertragungsbandbreiten auch für kürzere Distanzen preisgünstig realisieren und für Anwendungen zur Bedienung globaler Massenmärkte zur Verfügung stellen.

CMOS-Fertigung zur Herstellung von Silizium-Lasern und anderen photonischen Komponenten

3.11.7 Biowerkstoffe

Als Biowerkstoffe bezeichnet man Werkstoffe, die „vollständig oder zu relevanten Anteilen auf nachwachsenden Rohstoffen basieren“.²⁶⁵ Es ist nicht definiert, wie hoch der Anteil an nachwachsenden Rohstoffen in einem Werkstoff sein muss, um ihn als Biowerkstoff zu bezeichnen. Zu den Biowerkstoffen zählen Biokunststoffe und Biokomposite (vor allem naturfaserverstärkte Kunststoffe und Wood-Plastic-Composites, kurz: WPC) und daneben traditionelle Holzwerkstoffe.

Biokunststoff

Für den Begriff Biokunststoff gibt es keine rechtliche Regelung, sodass er nicht einheitlich verwendet wird. Die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. verwendet folgende Definition, die auch hier gelten soll: „Als Biokunststoffe werden Kunststoffe bezeichnet, die überwiegend aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden. Bei Biokunststoffen kann es sich um biologisch abbaubare oder um dauerhafte Kunststoffe

²⁶⁵ Wikipedia (ohne Jahreszahl): Biowerkstoff. URL: www.de.wikipedia.org/wiki/Biowerkstoff. Abgerufen am 22.04.2014.

handeln.²⁶⁶ Natürlich vorkommende pflanzliche oder tierische Polymere wie Stärke, Cellulose, Lignin, Kollagen oder Kautschuk können durch Modifikationen direkt als Biokunststoffe genutzt werden, sind aber hinsichtlich ihres Eigenschaftsspektrums eingeschränkt. Ein größeres Anwendungspotenzial wird vor allem in Biokunststoffen gesehen, die durch technische Verfahren aus Biomasse gewonnen werden und in ihren Eigenschaften mit herkömmlichen Kunststoffen vergleichbar sind, aber aufgrund ihrer nachwachsenden Rohstoffbasis und ggf. Kompostierbarkeit ökologische Vorteile bieten. Hier sind vor allem Polymilchsäure (PLA) und biogene Bernsteinsäure von großer technologischer Bedeutung.

Naturfaserverstärkte Kunststoffe

Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) sind Biokomposite, die aus einer Matrix aus Kunststoff und zur Verstärkung eingebrachten Biofasern bestehen. Als Matrixmaterial können Thermoplaste wie Polypropylen (PP), Polyethylen (PE) und Polyvinylchlorid (PVC) oder Duroplaste wie Acryl-, Epoxid- und Phenolharze oder Polyurethan eingesetzt und mit Fasern aus Baumwolle, Holz, Flachs, Hanf u. a. kombiniert werden. Um die Umwelteigenschaften von NFK noch weiter zu verbessern, sollen künftig statt der bisher überwiegend genutzten erdölbasierten Matrixkunststoffe die oben beschriebenen Biokunststoffe als Matrix zum Einsatz kommen, um so vollständig biobasierte NFK zu realisieren.

Holz-Kunststoff- Verbundwerkstoffe

Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe oder *Wood Plastic Composites* (WPC) stellen eine eigene Gruppe von Biokompositen dar. Sie bestehen aus variablen Anteilen (20% bis 90%) von Holz in Form von Holzmehl, -spänen, -schnittel oder -fasern, einer thermoplastischen Polymermatrix (häufig PP, PE oder auch PVC) und optionalen Additiven zur gezielten Einstellung von Eigenschaften, z. B. UV- oder Witterungsbeständigkeit. WPC sind herkömmlichen Holzwerkstoffen nicht nur in Härte und Haltbarkeit überlegen, sondern zeichnen sich auch durch eine größere Gestaltungsfreiheit in der Formgebung auf, weil sie mit etablierten Verfahren aus der Kunststofftechnik, wie Extrusion oder Spritzgießen, verarbeitet werden können.

Biologische Abbaubarkeit

Biowerkstoffe können bereits in vielen Anwendungsbereichen herkömmliche Werkstoffe ersetzen. Bei kurzlebigen oder Einweg-Produkten ist dabei meist auch die biologische Abbaubarkeit entscheidend. Es gibt aber auch Anwendungsfelder, in denen dieses Kriterium keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielt, weil eine möglichst lange Produktlebensdauer gewünscht ist. Anwendungsbeispiele, die ein hohes Lösungs- und In-

²⁶⁶ Andere Definitionen verwenden die biologische Abbaubarkeit als Kriterium. Danach würde man auch biologisch abbaubare Kunststoffe auf konventioneller Rohstoffbasis als Biokunststoffe bezeichnen, was dann aber nicht mehr mit der Definition von Biowerkstoffen konsistent wäre; vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoff e.V. (ohne Jahreszahl): Biokunststoffe. URL: <http://biowerkstoffe.fnr.de/biokunststoffe/> Abgerufen am 22.04.2014.

novationspotenzial aufweisen bzw. voraussichtlich auch noch bis 2030 aufweisen werden, sind:^{267,268}

- Verpackungen wie Tüten, Folien, Schalen, Becher, Netze aus Biokunststoffen vor allem für Nahrungsmittel,
- Cateringprodukte wie Geschirr, Besteck, Becher, Trinkhalme aus kompostierbaren Biokunststoffen,
- kompostierbare Folien, Netze, Töpfe, Schalen, Bänder aus Biokunststoffen für Garten- und Landschaftsbau,
- chirurgisches Nahtmaterial, resorbierbare Implantate, Wirkstoffdepots aus Biokunststoffen; thermoplastische Stärke als Gelatineersatz für Kapseln und Pillen,
- Pflege- und Hygieneprodukte wie Windelfolie, Unterlagen, Einmalhandschuhe usw. aus Biokunststoffen,
- Autointerieur: Türverkleidung, Armaturenbrett, Autohimmel Kofferraumauskleidung usw. aus NFK,
- Flachs, Hanf, Wolle oder Cellulose als Naturdämmstoffe im Bauwesen,
- Elektronikgehäuse, Schreibmaterial, Büroartikel aus Biokunststoffen,
- Sportartikel wie Sportbrillen, Skistiefel, Turnschuhe aus Biokunststoffen.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Im Kontext eines schonenden Umgangs mit endlichen Rohstoffen und Ressourcen ergibt sich für die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen ein großes Innovationspotenzial im Hinblick auf neue Technologien. So wächst bei der chemischen Industrie aber auch in anderen Industriebranchen und bei deren Kunden das Interesse an der Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen für die Herstellung von Werkstoffen und Produkten in unterschiedlichsten Anwendungsbereichen. Die Entwicklung von Verfahren zur biobasierten Herstellung verschiedener Plattformchemikalien, z. B. Bernsteinsäure, Polymilchsäure (PLA) oder Polyhydroxyalkanoat (PHA), weist eine Entwicklungsdynamik auf.²⁶⁹

Schonender Umgang
mit Rohstoffen und
Ressourcen

Plattformchemikalien

²⁶⁷ BMELV (Hrsg.) (2013): Neue Produkte: Aus Natur gemacht – Nachwachsende Rohstoffe im Alltag. URL: www.bmelv.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/NeueProdukteNaWaRoImAlltag.pdf?__blob=publicationFile. Abgerufen am 22.04.2014.

²⁶⁸ FNR (Hrsg.) (2010): Nachwachsende Rohstoffe in der Industrie. URL: www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_228-bro_nr_industrie_dt_15072010_02_klein.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.

²⁶⁹ Grimm, V. et al. (2011): Biomasse – Rohstoff der Zukunft für die chemische Industrie. Zukünftige Technologien, Nr. 90. Düsseldorf, VDI Technologiezentrum GmbH.

Umstellung auf nachwachsende Rohstoffe mit tief greifenden Veränderungen in den Prozess- und Lieferketten verbunden

Ein wesentlicher Treiber ist dabei die kontinuierliche Verteuerung von Energie und Erdöl. Aber auch die Bindung von klimarelevantem CO₂ in Biowerkstoffen wird als ökologischer Vorteil gesehen, insbesondere dann, wenn diese Materialien auch in langlebigen Produkten zum Einsatz kommen und werkstofflich recycelt werden. Allerdings hat sich die Verarbeitung fossiler Rohstoffe in der Industrie über Jahrzehnte fest verankert, sodass mit der Umstellung auf nachwachsende Rohstoffe tief greifende Veränderungen in den Prozess- und Lieferketten verbunden sind. Wichtige Verfahrensschritte etwa beim Aufschließen von Biomassekomponenten müssen noch weiterentwickelt und optimiert werden. Eine wichtige Rolle spielen dabei auch Entwicklungen im Bereich der industriellen („weißen“) Biotechnologie. Tabelle 27 zeigt zukünftige Anwendungsbeispiele von Biowerkstoffen.

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Chemische Industrie	Herstellung von Massenkunststoffen aus nachwachsenden Rohstoffen
Bioraffinerie	integrale Produktion von Biowerkstoffen im Rahmen einer ganzheitlichen Verarbeitung von Biomasse für stoffliche und energetische Nutzung
Leichtbau	Carbonfasern aus Biomasse (z. B. Lingnin) für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe
Straßenbau	Bitumen aus Biomasse für Asphaltbeläge

Tabelle 27: Zukünftige Anwendungsbeispiele von Biowerkstoffen

Anwendungsbeispiel Massenkunststoffe

In Zukunft sollen etablierte Massenkunststoffe, die in vielen Anwendungsbereichen in großen Mengen zum Einsatz kommen, vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden. Dies betrifft beispielsweise die weitverbreiteten thermoplastischen Kunststoffe Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polyvinylchlorid (PVC), die dann nicht mehr auf Erdölbasis, sondern durch oleochemische Verarbeitung von Pflanzenölen oder aus Bioethanol hergestellt werden. Die biobasierten Varianten der genannten Kunststoffe haben im Idealfall identische Eigenschaften wie die petrochemisch hergestellten Massenkunststoffe und können diese als sogenannte *Drop in*-Biokunststoffe in vielen Anwendungen direkt substituieren. Dadurch müssen die betreffenden Wertschöpfungsketten nur am Anfang angepasst werden und können so auf eine nachhaltigere und erdölunabhängige Basis gestellt werden.

Drop in-
Biokunststoffe

Anwendungsbeispiel Bioraffinerie

Die Herstellung von Biowerkstoffen wird immer mehr zu einer der zentralen Komponenten eines integrativen, multifunktionellen Gesamtkonzeptes zur umfassenden Nutzung von Biomasse als vielfältige Rohstoffquelle. In Bioraffinerien sollen zukünftig verschiedene Biomasserohstoffe und biogene Rest- und Abfallstoffe vollständig für die nachhaltige Produktion von Biowerkstoffen, Chemikalien und verschiedenen Formen von Bioenergie (Kraftstoffe, Strom, Wärme) verarbeitet werden. Das breite Spektrum unterschiedlicher Produkte und Zwischenprodukte kann zusätzlich durch Nahrungs- oder Futtermittel als Koppelprodukte ergänzt werden. In aufeinander abgestimmten Verfahrensketten werden die nachwachsenden Rohstoffe zunächst aufbereitet und in sogenannte Intermediate aufgetrennt (Cellulose, Stärke, Zucker, Lignin, Pflanzenfasern, Biogas usw.) und anschließend in verschiedenen Konversions- und Veredelungsschritten weiterverarbeitet.²⁷⁰

Biomasserohstoffe und biogene Rest- und Abfallstoffe für die nachhaltige Produktion von Biowerkstoffen, Chemikalien und Bioenergie

3.11.8 Verbundwerkstoffe

Ein Verbundwerkstoff oder Kompositwerkstoff besteht aus zwei zusammengesetzten Hauptkomponenten, der bettenden Matrix (z. B. Polymere, Metalle, Keramik) und der Verstärkungskomponente (z. B. Fasern, Partikel). Aufgrund der stofflichen Eigenschaften und Geometrie der Komponenten zeichnen sich Verbundwerkstoffe vor allem als Leichtbauwerkstoffe aus. Ein typischer Vertreter dafür sind faserverstärkte Kunststoffe, deren Matrix sowohl aus Duroplasten als auch aus Thermoplasten bestehen kann. Als Verstärkungsfasern kommen vor allem Naturfasern, Glas-, Aramid- und Kohlenstofffasern zum Einsatz. Diese Faserverbundwerkstoffe weisen außergewöhnlich gute mechanische Eigenschaften, wie hohe Steifigkeit und Festigkeit bei kleiner Dichte auf. Erst durch die Einbettung der Fasern in die Matrix lässt sich das hohe mechanische Potenzial der Fasern in die jeweiligen Bauteile umsetzen. Die Matrix übernimmt Aufgaben der Krafteinleitung, Stützung der Fasern bei Druck sowie des Schutzes der Fasern. Je nach Faserart (Kurz- oder Lang- bzw. Endlosfaser) können durch eine geeignete Ausrichtung, Anordnung und Verteilung der Fasern in der Matrix Bauteile gezielt verstärkt (steifer, fester) oder weicher ausgelegt werden. Ein weiterer Vorteil der Faserverbundwerkstoffe bietet sich durch die Möglichkeit der Integralbauweise. Dadurch werden Bauteilelemente wie Versteifungen in die Gesamtstruktur mit integriert, wodurch wiederum die Anzahl der Bauteile reduziert wird. Auf diese Weise entfallen auch Verbindungselemente wie Nieten und Schrauben, wodurch weitere Gewichtseinsparungen möglich sind. Aufgrund dieser Leistungsvorteile gegenüber konventionellen Strukturwerkstoffen haben polymere Faserverbundwerkstoffe in den letzten Jah-

Faserverstärkte Kunststoffe

Kohlenstofffaser- verstärkte Kunststoffe

²⁷⁰ BMELV. et al. (Hrsg.) (2012): Roadmap Bioraffinerien. URL: www.bmbf.de/pub/roadmap_bioraffinerien.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.

ren im Bereich des Leichtbaus stark an Bedeutung gewonnen. Insbesondere kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (sog. CFK, Abkürzung für Carbon-faserverstärkte Kunststoffe) besitzen ein großes Leichtbaupotenzial, da diese bis zu 25% leichter als Aluminium und 60% leichter als vergleichbare Stahlstrukturen sind.²⁷¹ Diese guten spezifischen Werkstoffeigenschaften führen zu einem vielfältigen Einsatzspektrum und einer zunehmenden Verbreitung von CFK als Konstruktionswerkstoffe in verschiedenen technischen Anwendungen²⁷², wie die folgenden Beispiele zeigen:

- In der Luft- und Raumfahrt bestehen neue Flugzeuge wie der Airbus A 380 und die Boeing 787 „Dreamliner“ zu etwa 50% aus faserverstärkten Kunststoffen. Der Ersatz des konventionell verwendeten Aluminiums im Rumpf und Flügel führt zur Gewichtsreduzierung und damit zu einem geringeren Treibstoffverbrauch (ca. 20% weniger).
- Im Fahrzeugbau werden erste CFK-Bauteile wie Räder, Dächer, Türen, Kofferraumdeckel, Motorhauben, Wasserstofftanks und CFK-Karosserien für Elektrofahrzeuge eingesetzt.
- Darüber hinaus gibt es erste CFK-Demonstrationen bzw. -Produkte in Windkraftanlagen (Rotorblätter), in der Bauindustrie (Wärmedämmung, Brücken), bei Sportartikeln (Rennräder, Tennisschläger, Skier).
- **CFK-Werkstoffe werden** aufgrund der sehr hohen Röntgen-Transparenz und Steifigkeit für medizinische Zwecke genutzt. Röntgenstrahlen werden von CFK kaum absorbiert und Gewicht und Volumen des Bauteiles reduzieren sich aufgrund seiner Steifigkeit. Durch Verwendung von Biomaterialien (Natur- bzw. Biofasern/Biopolymeren, Spezialharzen, etc.) können bioverträgliche sowie sterilisierbare CFK-Bauteile hergestellt werden. Typische Anwendungsbeispiele sind Implantate wie künstliche Schädeldeckenteile, Halswirbelpplatten, hautverträgliche, kratzfeste und leicht desinfizierbare Materialien für die Dentalmedizin, Arm- und Beinprothesen für höhere Beanspruchung (z. B. Sport), anpassungsfähige, modular aufgebaute, röntgentransparente Operationstische in Kombination mit Computertomographen.^{273,274}

²⁷¹ AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg) (2009): Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag.

²⁷² HUBER+SUHNER (ohne Jahreszahl): Material properties. URL: www.composites.ch/co-cfk/de/hs-pol-composites-vw-mat.htm. Abgerufen am 22.04.2014.

²⁷³ mayr-cfk.de. URL: www.mayr-cfk.de/cfk_medizintechnik.html. Abgerufen am 22.04.2014.

Neben den faserverstärkten Kunststoffen spielen auch bereits faserverstärkte Keramiken eine große technisch-wirtschaftliche Rolle. In der Entwicklung und Anwendung von faserverstärkter Keramik kommen zurzeit im Wesentlichen Kohlenstoff- und Siliciumcarbid-Fasern zum Einsatz und in geringerem Umfang auch Fasern, die aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) oder Mischkristallen aus Aluminiumoxid und Siliciumdioxid (SiO_2) bestehen. Als Matrixmaterialien werden bei technischen Anwendungen derzeit in der Hauptsache Aluminiumoxid, Kohlenstoff und Siliciumcarbid eingesetzt. Von reinen Keramiken unterscheiden sich Faserkeramiken durch höhere Hitzebeständigkeit und Verschleißfestigkeit sowie bessere dynamische Belastbarkeit und extreme Thermoschockbeständigkeit aus. Die Verwendung von faserverstärkter Keramik ist grundsätzlich für alle Bereiche interessant, in denen konventionelle technische Keramiken und Metalle insbesondere wegen Abriebfestigkeit, Korrosion oder hoher Temperaturen keine befriedigenden Lebensdauern erreichen. Faserkeramiken sind insbesondere durch die Keramikbremsen in Premium- und Rennsport-Fahrzeugen bekannt geworden. Folgende Entwicklungsschwerpunkte und Anwendungen von faserverstärkter Keramik sind u. a. bisher zu verzeichnen:

Faserverstärkte
Keramiken

Extreme
Thermoschock-
beständigkeit

- Hitzeschutzsysteme für Raumflugkörper,
- Brennerdüsen und Komponenten für Gasturbinen (Turbinenbrennkammern, Turbinenschaufeln),
- Hochleistungsbremsscheiben für Automobile, Schienenfahrzeuge und Flugzeuge,
- korrosions- und verschleißbeständige Komponenten in Gleitlagern.

²⁷⁴ industrieanzeiger.de. URL: www.industrieanzeiger.de/fertigung/-/article/12503/35282102/High-Tech-Werkstoff-mit-Zukunft/art_co_INSTANCE_0000/maximized/. Abgerufen am 22.04.2014.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Herausforderungen

Vor allem im Hinblick auf die zunehmende Nachfrage nach ökologisch vorteilhaften Leichtbauwerkstoffen werden Faserverbundwerkstoffe nicht nur in dem bereits etablierten Bereich der Luft- und Raumfahrt, sondern auch im Fahrzeug- und Maschinenbau sowie in der Architektur und Medizintechnik immer häufiger eingesetzt. Große Herausforderungen für die Zukunft stellen allerdings Aspekte wie wirtschaftliche Herstellung, hohe Stückzahlen, großserientaugliche automatisierte Fertigungsverfahren, geeignete Fügeverfahren, eine entsprechende Qualitätssicherung sowie verfügbare Reparatur- und Recyclingtechniken dar. So scheitert bei vielen Anwendungen der serienmäßige Masseneinsatz von Faserverbundwerkstoffen bisher noch an den hohen Kosten und der aufwendigen, teilweise manuellen Fertigung. Hier wurden in den letzten Jahren jedoch neue Techniken für die Großserienfertigung optimiert, u. a. das Harzinjektionsverfahren durch *Resin Transfer Molding* (RTM).²⁷⁵ Weiterentwicklungen schließen textile Fertigungsverfahren wie Nähen und Weben mit ein, um eine dreidimensionale Faserverstärkung für den Verbundwerkstoff zu realisieren. Das dreidimensionale Weben („3-D-Weben“) ermöglicht Formkörper mit einer verstärkten mechanischen Festigkeit insbesondere von räumlich gekrümmten Bauteilen, die ohne Nähte oder andere Schwachstellen endproduktkonform gefertigt werden können. Gegenüber den konventionellen Laminaten zeichnen sich die 3-D-verstärkten Bauteile durch eine viel höhere Schadenstoleranz und strukturelle Integrität aus. Tabelle 28 zeigt Beispiele für zukünftige Anwendungen von Verbundwerkstoffen.

Resin Transfer Molding

„3-D-Weben“

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Luft- und Raumfahrt, Fahrzeugbau	Leichtbau für Konstruktionsteile wie Karosserien, Hochleistungskomponenten für Bauteile
Maschinen- und Anlagenbau	leichtgewichtige und verschleißfeste Maschinenkomponenten wie Schlitzen und Walzen für die Montage- und Handhabungstechnik, Werkzeugmaschinen sowie Schneid- und Fräsgeräte

²⁷⁵ Bei dem RTM-Verfahren befindet sich ein vorgeformtes Fasergelege in einem Presswerkzeug, in das ein polymeres Matrixmaterial, z. B. Harz, eingespritzt und nach der Durchtränkung zur Aushärtung gebracht wird.

Bauindustrie	leichtgewichtige, schwingungs- und korrosionsfeste Architekturbauteile für Dachkonstruktionen und Gebäudefassaden jeglicher Art sowie neue Brückenkonstruktionen
--------------	--

Tabelle 28: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen von Verbundwerkstoffen

Neben der zukünftigen breiteren Marktdurchdringung von Faserverbundwerkstoffen in den bisherigen Anwendungsfeldern Luft- und Raumfahrt, Fahrzeugbau sowie Medizintechnik wird im Zeithorizont 2030 ein hohes Innovationspotenzial im Bereich Maschinen- und Anlagenbau sowie in der Architektur erwartet.²⁷⁶

Anwendungsbeispiel Maschinen- und Anlagenbau

Im Maschinenbau wird eine Erhöhung der Produktivität durch den Leichtbau mit Faserverbundwerkstoffen wie CFK angestrebt und vorangetrieben. Das gilt insbesondere für dynamische bewegte Maschinenkomponenten wie Schlitten und Walzen. Diese werden in unterschiedlichen Branchen des Maschinenbaus, u. a. in der Montage- und Handhabungstechnik, in Werkzeugmaschinen wie Laser-Schneidmaschinen oder Hochgeschwindigkeitsfräsen sowie in Textil- und Druckmaschinen vermehrt eingesetzt. Neben der Reduzierung der benötigten Antriebsleistungen und der damit verbundenen Energieeinsparung können hierdurch eine signifikant verbesserte Vibrationsdämpfung und eine erhöhte thermische Stabilität erreicht werden.²⁷⁷

Leichtbau mit Faserverbundwerkstoffen

Schlitten und Walzen

Auch für Gehäuse von schweren Batterien und Komponenten von Brennstoffzellen (Anfangs- und Endplatte eines Brennstoffzellen-Stapels) in mobilen Anwendungen sind kohlefaserverstärkte Kunststoffe zur Gewichtsreduzierung von Interesse. Im Falle der Brennstoffzelle ist das CFK-Material auch zur Funktionsoptimierung vorteilhaft, da es bessere Isolationseigenschaften aufweist als das bisher verwendete Metall. Die Temperatur in der Brennstoffzelle schwankt dadurch weniger, sodass sich ihre Lebensdauer verlängert.²⁷⁸

Gehäuse von schweren Batterien und Komponenten von Brennstoffzellen

Darüber hinaus bieten keramische Faserverbundstrukturen im Maschinen- und Anlagenbau vielversprechende Alternativen zu bestehenden

²⁷⁶ Carbon Composites e.V. (Hrsg.) (2013): Carbon Composites Magazin, Nr. 2.

²⁷⁷ RAMPF Holding GmbH & Co KG (ohne Jahreszahl): CFK im Maschinenbau. URL: www.Cfk-Maschinenbau.de. Abgerufen am 22.04.2014.

²⁷⁸ Agitano Wirtschaftsforum Mittelstand (2013): Innovationen des DLR auf der Hannover Messe: Faserverstärkte Keramik und Alleskönner in der Brennkammer. URL: www.agitano.com/da-dlr-auf-der-hannover-messe-2013-helfer-fur-morgen-und-alleskonner-in-der-brennkammer/52480. Abgerufen am 22.04.2014.

Hochtemperatur-
anwendungen

Werkstofflösungen mit erheblich erweiterten Eigenschaftsprofilen für Hochtemperaturanwendungen. Während momentan diese Werkstoffe vor allem in ultraleichten und verschleißfesten Reibbelägen und Brems scheiben eingesetzt werden, liegt der Schwerpunkt künftig vor allem im Energie- und Antriebsbereich, um dort durch höhere Temperaturen den Wirkungsgrad zu steigern (z. B. Hochtemperatur-Öfen, Brenner und Chemieanlagen, Antriebswellen in Turbinen und Maschinen).²⁷⁹

Anwendungsbeispiel Architektur

Fassadenverkleidung

Steigende Energiekosten und sanierungsbedürftige Bauten wie Brücken und Gebäude stellen die Baubranche vor große Herausforderungen. Alternative Lösungsansätze stellen Faserverbundkunststoffe dar, da sie sich hervorragend für ein energieeffizientes und nachhaltiges Bauen sowie für den Einsatz im gestalterischen Bereich eignen. Eindrucksvolle, futuristische Gebäude aus Verbundwerkstoffen wurden bereits in den Vereinigten Arabischen Emiraten demonstriert, wie z. B. die Fassadenverkleidung in Form eines Drachens in der „Dubai Free Zone“ und die Gebäudestrukturen des „City Hospital Dubai“.²⁸⁰

Dach- und Brücken-
konstruktionen

Noch sind die Erfahrungen mit Faserverbundwerkstoffen im Bauwesen gering und es sind noch umfangreiche Analysen zu den erforderlichen Materialeigenschaften der verschiedenen Anwendungsfälle notwendig. Zukünftig denkbar ist der Einsatz von CFK Werkstoffen bzw. Werkstoffmodulen in Fassaden von Gebäuden sowie in Dach- und Brückenkonstruktionen. Die Faserverbundwerkstoffe sind architektonisch von Interesse, da auch einzigartige avantgardistische Formen realisiert werden können. Im Brückenbau lassen sich bisherige Stahlkonstruktionen durch leichtgewichtiger, schwingungs- und korrosionsfestere Verbundwerkstoffe ersetzen. So lässt sich steigenden Verkehrslasten, Korrosionsangriffen, aber auch Erdbeben- und Anpralllasten begegnen. Zudem kann die erforderliche Tragsicherheit und Nutzungsgauglichkeit u. a. für größer dimensionierte Brückenplanungen gewährleistet werden.^{281,282}

²⁷⁹ MST Aerospace GmbH (ohne Jahreszahl): Hochtemperatureinsatz von faserverstärkter Cescic®-Keramik in verfahrenstechnischen Anlagen. URL: www.mst-aerospace.de/technologietransfer/technologieangebote/materialien-und-verfahren/079v-hochtemperatureinsatz-von-faserverstaerkter-cesic-keramik-in-verfahrenstechnischen-anlagen/. Abgerufen am 22.04.2014.

²⁸⁰ CFK-Valley Stade Convention GbR (ohne Jahreszahl): The CFK-Valley Stade Convention throughout the years. URL: www.cfk-convention.com/info-center/reviews/cfk-valley-stade-convention-2013.html. Abgerufen am 22.04.2014.

²⁸¹ k-zeitung.de (2011): Längste CFK-Balkenbrücke der Welt. URL: <http://www.k-zeitung.de/Laengste+CFK-Balkenbruecke+der+Welt/150/1087/36270/>. Abgerufen am 22.02.2014.

²⁸² Borré, M. (2010): Größte Brücke aller Zeiten: Ein Ding der (Un-)Möglichkeit? URL: http://www.focus.de/wissen/technik/tid-19194/ingenieurwissenschaften-groesste-bruecke-aller-zeiten-ein-ding-der-un-moeglichkeit_aid_532303.html. Abgerufen am 22.02.2014.

Darüber hinaus eignen sich Faserverbundwerkstoffe aufgrund ihres strukturellen Aufbaus besonders gut für die Integration von Sensoren, z. B. für *Condition Monitoring*-Systeme zur Prozess- und Bauteilüberwachung, und Aktuatoren, z. B. für aktive Schwingungsdämpfung von Maschinenteilen.

3.11.9 Textile Werkstoffe

Unter dem Begriff textile Werkstoffe fasst man alle technischen Textilien zusammen, die in der verarbeitenden Industrie als Werkstoff eingesetzt werden. Dabei werden neben Naturfasern wie Wolle oder Flachs und erdölbasierten Kunststofffasern bzw. Chemiefasern zunehmend auch biologisch abbaubare Biopolymere aus nachwachsenden Rohstoffen verwendet. Die Vorteile von textilen Werkstoffen liegen in ihren Eigenschaften, die für jede Anwendung maßgeschneidert werden können. Sie sind sehr leicht und fein strukturiert, flexibel und elastisch sowie hochfest und sehr widerstandsfähig. Dies wird durch eine gezielte Entwicklung entlang der gesamten textilen Prozesskette, von der Polymer- und Faserherstellung über die textile Verarbeitung mittels verschiedener Webarten und -formen (zwei- oder dreidimensionale Textilkonstruktionen) bis hin zur Funktionalisierung und Einbettung der Textilfasern in ein Matrixmaterial (z. B. aus Kunststoffen, Keramiken, Beton) erreicht. Textile Werkstoffe bieten ein hohes Innovationspotenzial und sind häufig in ressourceneffizienten Leichtbau- und Hightech-Anwendungen zu finden. Ihre Verwendung reicht von der Automobil-, Maschinen- und Bauindustrie über Medizintechnik bis hin zu Luft- und Raumfahrt. Mit leichten textilen Werkstoffen wie faserverstärkten Kunststoffen werden im Automotiv-Bereich mehr und mehr Bauteile bis hin zu ganzen Karosserien, insbesondere bei den neuen Elektrofahrzeugen, gefertigt. Im Straßenbau übernehmen textile Netzkonstruktionen die Aufgabe, Böschungen mit Bepflanzungen ansprechender zu gestalten. In der Architektur werden imposante dünnwandige Fassaden- und Dachkonstruktionen aus textilen Werkstoffen immer beliebter, die zudem eine hervorragende Wärmedämmung gewährleisten. Die folgenden Anwendungsbeispiele zeigen die aktuelle große technologische und wirtschaftliche Bedeutung textiler Werkstoffe, die auch bis 2030 weiter zunehmen wird:²⁸³

1. Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt, Maschinen- und Anlagenbau: Filter, Fahrzeug-Planen, Airbag, Sicherheitsgurte, Antriebsriemen, Schläuche, Innenausstattung, Schallschutz, Wärme-/Kälte-Isolatoren, Leichtbaukonstruktionen aus Faserverbundwerkstoffen u. a.,
2. Bau- und Umwelttechnik: Textilbeton, Dachkonstruktionen, Dämmstoffe (Schall, Wärme), Absorber für UV-Strahlung,

Technische Textilien
 Naturfasern
 Kunststofffasern
 Biologisch abbaubare Biopolymere
 Funktionalisierung und Einbettung der Textilfasern in ein Matrixmaterial

²⁸³ INNtex Innovation Netzwerk Textil e.V. (Hrsg.) (2013): Innovationsreport Textil. Chemnitz.

Membranen/Filter zur Reinigung und Aufbereitung, textile Trägerstoffe, Schutzkleidung u. a.,

3. Schutztextilien helfen z. B. UV-Licht zu minimieren, Lärm zu reduzieren und Gefahren zu vermeiden, z. B. Schutzkleidung gegen Schmutz, Hitze sowie gefährliche Chemikalien und Elektrosmog.

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Die Textilindustrie unterliegt seit Jahren einem fundamentalen Strukturwandel. Während sich heute eine Produktion von preiswerter Massenware für die deutsche Textilindustrie kaum noch lohnt, haben sich innovative technische Textilien bzw. textile Werkstoffe für viele Branchenunternehmen zu einem Wachstumsmotor mit großem Zukunftspotenzial entwickelt. Ihr Anteil an der gesamten Textilproduktion ist in den letzten Jahren stetig gestiegen. Branchenexperten schätzen, dass in Deutschland der mengenmäßige Anteil technischer Textilien heute bereits bei 45% liegt und künftig weltweit weiter steigen wird.

Besonders zukunftsweisende Anwendungen von textilen Werkstoffen für den Zeithorizont bis 2030 und darüber hinaus sind die Bereiche Textilbeton für die Bauindustrie und adaptive textile Produkte. Tabelle 29 zeigt Beispiele für zukünftige Anwendungen von textilen Werkstoffen.

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Luft- und Raumfahrt	Leichtbau von Konstruktionsteilen (u. a. Rumpf, Flügel), Innenausstattung wie Sitze und Verkleidungen
Fahrzeugbau	teichtgewichtige Karosserien und Bauteile im Innen- und Außenbereich
Bauindustrie	Ersatz von Stahl durch Textilfasern im Beton in Decken und Wänden von Häusern sowie im Straßenbau
Elektronik bzw. Informations- und Kommunikationstechnik	adaptive Textilien für die integrierte Sensorik und Aktorik sowie energieautarke tragbare und mobile Elektronikgeräte wie Computer, Messgeräte, Unterhaltungselektronik

Medizintechnik	Operationskleidung, Krankenhaus- textilien, Kompressionstextilien, bioverträgliche Implantate
----------------	---

Tabelle 29: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen von textilen Werkstoffen

Anwendungsbeispiel Textilbeton für den Baubereich

Textilbeton ist ein vergleichsweise neuer und innovativer Verbundwerkstoff. Er wird u. a. als textilbewehrter Beton oder Carbonbeton bezeichnet. Dabei sind mehrere Lagen von Hochleistungstextilien schichtweise in eine Feinbetonmatrix eingebettet und wirken so als Bewehrung. Carbon- oder chemisch resistente Glasfasertextilien haben im Vergleich zur herkömmlichen Stahlbewehrung den Vorteil, dass sie nicht korrodieren können. Darüber hinaus sind aufgrund der hohen Zugtragfähigkeit flexible und deutlich geringere Betondicken möglich. Neben Einsparungen bei Gewicht und Rohstoffen wird auch weniger Energie für Herstellung, Transport und Rückbau benötigt. In den vergangenen Jahren entstanden im Rahmen von Forschungsarbeiten und in Zusammenarbeit mit Firmen der deutschen Bauwirtschaft bereits erste Pilotbauwerke, die das hohe Potenzial von Textilbeton auch als wirtschaftliche Alternative aufzeigen. So sind beispielsweise im Bereich der Fassadenelemente heute bereits kleinformatige Platten aus Textilbeton hergestellt worden. Großflächige Produkte sollen entwickelt und industriell umgesetzt werden. Auch für erste Brückenkonstruktionen, Tragwerksverstärkungen und großformatige Bauteile wie Balkonbodenplatten oder tragende Schalenskonstruktionen konnte die hohe Leistungsfähigkeit von Textilbeton demonstriert werden.²⁸⁴ Ein großes Zukunftspotenzial für den Einsatz textiler Betonbewehrungen wird zum einen in der Verstärkung und Instandsetzung vorhandener Bausubstanz (beständige und dauerhafte Bausanie- rung) gesehen. Zum anderen eröffnen die textilen Bauelemente Architekten und Designern bei Neubauten neue Gestaltungsmöglichkeiten, z. B. für frei geformte Fassaden. So können nicht nur Material und Energie eingespart werden, sondern auch größere frei tragende Konstruktionen oder höhere Wolkenkratzer errichtet werden. Mit der Bewehrung aus den biegsamen Fasergeflechten sind zudem völlig neue geschwungene und gewölbte Formen realisierbar.²⁸⁵

Lagen von
Hochleistungstextilien
in einer
Feinbetonmatrix

Verstärkung und
Instandsetzung
vorhandener
Bausubstanz

Neue Gestaltungs-
möglichkeiten bei
Neubauten

Anwendungsbeispiel adaptive textile Produkte

Durch Integration spezieller Funktionen sind adaptive textile Werkstoffe in der Lage, auf Einflüsse aus der Umgebung zu reagieren. Der äußere

Formgedächtnis-
polymere

²⁸⁴ Ehlig, D. et al.(2012): Textilbeton – Ausgeführte Projekte im Überblick. In: Beton- und Stahlbetonbau, Bd. 107/Nr. 11, S. 777-785.

²⁸⁵ Forschungskuratorium Textil e. V. (2012): Perspektiven 2025: Handlungsfelder für die Textilforschung der Zukunft. Berlin.

Formgedächtnis-
textilien

Einfluss kann elektrischen, thermischen, chemischen oder magnetischen Ursprungs sein. Solche funktionalen Komponenten erzeugen in Textilien einen Mehrwert gegenüber normalen Textilien und ermöglichen innovative Hightech-Produkte. Ein Beispiel dafür sind Formgedächtnispolymere, die sich dadurch auszeichnen, dass sie sich nach der Verformung an ihren Ursprungszustand „erinnern“ und in diesen zurückformen. Die Verformung kann durch Temperatur bzw. Erhitzung oder Lichteinwirkung ausgelöst werden. Potenzielle Einsatzgebiete sind Bereiche, in denen ein aktives Reagieren der Materialien auf veränderte Umwelteinflüsse von Vorteil ist. So kann z. B. Outdoor-Bekleidung oder Arbeitsschutzbekleidung, die aus Formgedächtnistextilien mit einer adaptiven Einstellung der Porengröße bestehen, bei Kälte wärmen und bei Hitze kühlen.²⁸⁶

Auxetische
Materialien

Auch sogenannte auxetische Materialien²⁸⁷ verhalten sich adaptiv, indem sie sich, sobald sie unter Zugbelastung in eine Richtung gestreckt werden, quer zu dieser Richtung ausdehnen. Dieser Effekt kann im Falle von Textilien z. B. durch spezielle Webmuster erreicht werden. So lässt sich bei textilen auxetischen Werkstoffen durch Zugspannung die Porengröße einstellen und eine erhöhte Dehn-, Schub- und Verdrehungsfestigkeit, ein erhöhter Eindrückwiderstand sowie eine erhöhte Bruchzähigkeit und Schwingungsdämpfung bewirken. Neben Forschungsarbeiten haben erste Kommerzialisierungen begonnen. Anvisierte Produkte zielen auf technische und medizinische Textilien, z. B. Filter mit einstellbarer Porengröße, schuss- und explosions sichere Gewebe für Schutzkleidung, Gewebeimplantate oder Druckverbände, die abhängig vom Schwellzustand Medikamente abgeben können.²⁸⁸

Einstellbare
mechanische,
elektrische, optische,
magnetische, akustische
oder biologisch-
chemische Eigen-
schaften

3.11.10 Funktionsmaterialien

Funktionsmaterialien verfügen über Eigenschaften, die sich gezielt verändern lassen. Die einstellbaren mechanischen, elektrischen, optischen, magnetischen, akustischen oder biologisch-chemischen Eigenschaften charakterisieren dann das Verhalten des jeweiligen Bauteils. Funktionsmaterialien werden von den Konstruktionswerkstoffen abgegrenzt, bei denen die konstruktive Gestaltung von Bauteilen im Vordergrund steht. Die jeweiligen Funktionen werden entweder bei der Herstellung in den Massivwerkstoff eingearbeitet oder als Oberflächenschicht auf den Werkstoff aufgebracht. Für die Integration von Funktionen in Werkstoffe

²⁸⁶ Deutscher Fachverlag (Hrsg.) (2010): Trendbook Technical Textiles 2011. Frankfurt am Main, Deutscher Fachverlag, S. 48-53.

²⁸⁷ Auxetische Materialien haben die ungewöhnliche Eigenschaft, dass sie sich bei einer Streckung quer zur Streckrichtung auszudehnen, d. h. in der Mitte dicker werden, und umgekehrt werden sie in der Mitte dünner, wenn sie zusammengedrückt werden. Im Gegensatz dazu werden normale Materialien in der Mitte dünner, wenn sie auseinandergezogen werden und umgekehrt.

²⁸⁸ Auxetix (ohne Jahreszahl): Introduction. URL: www.auxetic.com. Abgerufen am 22.04.2014.

und Bauteile werden neue Fertigungs- und Montageprozessen eingesetzt und entwickelt. Durch ganzheitliche Fertigungssysteme, in denen Funktionsmaterialien, Füge- und Verbindungstechnologien sowie Strukturierungs- und Oberflächentechniken aufeinander eingestellt sind, lassen sich auch multifunktionelle Materialien aufbauen. Multifunktionsmaterialien ersetzen immer häufiger altbewährte Materiallösungen, die bislang nur mit großem Aufwand bzw. hohem Energieeinsatz möglich waren. So lassen sich z. B. in Kunststoffprodukten neben elektronischen Komponenten oder wärmesensitiven und leuchtenden Funktionen gleichzeitig auch schmutzabweisende Schichten, Antikratzbeschichtungen und bakterienhemmende Oberflächeneigenschaften integrieren. Aufgrund der vielfältigen und spezifischen Funktionalitäten können Multifunktionsmaterialien als neue innovative Hightech-Materialien eingestuft werden.

Multifunktionsmaterialien

Bei den Funktionsmaterialien werden Struktur und Eigenschaften zielgerichtet für eine bestimmte Anwendung eingestellt. Daraus ergeben sich in nahezu allen Branchen ein breites Anwendungsspektrum und hohes Innovationspotenzial, das bis 2030 in stärkerem Ausmaß technisch genutzt werden kann. Derzeitig eingesetzt sind sie überwiegend in elektronischen Bauteilen für folgende Anwendungen:

Derzeitig überwiegend in elektronischen Bauteilen

- piezoelektrische Funktionsmaterialien (diese Materialien wandeln mechanische Spannungen in elektrische Signale um und umgekehrt) für den Automobil- und Maschinenbau: Materialüberwachung und Steuerung von Airbags, Reifen und Motoren, wie Drucksensoren, Einspritzdüsen, Beschleunigungsmesser sowie Schwingungsdämpfer zur Vibrations- bzw. Lärmunterdrückung von Konstruktionsbauteilen,
- elektro- und magnetorheologische Flüssigkeiten (ihr Zustand kann elektrisch stufenlos zwischen flüssig und fest eingestellt werden): z. B. Schwingungsdämpfer in Stoßdämpfern, Bremsen etc.,
- photo-, thermo- und elektrochrome Funktionsmaterialien (diese Materialien verändern ihre Farbe durch Einwirkung von Licht, Wärme oder elektrischer Spannung): z. B. abblendbare Scheiben und Rückspiegel in Fahrzeugen, Fassaden-Verschattungssysteme in der Architektur.

Darüber hinaus wurden erste Ansätze für selbstreinigende Funktionsschichten insbesondere für Fenster und Fassaden von Gebäuden entwickelt. Der sog. Lotuseffekt, bei dem von einem Blatt der Lotuspflanze praktisch alle wasserlöslichen Substanzen abperlen, führte bereits zur Entwicklung von extrem schlecht benetzbaren und selbstreinigenden Oberflächenstrukturen, z. B. in Form von Fassadenfarben und Glasbeschichtungen sowie Imprägnierungsschutz für Gartenmöbel, Fensterrahmen, Textilien, Maschinen- und Fahrzeugteile.

Lotuseffekt

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Die Forschung beschäftigt sich momentan mit der Entwicklung von Funktionsmaterialien mit speziellem Fokus auf die Optimierung der Herstellungsverfahren und Bauteileigenschaften sowie die technische Zuverlässigkeit für verschiedene Anwendungen. Mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele mit hohem Potenzial zur Problemlösung bis 2030 werden in Tabelle 30 dargestellt:

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Fahrzeugbau	elektroaktive Polymer-Aktuatoren für einstellbare Bauteile wie Spiegel, <i>Head up</i> -Displays, Lüftungsklappen, Kopfstützen, Fensterheber, Scheinwerfer, Bremsen, Stoßdämpfer, etc. sowie Formgedächtnis-Polymere für adaptive Karosserieteile, die sich der Fahrsituation anpassen.
Flugzeugbau	widerstandsvermindernde und selbstreinigende Oberflächen von Außenbauteilen, adaptive Flügel
Maschinen- und Anlagenbau	magnetostriktive Materialien für steuerbare und adaptive Maschinenbauteile wie schnell schaltende Ventile, Drucksensoren für Pumpen und Rohre sowie Positioniersysteme in der Produktion, Automation und Robotik
Bauindustrie	selbstreinigende Fenster und Fassaden von Gebäuden sowie schaltbare und adaptive Verschattungssysteme
Medizintechnik	antibakterielle medizinische Geräte, Formgedächtnis-Polymere für adaptive Implantate (z. B. Stents) und Nahtmaterialien

Tabelle 30: Exemplarische Auswahl zukünftiger Anwendungen von Funktionswerkstoffen

Ein besonders hohes Innovationspotenzial von Funktionsmaterialien basiert auf der Weiterentwicklung von „intelligenten Werkstoffen“ und „biomimetischen Werkstoffen“, was im Folgenden an möglichen Anwendungen exemplarisch vorgestellt wird.

Anwendungsbeispiel intelligente Werkstoffe für den Maschinen- und Anlagenbau

Intelligente Werkstoffe stellen eine Klasse von Werkstoffen dar, welche sich aus adaptiven, d. h. schaltbaren Werkstoffen entwickelt haben. Diese Materialien sind in der Lage, auf Einflüsse aus der Umgebung zu reagieren und sich veränderten Umweltbedingungen anzupassen. Der äußere Einfluss kann dabei elektrischen, thermischen, chemischen oder magnetischen Ursprungs sein. So können zum Beispiel Schwingungen gedämpft oder die Fließgeschwindigkeit von Flüssigkeiten aufgrund elektromagnetischer Einflüsse verändert werden. Während bei schaltbaren Werkstoffen der Werkstoff von außen mittels Sensorik und Steuerung angepasst werden muss, sind bei intelligenten Werkstoffen diese Funktionen bereits in den Werkstoff integriert. Daraus lassen sich eine Reihe von Vorteilen ableiten; beispielsweise können durch die Integration von Sensoren Probleme mit Verbindungstechniken und unterschiedlichen Wärmeausdehnungen umgangen werden. Zudem können so Baugruppen miniaturisiert und Kosten reduziert werden. Je nach Materialklasse ergeben sich unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten von intelligenten Materialien. In Zukunft wird die technische Entwicklung und Produktumsetzung insbesondere mit elektroaktiven Polymeren (diese Materialien ändern durch das Anlegen einer elektrischen Spannung ihre Form), Formgedächtnis-Polymeren (diese Materialien besitzen ein Erinnerungsvermögen an ihre Ursprungsgestalt) und magnetostruktive Materialien (diese magnetischen Materialien verändern ihre Länge durch den Einfluss eines äußeren Magnetfelds) angestrebt. Gerade magnetostruktive Positionssensoren sind in der Produktion, Automation und Robotik von großem Interesse, da sie eine gute Störfestigkeit sowie einen reibungslosen Betrieb ohne Wartungskosten und Stillstandszeiten über den gesamten Lebenszyklus einer Maschine garantieren.

Elektroaktive
Polymere

Magnetostruktive
Materialien

Anwendungsbeispiel biomimetische Werkstoffe im Fahrzeug- und Flugzeugbau

In der Natur findet sich eine Vielzahl von Strukturen, die für Werkstoffwissenschaftler interessant sind. Der Bionik liegt die Annahme zugrunde, dass die belebte Natur durch evolutionäre Prozesse optimierte Strukturen und Prozesse entwickelt hat, die sich selbstständig an sich verändernde Umweltbedingungen anpassen können. Nach diesem Vorbild der Natur versucht das in den letzten Jahren etablierte interdisziplinäre Forschungsfeld der Bionik biologische Prinzipien auf technische Systeme zu über-

Bionik

Fin-Ray-Effekt

tragen bzw. technisch nachzuahmen.²⁸⁹ Beispielsweise sind im Automobilbau bionische Konstruktionsweisen insbesondere in Hinblick auf Leichtbau und Materialeffizienz von Interesse, u. a. um durch Optimierung der Form des Motorblocks Material und Gewicht einzusparen. Durch Simulationen werden die mechanisch unbelasteten Stellen ermittelt, an denen Material weggenommen werden kann, ohne dass die Stabilität beeinträchtigt wird. Bionisch inspiriert ist auch die Idee, Spoiler so zu konstruieren, dass sie sich der Geschwindigkeit anpassen. Die Spoiler sollen mit variabler Form, ein geschwindigkeitsabhängiges anpassungsfähiges Verhalten zwischen erzeugtem Anpressdruck und Luftwiderstand zeigen. Eine Form der adaptiven Konstruktion ist dem sogenannte *Fin-Ray-Effekt* (Schwanzflossen-Effekt) nachempfunden. Dabei wird ausgenutzt, dass sich bestimmte Schwanzflossen in Richtung einer äußeren Belastung biegen anstatt von ihr weg. Dieses Prinzip wird z. B. für den Flugzeugbau in Erwägung gezogen, damit sich die Profilform der Tragflächen von Flugzeugen den jeweiligen Bedingungen bei Start, Langstreckenflug und Landung optimal anpassen kann. Eine andere bionische Anwendung zielt auf die Weiterentwicklung von selbstreinigenden und reibungsmindernden Oberflächen. Da sich Produkte für selbstreinigende Oberflächen nach dem Prinzip des Lotuseffektes aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Beschädigungen bislang nur eingeschränkt auf dem Markt durchsetzen konnten, werden in verschiedenen FuE-Arbeiten neue Lösungsansätze verfolgt.²⁹⁰

Riblet-Effekt

In ähnlicher Weise soll der sog. *Riblet-Effekt* genutzt werden, um reibungsmindernde Oberflächenstrukturen für den Luftverkehr zu entwickeln. Vorbild dafür sind die schnell schwimmenden Haie, deren Hautoberfläche aus kleinen, dicht aneinander liegenden Schuppen besteht. Auf diesen Schuppen befinden sich parallel zur Schwimmrichtung ausgerichtete scharfkantige und mikroskopisch feine Rillen, die den Reibungswiderstand im Wasser reduzieren. Der Effekt dieser Strukturen lässt sich nicht nur im Wasser, sondern auch in der Luft nutzen. Flugzeuge können mit einer solch nachgebildeten künstlichen *Riblet*-Struktur beschichtet werden, wodurch der Luftwiderstand eines Flugzeugs gesenkt werden kann.²⁹¹

²⁸⁹ BIONIKON e.V. - Bionik-Kompetenznetz (ohne Jahreszahl): BIONIKON - Das Bionik-Kompetenznetz. URL: www.biokon.de. Abgerufen am 22.04.2014.

²⁹⁰ Internationales Bionik-Zentrum, Stiftung für Bionik (ohne Jahreszahl): Bionik. URL: www.bionikzentrum.de. Abgerufen am 22.04.2014.

²⁹¹ biokon.de. URL: www.biokon.de/news/forschungsnews.shtml. Abgerufen am 22.04.2014.

3.11.11 Mineralische Baustoffe

Baustoffe aus mineralischen Rohstoffen wie Steine²⁹², Kies und Sand, Gips²⁹³, Beton, Mörtel und Zement umgeben uns in allen Bereichen des täglichen Lebens: in der Wohnung, am Arbeitsplatz und in Form gebauter Infrastruktur. Sowohl die Gewinnung der mineralischen Rohstoffe als auch deren Weiterverarbeitung zu hochwertigen Baustoffen ist in der Regel sehr energie- und kapitalintensiv.

Moderner Beton, der weltweit wichtigste Baustoff, ist heute ein 6-Stoff-System, das sich aus Zement als Bindemittel, Gesteinskörnung (ein Gemisch aus Kies und Sand), Wasser, diversen Zusatzmitteln und Zusatzstoffen sowie Luft zusammensetzt. Während der Verarbeitung reagiert das zugegebene Wasser mit dem Zement, sodass nach der Erhärtung ein festes, disperses Baustoffgemisch entsteht. Neben der direkten Verarbeitung auf der Baustelle können auch Betonbauteile in mehr oder weniger komplexen Geometrien in der Fabrik vorgefertigt und anschließend vor Ort zusammengefügt werden. Beton ist vor allem aufgrund seiner Druckfestigkeit ein vielfältig eingesetzter Massenbaustoff. Da die Belastbarkeit der meisten Betone bei Zugspannungen deutlich geringer ist, werden Konstruktionen häufig als ein Verbund von Beton mit Bewehrungsstahl ausgeführt. Zunehmend gewinnen hier alternativ zum Stahl andere Bewehrungsmaterialien, z. B. Glas- oder Kohlenstofffasern, an Bedeutung (siehe Anwendungsbeispiel Textilbeton für den Baubereich im Themenfeld textile Werkstoffe).

Zement als
Bindemittel

Massenbaustoff
Beton

Von zentraler Bedeutung für die Betoneigenschaften ist das hydraulische Bindemittel Zement. Für die Zementherstellung werden Kalkstein und Ton zerkleinert und gemahlen und mit hohem Energieaufwand zu sogenanntem Zementklinker gebrannt. Dieser wird dann mit Gips, Hüttensand und ggf. weiteren Zusätzen zu Zement verarbeitet. Die Eigenschaften des Betons während der Verarbeitung und im fertigen Bauwerk können aber auch durch die gezielte Zugabe von Zusatzmitteln und -stoffen verändert werden. So gibt es beispielsweise Zusatzmittel, die den Frischbeton verflüssigen, das Erstarren verzögern oder beschleunigen, zur Bildung von Luftporen führen oder den Beton verdichten. Als Zusatzstoffe kommen

Zementherstellung

²⁹² Neben Natursteinen und Ziegeln sind hier vor allem Kalksandsteine als künstlich hergestellte Mauersteine zu nennen, die für den Bau von Innen- und Außenwänden zum Einsatz kommen. Sie weisen eine hohe Festigkeit auf, bieten hervorragende Schallschutz- und Brandschutzeigenschaften und wirken temperaturregulierend, was sich positiv auf das Raumklima auswirkt. Zur Herstellung werden gebrannter Kalk, Sand und Wasser gemischt und zu Steinrohlingen gepresst, die dann unter hohem Druck bei Temperaturen von etwa 200°C gehärtet werden.

²⁹³ Gips ist ein Calciumsulfat und kommt in der Natur häufig in Form von Gipsstein vor. Ebenso fällt es bei verschiedenen chemischen Industrieverfahren als Nebenprodukt an. Dadurch entstehen für die Herstellung von Gips vergleichsweise geringe Energiekosten. Die einfache Verarbeitbarkeit und ideale bautechnische Eigenschaften machen Gips zu einem vielseitig einsetzbaren Baustoff als Putz, Estrich oder in Form von Gipsplatten.

*Ultra High
Performance
Concrete*

u. a. Gesteinsmehle, Pigmente, Flugasche und Silikatstaub zum Einsatz. Entsprechende Zugaben ermöglichen extrem dichte Gefüge der Feinstoffe und ein geringes Wasser-Zement-Verhältnis. Auf diese Weise werden Betone mit einer immer höheren Druckfestigkeit entwickelt, sogenannte Hochleistungsbetone oder auch ultrahochfester Beton (*Ultra High Performance Concrete*, kurz: UHPC). Festerer Beton führt in der Regel zu einem geringeren Materialeinsatz und ermöglicht so filigranere Bauweisen und besonders tragfähig Strukturen. Anwendungsbeispiele, die ein hohes Lösungs- und Innovationspotenzial aufweisen bzw. voraussichtlich auch noch bis 2030 aufweisen werden, sind:

- Fußgängerbrücken aus UHPC,
- filigrane Bauelemente wie Geschosstreppen und Gebäudefassaden aus unbewehrtem UHPC-Sichtbeton,
- Wolkenkratzer aus hochfestem Beton (z. B. Burj Khalifa in Dubai, mit 830 Metern Höhe das aktuell höchste Bauwerk der Welt).

Zukünftige Anwendungen mit hohem Potenzial bis 2030

Zement ist das in
größter Menge
industriell
hergestellte
Produkt der Welt

Die stetig wachsende Nachfrage nach Baustoffen, insbesondere Stahlbeton, die intensiven Bauaktivitäten vor allem in Wachstumsstaaten, der Bedarf der Erneuerung von bestehenden Gebäuden und Infrastrukturen sowie steigende Ansprüche an Qualität, Umweltverträglichkeit und Ressourceneffizienz sind die zentralen Innovationstreiber im Bereich der weltweit in großen Mengen eingesetzten Baustoffe. Zement als Bindemittel für Beton ist das in größter Menge industriell hergestellte Produkt der Welt. 2013 wurden weltweit etwa 3,4 Milliarden Tonnen Zement produziert. Die Herstellung von sogenanntem Portland-Zement verursacht ca. 5% der von Menschen erzeugten CO₂-Emissionen. Besonders zukunftsweisend für den Zeithorizont bis 2030 und darüber hinaus sind Entwicklungen, die zu einem niedrigeren Material- und Energieeinsatz für Betonwerkstoffe beitragen.²⁹⁴ Tabelle 31 zeigt mögliche zukünftige Anwendungsbeispiele von mineralischen Baustoffen.

Anwendungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Textilbeton	„schlankere“ Betonbauweisen, Bauwerke von über 1 km Höhe
„Grüner“ Beton	Reduktion von Energiebedarf und CO ₂ -Emissionen in allen Anwendungsbereichen von Beton

²⁹⁴ Amato, I. (2013): Concrete Solutions. In: Nature, Bd. 494, S. 300-301.

Selbstheilender Beton	Verlängerung der Lebensdauer von Betonbauwerken, z. B. Brücken, durch die Ausnutzung von Mechanismen zum selbstständigen Schließen von Rissen
-----------------------	---

Tabelle 31: Zukünftige Anwendungsbeispiele von mineralischen Baustoffen.

Anwendungsbeispiel „Grüner“ Beton

Der Druck, den Energiebedarf und CO₂-Ausstoß bei der Betonproduktion zu senken, wird aufgrund steigender Energiekosten und globaler Umweltauswirkungen bei gleichzeitig wachsendem Bedarf bis 2030 noch deutlich zunehmen. Schon moderate Effizienzsteigerungen im Herstellungsprozess können aufgrund der großen Masse an weltweit genutztem Beton signifikante Auswirkungen auf den globalen Energiebedarf und die damit verbundenen CO₂-Emissionen haben – vorausgesetzt die entsprechenden technologischen Innovationen werden von der Industrie in der Breite angenommen und umgesetzt. Vielversprechend sind hier Ansätze, die das besonders energieintensive Brennen des Zementklinkers für das Bindemittel Zement adressieren. Dieser Prozessschritt erfordert bislang Temperaturen von etwa 1.450°C. Eine mögliche Alternative zur Herstellung eines zementären Bindemittels wurde am Karlsruher Institut für Technologie KIT entwickelt und unter dem Markennamen Celitement kommerzialisiert. Dabei handelt es sich um eine Familie hydraulischer Bindemittel auf Basis bestimmter Calciumhydroxysilikaten. Die Herstellung erfolgt bei Temperaturen von 150 bis 300°C in einem Druckautoklaven. Darüber hinaus ist auch die Bereitstellung der Rohstoffe für die Herstellung von Celitement-Bindemitteln weniger energieintensiv als bei herkömmlichem Portland-Zement. Celimente können wie herkömmlicher Zement verarbeitet und als Bindemittel für Beton eingesetzt werden. Die Energie- und CO₂-Bilanz von Beton könnte somit durch die Substitution von Zement durch Celitement künftig deutlich verbessert werden.²⁹⁵

Bindemittel auf Basis bestimmter Calciumhydroxysilikate

Ein anderer Ansatz sieht die Nutzung von Flugasche, die als Abfallprodukt in Kohlekraftwerken anfällt, als Rohstoff für einen „grünen“ Beton vor. Zwar werden heute schon Zemente mit einem Anteil an Flugasche von bis zu 15% hergestellt. Es gibt jedoch Entwicklungen zu Bindemitteln, die bis zu 95% aus Flugasche bestehen und bei denen der energieintensive Brennvorgang vollständig entfällt. Die Entwickler geben dazu Vorteile hinsichtlich Festigkeit und Langlebigkeit des damit hergestellten

Nutzung von Flugasche

²⁹⁵ Celitement GmbH (ohne Jahreszahl): Idee und Prinzip Celitement. URL: www.celitement.de/de/idee-und-prinzip.html. Abgerufen am 22.04.2014.

Betons an, die zu weiteren Effizienzsteigerungen gegenüber herkömmlichen Beton führen könnten.²⁹⁶

Anwendungsbeispiel selbstheilender Beton

Rissbildung

Wegen seiner relativ geringen Zugfestigkeit neigt Beton zur Rissbildung bei zu hohen Zugbelastungen. Sind einmal solche Risse entstanden, können sie weiter wachsen und schließlich zur Korrosion der Bewehrung durch eindringende Luft und Feuchtigkeit führen. Als Konsequenz ergeben sich daraus hohe Instandhaltungskosten oder falls Reparaturen nicht rechtzeitig erfolgen eine Verkürzung der Lebensdauer von Betonbauwerken. Daher wird an verschiedenen Konzepten für „selbstheilenden“ Beton gearbeitet, bei dem entstehende Risse selbstständig wieder geschlossen werden und ein Risswachstum verhindert wird. Grundsätzlich lassen sich die Ansätze für selbstheilenden Beton in zwei Gruppen einordnen. Zum einen kann das Betongemisch derart verändert werden, dass bei einem Riss intrinsische Selbstheilungsmechanismen zum Tragen kommen. Dabei wird ausgenutzt, dass Zementbestandteile, die beim Aushärten nicht vollständig ausgehärtet sind, in einem feinen Riss mit Wasser reagieren und so neues Material bilden, das den Riss ausfüllt. Allerdings können auf diese Weise nur sehr kleine Risse im Mikrometerbereich geheilt werden.

Kapseln im Beton

Die zweite Gruppe von Ansätzen besteht darin, Kapseln in den Beton einzubringen, die eine Substanz zur Selbstheilung oder auch unterschiedliche reaktive Komponenten enthalten. Entsteht ein Riss im Beton, werden dabei auch einige dieser Kapseln aufgebrochen. Die heilende Substanz tritt dann aus und bildet zusammen mit einem Reaktionspartner aus anderen Kapseln oder aus der Betonmatrix ein aushärtendes Material, das den Riss verschließt. Mit solchen kapselbasierten Systemen können auch größere Risse selbstständig repariert werden. Hierzu gibt es bereits zahlreiche Untersuchungen, bei denen beispielsweise Cyanacrylate, Epoxidharze, Polyurethane oder auch Lösungen mit Bakterien zum Einsatz kommen. Eine weitere Variante besteht darin, ein vaskuläres Kanalsystem in den Beton einzubetten, das die Reparatursubstanz enthält. Dies hat gegenüber Kapseln den Vorteil, dass das System auch bei mehrfacher Rissbildung kontinuierlich aus einem Reservoir nachgefüllt werden kann.

Vaskuläres Kanalsystem im Beton

Auf solche Weise modifizierter selbstheilender Beton könnte in besonders kritischen und stark beanspruchten Segmenten von Bauwerken die Zuverlässigkeit erhöhen und den Instandhaltungsaufwand deutlich verringern. Welcher der genannten Ansätze sich durchsetzen wird und in

²⁹⁶ CERATECH (ohne Jahreszahl): URL: www.ceratechinc.com/. Cement Products. Abgerufen am 22.04.2014.

welcher Breite dieser bis 2030 zur Anwendung kommt, wird sehr stark davon abhängen, wie hoch die Kosten dafür sind.²⁹⁷

²⁹⁷ Van Tittelboom, K.; De Belie, N. (2013): Self-Healing in Cementitious Materials – A Review. In: *Materials*, Bd. 6, S. 2182-2217.

4 LITERATURVERZEICHNIS

- Abbate, J. (2010): Privatizing the Internet: Competing Visions and Chaotic Events, 1987-1995. In: IEEE Annals of the History of Computing 32, Nr. 1.
- Achtert, W. et al. (2010): Industrielle Softwareentwicklung. Leitfaden und Orientierungshilfe. Berlin: Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V.
- agitano.com. URL: www.agitano.com/da-dlr-auf-der-hannover-messe-2013-helfer-fur-morgen-und-alleskonner-in-der-brennkammer/52480. Abgerufen am 22.04.2014.
- Ahrens, V. (2012): Inflation industrieller Revolutionen. In: Productivity Management 17 (5).
- Amato, I. (2013): Concrete Solutions. In: Nature 494.
- Andre, F. et al. (2013): Personalized medicine in oncology. In: Pharmacogenomics 14, S. 931-939.
- Armstrong, S. (2012): Photonic Computing: Mimicking the brain. In: Nature Photonics 6, Nr. 9.
- Ärzte Zeitung (2009). URL: www.aerztezeitung.de/medizin/fachbereiche/sonstige_fachbereiche/ernaehrung/article/556918/geschmack-gene-spur.html. Abgerufen am 17.04.2014.
- Asero, R. (2007): IgE-Mediated food allergy diagnosis: Current status and new perspectives. In: Mol Nutr Food Res, 51, S. 135-147.
- Astor, M. et al. (Prognos AG); Prof. Dr. Lukas, U. et al. (Fraunhofer IGD); Jarowsky, M.; Bartels, H.-J. (MC Marketing Consulting)(2013): Marktperspektiven von 3D in industriellen Anwendungen, Abschlussbericht.
- auxetic.com. URL: www.auxetic.com. Abgerufen am 22.04.2014.
- Baier, R.; Schuckließ, W.; Jachtmann, Y. (2013): Einsparpotenziale des Radverkehrs im Stadtverkehr. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen URL: <http://bast.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2013/697/pdf/V227b.pdf>. Abgerufen am 30.10.2013
- Beckert, B.; Bühler, J. (2012): Gesamtwirtschaftliche Potenziale Intelligenter Netze in Deutschland. Langfassung der Studie für den BITKOM. Berlin: Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien. Seite 40f. URL: www.bitkom.org/files/documents/Studie_Intelligente_Netze%282%29.pdf. Abgerufen am 24.02.2014.
- Beer, G. (15.09.2013): Riskanter Blick ins Abseits. In: ACE Lenkrad.
- Beifahrer? Nein, danke! (15.11.2013). In: ACE Lenkrad, Heft 11/2013.
- Benning, T. (Februar 2013): Google's self-driving car hits the streets in Austin. In: Dallas Morning News: URL: <http://transportationblog.dallasnews.com/2013/02/googles-self-driving-car-hits-the-streets-in-austin.html/>. Abgerufen am 17.04.2014.
- Berekovic, M. et al. (2008): Rekonfigurierbare Architekturen. In: Informatik Spektrum 31, Nr. 4.

- berkeley.edu (2013): Smart Dust. URL: <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/>. Abgerufen am 22.04.2014.
- BIOKON e.V. - Bionik-Kompetenznetz (ohne Jahreszahl): BIONIK - Das Bionik-Kompetenznetz. URL: www.biokon.de. Abgerufen am 22.04.2014.
- bionikzentrum.de. URL: www.bionikzentrum.de. Abgerufen am 22.04.2014.
- BITKOM (Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.) (2012): Der Staat als Gestalter der digitalen Welt. Industriepolitiches Grundsatzpapier. Berlin. URL: www.bitkom.org/de/publikationen/38338_71972.aspx. Abgerufen am 24.04.2014.
- BITKOM und Fraunhofer ISI (2012): Gesamtwirtschaftliche Potenziale intelligenter Netze in Deutschland. Berlin. URL: [www.bitkom.org/files/documents/Studie_Intelligente_Netze\(2\).pdf](http://www.bitkom.org/files/documents/Studie_Intelligente_Netze(2).pdf). Abgerufen am 24.04.2014.
- BMBF (2010): 10-Punkteprogramm zu Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. URL: www.bmbf.de/pubRD/10_Punkteprogramm_zu_Materialwissenschaft_und_Werkstofftechnik.pdf. Abgerufen am 24.04.2014.
- BMBF (2011): nanoDE Report 2011. Status quo der Nanotechnologie in Deutschland, Bonn, BMBF.
- BMBF (2013): Fördermaßnahme „Kompetenzcluster der Ernährungsforschung“ im Rahmen der Hightech Strategie 2020, BMBF.
- BMBF (Hrsg.) (2013): Photonik – Branchenreport 2013. URL: photonik.vdma.org. Abgerufen am 24.04.2014.
- BMELV (Hrsg.) (2013): Neue Produkte: Aus Natur gemacht – Nachwachsende Rohstoffe im Alltag. URL: www.bmelv.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/NeueProdukteNaWaRoImAlltag.pdf?blob=publicationFile. Abgerufen am 24.04.2014.
- BMELV. et al. (Hrsg.) (2012): Roadmap Bioraffinerien. URL: www.bmbf.de/pub/roadmap_bioraffinerien.pdf. Abgerufen am 24.04.2014.
- Bonnet, J. et al. (2013): Amplifying genetic logic gates. In: Science 340, Nr. 6132.
- Bourzac, K.(19.06.2009): Neue Chance für die Luft-Batterie. In: Technology Review online. URL: <http://heise.de/-276585>. Abgerufen am 17.04.2014.
- Brandl, S.; Scharioth, S. (2013): IT-Sicherheitslage im Mittelstand 2013. Update zur Studie Deutschland sicher im Netz aus dem Jahr 2012. Berlin: Deutschland sicher im Netz e.V.
- Briggs, M. (17.01.2013): Future of Mobility – New Market Entrants in Mobility Integration. In: Frost & Sullivan. URL: <http://de.slideshare.net/FrostandSullivan/future-of-mobility-16093656>. Abgerufen am 17.04.2013.

- Broschüre „ZUKUNFTSWERKSTOFF KERAMIK“, Kläger Spritzguss GmbH & Co. KG.
- Broy, M. (Hrsg.) (2010): Cyber-physical systems. Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Buchmann, J. (Hrsg.) (2012): Internet Privacy: Eine multidisziplinäre Bestandsaufnahme/A multidisciplinary analysis. Heidelberg, Berlin: Springer Verlag (acatech Studie).
- Bundesgesetzblatt Teil II (1977): Gesetz zu den Übereinkommen vom 08. November 1968 über den Straßenverkehr und über Straßenverkehrszeichen, zu den europäischen Zusatzübereinkommen vom 1. Mai 1971 zu diesen Übereinkommen sowie zum Protokoll vom 1. März 1973 über Straßenmarkierungen. Bonn, Bundesanzeiger Verlag GmbH. URL: www.bgbl.de/Xaver/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl277s0809.pdf. Abgerufen am 17.03.2014.
- Bundesregierung (2012): Roadmap Bioraffinerien, http://www.bmbf.de/pub/roadmap_bioraffinerien.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.
- Burns, L. D. (09.05.2013): A vision of our transport future. In: Nature (497).
- Carbon Composites Magazin (2013), Carbon Composites e.V., Ausgabe 2.
- Castellazzi, A. et al. (2013): Probiotics and food allergy. In: Italian Journal of Pediatrics 36.
- celiment.de. URL: www.celiment.de/de/idee-und-prinzip.html. Abgerufen am 22.04.2014.
- ceratechinc.com. URL: www.ceratechinc.com/. Abgerufen am 22.04.2014.
- cfk-convention.de. URL: www.cfk-convention.com/info-center/reviews/cfk-valley-stade-convention-2013.html. Abgerufen am 22.04.2014.
- cfk-maschinenbau.de. URL: www.Cfk-Maschinenbau.de. Abgerufen am 22.04.2014.
- Chadwick, R. (2004): Nutrigenomics, individualism and public health. In: Proceedings of the Nutrition Society, Volume 63, Issue 01.
- chip.de (2011): Kontaktlinsen-Display: Pixel im Auge. URL: www.chip.de/news/Kontaktlinsen-Display-Pixel-im-Auge_53038271.html. Abgerufen am 22.04.2014.
- Cifuentes, A. (2013): Foodomics: Advanced Mass Spectrometry. In: Modern Food Science and Nutrition, Wiley.
- Cisco Systems (2013): The Zettabyte Era—Trends and Analysis. URL: www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/VNI_Hyperconnectivity_WP.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.
- cleanslate.stanford.edu. URL: www.cleanslate.stanford.edu/. Abgerufen am 17.04.2014.
- Committee on Harnessing Light (Hrsg.) (2013): Optics and Photonics: Essential Technologies for Our Nation, National Academies Press, Washington D. C.

- composites.ch. URL: www.composites.ch/co-cfk/de/hs-pol-composites-vw-mat.htm. Abgerufen am 22.04.2014.
- cyberphysicalsystem.de (2013): eGrain. URL: <http://cyberphysicalsystem.de/>. Abgerufen am 22.04.2014.
- darpa.mil (2013). In Vivo Nanoplatforms IVN. URL: www.darpa.mil/Our_Work/MTO/Programs/In_Vivo_Nanoplatforms_IVN.aspx. Abgerufen am 22.04.2014.
- Das, S. (2011): Special issue on Transitioning from Microelectronics to Nanoelectronics. In: IEEE Computer 44, Nr. 2.
- designnews.com (2011). Printed Sensor Detects Improvised Explosive Devices. URL: www.designnews.com/document.asp?doc_id=235216&dfpPPParams=ind_183,aid_235216&dfpLayout=article. Abgerufen am 22.04.2014.
- Deutsche Akademie für Verkehrswissenschaft e.V., 38. Deutscher Verkehrsgerichtstag, Goslar 2000: Empfehlung, Arbeitskreis V, Fahrerassistenz- und Leitsysteme. URL: www.gutachterweiss.de/infoseiten/downloads/empfehlungen_38vgt.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.
- Deutsche Bahn AG: Nachhaltigkeitsbericht 2012, S. 86. URL: www.deutschebahn.com/file/4341640/data/nachhaltigkeitsbericht2012.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.
- Deutsche Post AG (2010): Delivering Tomorrow – Zukunftstrend Nachhaltige Logistik. URL: www.delivering-tomorrow.com/wp-content/uploads/2012/02/dpdhl_delivering_tomorrow_studie.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.
- Deutsche Post AG (2012): Delivering Tomorrow – Logistics 2050. URL: www.delivering-tomorrow.com/wp-content/uploads/2012/02/Szenario_Study_Logistics_2050.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.
- Die App DB Navigator. Deutsche Bahn AG (o. D.). URL: www.bahn.de/p/view/buchung/mobil/db-navigator.shtml. Abgerufen am 17.04.2014.
- DIN (2009): PAS 1094:2009-12. Hybride Wertschöpfung - Integration von Sach- und Dienstleistung.
- DIN (Hrsg.) (2000): Begriffsbestimmungen für die Einteilung der Stähle; Deutsche Fassung EN 10020:2000. Berlin, Beuth Verlag.
- DIW Berlin (21.11.2012): Mehr Frauen und ältere Menschen am Steuer. URL: www.diw.de/de/diw_01.c.411784.de/themen_nachrichten/auto_mobiltaet_mehr_frauen_und_aeltere_menschen_am_steuer.html. Abgerufen am 17.04.2014.
- Dokumentation des 12. Deutschen Verkehrssicherheitsrats-Forums „Sicherheit und Mobilität“ (2006): Fahrerassistenzsysteme – Innovationen im Dienste der Sicherheit. München. URL: www.besterbeifahrer.de/fileadmin/redaktion/Downloads/170107_FAS_Doku_einzel.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

-
- Doolin, C. et al. (2013): Augmented Government: Transforming government service through augmented reality. Deloitte Consulting LLP. URL: http://www.deloitte.com/assets/Dcom-UnitedStates/Local%20Assets/Documents/Federal/us_fed_augmented_government_060613.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.
- dw.de (2012) Mit einem Radar durch Wände sehen. URL: www.dw.de/mit-einem-radar-durch-waende-sehen/a-16314472. Abgerufen am: 18.10.2013.
- Eadally, S. et al. (2013): Special issue on Securing Cyberspace in the 21st Century. In: IEEE Computer 46, Nr. 4.
- ecotec-energiesparhaus.de. URL: www.ecotec-energiesparhaus.de/fileadmin/Daten/BINE-Hightech-fuer-Gebaeudefassaden.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.
- Ehlig, D. et al.(2012): Textilbeton – Ausgeführte Projekte im Überblick, Beton- und Stahlbetonbau 107 (11).
- Eickenbusch, H., Zweck, A. (2010): Textilien - ein Blick in die nähere Zukunft. In: Trendbook Technical Textiles 2011. Frankfurt am Main, Deutscher Fachverlag.
- e-mobil BW GmbH, Fraunhofer IPA, Universität Stuttgart und DLR (2012): Leichtbau in Mobilität und Fertigung. URL: www.ipa.fraunhofer.de/fileadmin/www.ipa.fhg.de/Publikationen/Leichtbaustudie.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.
- ensinger-online.de. URL: www.ensinger-online.com/de/hochleistungskunststoffe-werks/kunststoffgrundlagen/. Abgerufen am 22.04.2014.
- Estrin, D. et al. (2002): Connecting the physical world with pervasive networks, IEEE Pervasive Computing, vol. 1, no. 1.
- EUROFER (Hrsg.) (2013): A steel roadmap for a low carbon Europe 2050. URL: www.eurofer.be/eurofer/Publications/pdf/2013-Roadmap.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.
- Europäische Kommission (2013): Aktionsplan für eine wettbewerbsfähige und nachhaltige Stahlindustrie in Europa. URL: http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/metals-minerals/files/steel-action-plan_de.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.
- European Commission (2011a): Workshop on “Network and Information Security: Research Ideas”. Workshop report. Brussels. URL: <http://cordis.europa.eu/fp7/ict/security/workshop22092011.pdf>. Abgerufen am 24.04.2014.
- European Commission (2011b): Workshop on “Privacy Protection and ICT: Research Ideas”. Workshop report. Brussels. URL: <http://cordis.europa.eu/fp7/ict/security/workshop-report-privacy-research-ideas-public.pdf>. Abgerufen am 24.04.2014.
- European Commission (28.6.2013): Integrating maritime transport emissions in the EU's greenhouse gas reduction policies. URL: http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/shipping/docs/com_2013_479_en.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

- European Science Foundation (2012): ESF Forward Look Personalized Medicine for the European Citizen. Strasbourg.
- Faupel, F. et al. (2010): Metallische Gläser – robust und extrem vielseitig. URL: www.weltderphysik.de/gebiete/stoffe/metalle/metallische-glaeser/. Abgerufen am 22.04.2014.
- Feldmann, A. (2007): Internet Clean-Slate Design: What and Why? In: ACM SIGCOMM Computer Communication Review 37, Nr. 2, S. 59-64.
- festo.com (2009): AquaPenguin. URL: http://www.festo.com/cms/de_corp/9777.htm. Abgerufen am 22.04.2014.
- Flinc – CO₂ sparen per Mitfahrgelegenheit (18.11.2013). In: Handelsblatt (Sonderveröffentlichung von GE). URL: www.handelsblatt.com/adv/handelsblatt-ge-at-work/energy-awards-co2-sparen-per-mitfahrgelegenheit/v_adv/9091226.html. Abgerufen am 17.04.2014.
- Flugzeug der Zukunft - DLR forscht an Blended Wing Body (09.11.2011). URL: www.dlr.de/dlr/presse/desktopdefault.aspx/tabid-10172/213_read-1445/. Abgerufen am 17.04.2014.
- FNR (Hrsg.) (2010): Nachwachsende Rohstoffe in der Industrie. URL: www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_228-bro_nr_industrie_dt_15072010_02_klein.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.
- focus.de. URL: http://www.focus.de/wissen/technik/tid-19194/ingenieurwissenschaften-groesste-bruecke-aller-zeiten-ein-ding-der-unmoeglichkeit_aid_532303.html. Abgerufen am 22.02.2014.
- Fox, B. (2007). URL: www.newscientist.com/article/dn11162-invention-edible-rfid.html. bgerufen am 17.04.2014.
- Fraunhofer-Verbünde IuK-Technologie, Verteidigungs- und Sicherheitsforschung (2014): Cyber-Sicherheit 2020: Herausforderungen für die IT-Sicherheitsforschung. Positionspapier. München: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.
- Frischbier, S. et al. (2012): Emergence as Competitive Advantage - Engineering Tomorrow's Enterprise Software Systems. In: Maciaszek, L. A.; Cuzzocrea, A. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 14th International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS 2012), Wroclaw, Poland, 28 June - 1 July, 2012, Volume 3. SciTePress.
- Frost & Sullivan (2012): Market Report: Western European Market for Polymers in Medical Devices.
- Fuller, S. H.; Millett, L. I. (2011): Computing Performance: Game Over or Next Level? In: IEEE Computer 44, Nr. 1.
- fz-juelich.de. URL: www.fz-juelich.de/portal/DE/Forschung/EnergieUmwelt/DynamischeKraftwerke/Waermedaemmschichten/artikel.htm l. Abgerufen am 22.04.2014.
- Garber, K. (2012): First FDA-approved beta-amyloid diagnostic hits the market. Nature Biotechnology 30, 575.

-
- Gebhardt, A. (2007): Generative Fertigungsverfahren – Rapid Prototyping – Rapid Tooling – Rapid Manufacturing. 3. Aufl. München: Carl Hanser Verlag.
- golem.de (2013): Roboterwürfel sollen Möbel und Brücken bauen. URL: www.golem.de/news/m-blocks-roboterwuerfel-sollen-moebel-und-bruecken-bauen-1310-101993.html. Abgerufen am 22.04.2014.
- golem.de. (2012) URL: www.golem.de/news/siri-im-mercedes-neue-klasse-nutzt-apples-sprachsteuerung-1202-90132.html. Abgerufen am 17.04.2014.
- Gongolsky, M. (2009): Katastrophenschutz: Kanal-Kidnapping für Notfälle. URL: www.spiegel.de/netzwelt/tech/katastrophenschutz-kanal-kidnapping-fuer-notfaelle-a-620978.html. Abgerufen am 22.04.2014.
- Gram, M.; Gugg, C. (2013): Einsatzmöglichkeiten von Cyber-Physical Systems im Lebenszyklusmanagement von Anlagen. In: *Industrie Management* 29 (1).
- Grimm, V. et al. (2011): Biomasse – Rohstoff der Zukunft für die chemische Industrie. *Zukünftige Technologien* Nr. 90. Düsseldorf, VDI Technologiezentrum GmbH.
- Grotelüsch, F. (September 2011): Die vierte Dimension des Fliegens. In: *Bild der Wissenschaft*, S. 92-95.
- Grün, G.-C. (29.06.2012): Stauforscher tricksen den „Störfaktor Mensch“ aus. In: *ZEIT online*. URL: www.zeit.de/wissen/2012-06/stauforschung-technik/komplettansicht. Abgerufen am 17.04.2014
- Gutachten des Sachverständigenrates zur Begutachtung der Entwicklung im Gesundheitswesen. URL: www.svr-gesundheit.de. Abgerufen am 17.04.2014
- Handbuch Faserverbundkunststoffe (2009): Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen, AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V., Vieweg+Teubner Verlag.
- heise.de (2013): <http://www.heise.de/tp/artikel/39/39565/1.html>. Abgerufen am 17.04.2014
- Helal, S. (2011): Special issue on Smart Cities. In: *IEEE Computer* 44, Nr. 6.
- Hischke, S.; Knauth, P. (Hrsg.) (2011): *Digitale Infrastrukturen. Jahrbuch 2011/2012 der Arbeitsgruppe 2 des Nationalen IT-Gipfels*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.
- homelandsecuritynewswire.com (2012): Standoff explosive detection takes step backward. URL: www.homelandsecuritynewswire.com/dr/20121211-terahertz-waves-for-explosives-detection. Abgerufen am 22.04.2014
- Hunt, R.; Zeadally, S. (2012): Network forensics: An analysis of techniques, tools, and trends. In: *IEEE Computer* 45, Nr. 12.

- Hüsing, B. (2010): Individualisierte Medizin – Potenziale und Handlungsbedarf. Z. Evid. Fortbild. Qual. Gesundh.wesen 104.
- Hüsing, B., Hartig, J.; Bührlen, B.; Reiß, T.; Gaisser, S. (2008): Individualisierte Medizin und Gesundheitssystem. TAB Arbeitsbericht Nr. 126. Berlin.
- Hutle, M. (2013): Zukunft der Industriesysteme. Vernetzung und Sicherheit. In: Industrie Management 29 (1).
- ibm.com (2013): What is Big Data?. URL: www.ibm.com/big-data/us/en. Abgerufen am 22.04.2014
- IDATE (2012): Smart Cities. Digital technology behind the smart city. Market Research Report. Montpellier: Institut de l'Audiovisuel et des Télécommunications en Europe.
- ikts.fraunhofer.de. URL: www.ikts.fraunhofer.de/de/forschungsfelder/verfahrenbauteile/formgebung/pulverspritzguss.html. Abgerufen am 17.04.2014
- industrieanzeiger.de. URL: www.industrieanzeiger.de/fertigung/article/12503/35282102/High-Tech-Werkstoff-mit-Zukunft/art_co_INSTANCE_0000/maximized/. Abgerufen am 22.04.2014.
- Initiative Biosicherheit des BMBFs. URL: www.biosicherheit.de/lexikon/775.antisense.html. Abgerufen am 17.04.2014.
- Innovationsreport Textil (2013), INNtex Innovation Netzwerk Textil e.V.
- International Technology Roadmap for Semiconductors 2011 Edition. URL: www.itrs.net/Links/2011ITRS/Home2011.htm. Abgerufen am 22.04.2014.
- iosb.fraunhofer.de (2013): SmartControlRoom. URL: www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/6620. Abgerufen am 24.04.2014.
- ISO TC 229, Standard ISO/TS 80004-4: 2011.
- ISO-Standard TS 27687 (2008): Nanotechnologies – Terminology and definitions for nano-objects – Nanoparticle, nanofibre and nanoplate.
- ITRS (2012): International Technology Roadmap for Semiconductors, 2012 Update. Austin, TX: SEMATECH. URL: www.itrs.net/Links/2012ITRS/Home2012.htm. Abgerufen am 24.04.2014.
- Kagermann, H. et al. (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Hg. v. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. Frankfurt am Main. URL: www.forschungsunion.de/veroeffentlichungen. Abgerufen am 24.04.2014.
- Kaiser, O. S. et al. (Juli 2011): Elektromobilität. ITA-Kurzstudie, Zukünftige Technologien Nr. 93. URL: www.innovationsbegleitung.de/pdf/Elektromobilitaet.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

- Karge, D. (August 2012): Google Tours. In: Bild der Wissenschaft.
- Kessler, G. C. (2013): Special issue on Advancing the Science of Digital Forensics. In: IEEE Computer 45, Nr. 12.
- Kletti, J. (2013): Das MES der Zukunft. MES 4.0 unterstützt Industrie 4.0. In: Productivity Management 18 (2).
- Koomey, J. G. et al. (2011): Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing. In: IEEE Annals of the History of Computing 33, Nr. 1.
- Krämer, J.; Wiewiorra, L.; Weinhardt, C. (2013): Net Neutrality: A progress report. In: Telecommunications Policy 37, Nr. 9.
- kunststoff-magazin.de. URL: www.kunststoff-magazin.de/Werkstoffe.htm. Abgerufen am 22.02.2014.
- k-zeitung.de. URL: <http://www.k-zeitung.de/Laengste+CFK-Balken-bruecke+der+Welt/150/1087/36270/>. Abgerufen am 22.02.2014.
- Langner, R. et al. (2012): Metallische Gläser. URL: <http://werkstoffzeitschrift.de/blogwerkstoffe/metallische-glaser/>. Abgerufen am 22.02.2014.
- Lenkungskreis für den Nationalen Strategieprozess „Innovationen in der Medizintechnik“ (Hrsg.) (2012): Schlussbericht. Berlin. URL: www.strategieprozess-medizintechnik.de/. Abgerufen am 17.04.2014.
- leopoldina.de. URL: www.leopoldina.org/de/presse/nachrichten/stellungnahme-zur-antibiotika-forschung/. Abgerufen am 17.04.2014.
- Levy, G. et al.(2003): Rapid Manufacturing and Rapid Tooling Technologies with Layer Manufacturing Technologies, State of the Art and Future Perspectives. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology 55, Heft 2.
- Lewis, K. (Mai 2013): Platforms for antibiotic discovery. In: Nature Reviews 12, S. 371-387.
- Li, X.; Gani, A.; Salleh, R.; Zakaria, O. (2009): The Future of Mobile Wireless Communication Networks. In: Chai, S.; Wen, D. et al. (Hrsg.): Proceedings of the International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN 2009), 27-28 February 2009, Macau, China. IEEE Computer Society.
- Lin, S.-C. et al.(2011): Optogenetics: Background and Concepts for Neurosurgery. Neurosurgery, Bd. 69
- Magazin „Perspektiven 2015: Handlungsfelder für die Textilforschung der Zukunft“ (2012), Forschungskuratorium Textil e. V.
- Mariman, E. (2006): Nutrigenomics and nutrigenetics: the omics-revolution in nutritional science. In: Biotechnol Appl Biochem.
- Martinenghi, R. et al. (2012): Photonic Nonlinear Transient Computing with Multiple-Delay Wavelength Dynamics. In: Physical Review Letters 108, Nr. 244101.
- Maxwell, A. (2002): Randomized trial of a medical food for the dietary management of chronic, stable angina. In: J Am Coll Cardiol, 39, 1, S. 37-45.

- mayr-cfk.de. URL: www.mayr-cfk.de/cfk_medizintechnik.html. Abgerufen am 22.04.2014.
- Meier, C. (2012): Selbstheilende Materialien – Risse, die sich von selbst schließen. URL: www.nzz.ch/wissen/wissenschaft/risse-die-sich-von-selbst-schliessen-1.17477538. Abgerufen am 22.04.2014.
- Meißner, J. et al. (2013): Cyberphysische Produktionssysteme. In: *Productivity Management* 18 (1).
- micro.seas.harvard.edu (2013): Flapping-wing microrobots. URL: <http://micro.seas.harvard.edu/research.html#flapping>. Abgerufen am 22.04.2014.
- Mikita, C. et al. (2012): Can we explain the allergenicity of peanuts on the basis of the three-dimensional structure of its allergens and use the information to devise means of eliminating peanut allergy? In: *Medical Hypotheses*, vol. 79, no 5.
- Miyamoto, T. et al. (2012): Rapid and orthogonal logic gating with a gibberellin-induced dimerization system. In: *Nature Chemical Biology* 8.
- Modern meadow. URL: modernmeadow.com/about/solution/. Abgerufen am 17.04.2014.
- Molloy, J. et al. (2013): The Potential Link between Gut Microbiota and IgE-Mediated Food Allergy in Early Life. In: *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 10.
- mst-aerospace.de. URL: www.mst-aerospace.de/technologietransfer/technologieangebote/materialien-und-verfahren/079v-hochtemperatureinsatz-von-faserverstaerkter-cesicr-keramik-in-verfahrenstechnischen-anlagen/. Abgerufen am 22.04.2014.
- Münchner Kreis; Fraunhofer ISI (2012): Intelligente Netze: Potenziale und Herausforderungen. Metastudie des Fraunhofer ISI und Orientierungspapier des Münchner Kreises. Zusammenfassung der Ergebnisse anlässlich des Nationalen IT-Gipfels in Essen 13. November 2012. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. URL: www.muenchner-kreis.de/pdfs/IN/BMWi_IT_Gipfel_Intelligente_Netze.pdf. Abgerufen am 24.04.2014.
- Murdock, J. W. (2012): Special Issue “This is Watson”. In: *IBM Journal of Research and Development* 56, Nr. 3/4.
- nanowerk.de (2011): Nano-Sensor erkennt kleinste Mengen Plastiksprengstoff. URL: www.nanowerk.com/news/newsid=22221.php. Abgerufen am 22.04.2014.
- o. A. (2013): VDI-Zukunftskongress entwirft Perspektive für Industrie 4.0. In: *VDI Nachrichten* (5).
- OECD (2012): *Machine-to-machine communications: Connecting billions of devices*. Paris, OECD Digital Economy Papers 192.
- OECD/Eurostat (2005): *Oslo Manual: Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data*, Paris. URL: <http://www.oecd.org/sti/oslomanual>. Abgerufen am 17.04.2014.

- Pardo, N. et al. (2012): Prospective scenarios on energy efficiency and CO₂ emissions in the EU iron & steel industry. Luxembourg, Joint Research Centre of the European Commission.
polyic.de. URL: www.polyic.de/unternehmen/vision.html. Abgerufen am 22.04.2014.
- Powell, J. R. (2008): The Quantum Limit to Moore's Law. In: Proceedings of the IEEE 96, Nr. 8.
- princeton.edu (2013): The walls have ears: Princeton researchers develop walls that can listen, and talk. URL: www.princeton.edu/main/news/archive/S37/69/38I40/index.xml?section=topstories. Abgerufen am 22.04.2014.
- Programmausschuss für das BMBF-Förderprogramm Optische Technologien (Hrsg.) (2013): Agenda Photonik 2020, Bonn, Berlin, 2010
- Projekt sim-TD: Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland. URL: www.simtd.de. Abgerufen am 17.04.2014.
- Projektgruppe EURAT (2013): Stellungnahme Eckpunkte für eine Heidelberger Praxis der Ganzgenomsequenzierung. Marsilius-Kolleg der Universität Heidelberg.
- Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaftswissenschaft und acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. URL: www.plattform-i40.de/sites/default/files/Abschlussbericht_Industrie4%200_barrierefrei.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.
- pro-physik.de (2012). Schlaue Nanosatelliten: aus dem Hörsaal ins All. URL: www.pro-physik.de/details/news/1669219/Schlaue_Nanosatelliten_aus_dem_Hoersaal_ins_All.html. Abgerufen am: 18.10.2013.
- Ranganathan, P. (2011): From Microprocessors to Nanostores: Rethinking Data-Centric Systems. In: IEEE Computer 44, Nr. 1.
- raumfahrttechnik.tu-berlin (2013). Berliner Experimental- und Ausbildungssatellit (BEESAT-4). URL: raumfahrttechnik.tu-berlin.de/menue/forschung/aktuelle_projekte/beesat-4/. Abgerufen am: 18.10.2013.
- Reed, D. A. et al. (2012): Imagining the Future: Thoughts on Computing. In: IEEE Computer 45, Nr. 1, S. 25-30.
- Reinhold, T.(1999): Die Bedeutung des Parksuchverkehrs. Eine quantitative Abschätzung am Beispiel von zwei Stadtgebieten in München. Internationales Verkehrswesen (51) Nr. 6.
- Roland Berger (2013). Werkstattportale in Deutschland – Wer wird der „Google“ für Werkstattleistungen? URL: www.rolandberger.de/media/pdf/Roland_Berger_Werkstattportale_20130318.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

- Roland Berger Strategy Consultants GmbH (23.01.2013): Connected Mobility 2025 - Neue Wertschöpfung im Personenverkehr der Zukunft. URL: www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_TaS_Connected_Mobility_D_20130123.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.
- Rötzer, F. (23.07.2013): Lieber Facebook als in die Pedale treten. In: Telepolis. URL: <http://www.heise.de/tp/artikel/39/39565/1.html>. Abgerufen am 17.04.2014.
- Rushby, J. (2009): Software Verification and System Assurance. In: Hung, D. V.; Krishnan, P. (Hrsg.): Proceedings of the 2009 Seventh IEEE International Conference on Software Engineering and Formal Methods, Hanoi, Vietnam, November 23-27, 2009. Los Alamitos, Calif.: IEEE Computer Society.
- RWI (Hrsg.) (2011): Die volkswirtschaftliche Bedeutung einer Grundstoffindustrie am Beispiel der Stahlindustrie. URL: www.stahl-online.de/Deutsch/Linke_Navigation/MedienLounge/_Dokumente/12_0118_RWI_Studie.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.
- Sainz de Murieta, I. et al. (2011): Biomolecular Computers. In: Current Bioinformatics 6, Nr. 2.
- Scharf, A. (2012): Der PraenaTest aus pränatalmedizinischer Sicht. Frauenarzt 53, S. 2-4.
- Scheltens, P. et al. (2010): Efficacy of a medical food in mild Alzheimer's disease: A randomized, controlled trial. In: Alzheimer's & Dementia, 6, 1, S. 1–10.
- Schmidt, N. (14.03.2013): Vernetzte Mobilität der Zukunft. Siemens. URL: www.siemens.com/press/pool/de/events/2013/infrastructure-cities/2013-03-UITP-PK/presentation-schmidt-d.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.
- Schneider, L.; Bönsch, R. (20.09.2013): IAA 2013: Automobiler erproben das autonome Auto. In: VDI Nachrichten Nr. 38.
- Schuldt, A.; Gehrke, J. (2013): Software-Plattformen für die kommende Industrie 4.0. Anforderungen und Herausforderungen. In: Industrie Management 29 (1).
- scitechdaily.com (2011): Harvard Scientists Develop \$5 Rubber Robot. URL: <http://scitechdaily.com/harvard-scientists-develop-5-rubber-robot/>. Abgerufen am 22.04.2014.
- Seiwert, M. (03.12.2012): Ein Leben ohne Auto. In: WirtschaftsWoche Nr. 49.
- Sinz, C. (2010): Software verification: State of the art and challenges. In: Pankratius, V.; Kounev, S. (Hrsg.): Emerging research directions in computer science: Contributions from the young informatics faculty in Karlsruhe. Karlsruhe: KIT Press.
- Smart-Way Project Idea (o. D.). URL: www.smart-way.mobi/index.php/project. Abgerufen am 17.04.2014.

-
- Stahl, T. et al. (2007): Modellgetriebene Softwareentwicklung: Techniken, Engineering, Management. 2., aktualisierte und erweiterte Aufl. Heidelberg: Dpunkt Verlag.
- StahlDat SX. URL: www.stahlkosten.de/de/startseite/. Abgerufen am 22.04.2014.
- Steffen, M. et al. (2011): Quantum computing: An IBM perspective. In: IBM Journal of Research and Development 55, Nr. 5.
- Stroh, I.(26.08.2013): Forschungsproduktion von Lithium-Ionen-Batterien. Elektronik-Net. URL: www.elektroniknet.de/automotive/elektromobilitaet/artikel/100658/. Abgerufen am 17.04.2014.
- System Alliance (2012): Zukunftsreport 2.0. URL: www.systemalliance.de/content/zr_20/ZR2_0.html. Abgerufen am 17.04.2014.
- Szyperski, C. et al. (2002): Component Software – Beyond Object-Oriented Programming. 2. Aufl. Boston: Addison-Wesley Longman.
- tag-der-logistik.de. URL: www.tag-der-logistik.de/logistik-ist-mehr/bedeutung-fuer-deutschland. Abgerufen am 17.04.2014.
- tecchannel.de (2010): Vision: Menschen werden Netzwerkknoten. URL: www.tecchannel.de/netzwerk/news/2032134/vision_menschen_werden_netzwerkknoten. Abgerufen am 22.04.2014.
- ten Hompel (2013): Neue vernetzte Wege in der Logistik. URL: www.autonomik.de/documents/ten_Hompel_Logistik_4.0.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.
- The Biomarker Definitions Working Group (2001): Biomarkers and surrogate endpoints: preferred definitions and conceptual framework. Clinical Pharmacology & Therapeutics 69, S. 89-95).
- The Boston Consulting Group et al. (Hrsg.) (2010): CO₂-Bilanz Stahl – Ein Beitrag zum Klimaschutz. URL: www.stahlonline.de/medien_lounge/Hintergrundmaterial/ReportCO2BilanzStahl20100226adjustedfinalwithchangesv3.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.
- The Boston Consulting Group, Stahlinstitut VDEh (Hrsg.) (2013): Steel's contribution to a low-carbon Europe 2050 – Technical and economical analysis of the sector's CO₂ abatement potential. URL: www.stahl-online.de/Deutsch/Linke_Navigation/MedienLounge/_Dokumente/130613_BCG_Low-Carbon_Roadmap.pdf. Abgerufen am 22.04.2014.
- theguardian.com (2013): How can big data be used for social good?. URL: www.theguardian.com/sustainable-business/how-can-big-data-social-good?CMP=&et_cid=36922&et_rid=231470&Linkid=How%20can%20big%20data%20be%20used%20for%20social%20good?. Abgerufen am 22.04.2014.
- Thielmann, A. et al. (2010): Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterie 2030, Karlsruhe, Fraunhofer ISI.

- Trösch, T. (2012): Auf der Sonnenseite der Straße. URL: www.spektrum.de/alias/zukunft-der-mobilitaet/auf-der-sonnenseite-der-strasse/1151889. Abgerufen am 22.04.2014.
- Trusheim, M. R., Berndt, E. R.; Douglas, F. L. (2007): Stratified medicine: strategic and economic implications of combining drugs and clinical biomarkers. *Nature Reviews Drug Discovery* 6.4 (2007)
- ULCOS Website. URL: www.ulcos.org/de/research/home.php. Abgerufen am 22.04.2014.
- unhabitat.org (2008): State of World Cities Report 2008/9. URL: www.unhabitat.org/content.asp?cid=6040&catid=7&typeid=5. Abgerufen am 22.04.2014.
- uniquire.com. URL: www.uniquire.com/news/167/182/. Abgerufen am 17.04.2014.
- Van Den Ende, J. C. M.; Dolfsma, W. A. (2005): Technology-push, demand-pull and the shaping of technological paradigms - Patterns in the development of computing technology. In: *Journal of Evolutionary Economics* 15, Nr. 1.
- Van Tittelboom, K.; De Belie, N. (2013): Self-Healing in Cementitious Materials – A Review. In: *Materials*.
- Verkehrsclub Deutschland e.V. (19.08.2009): Elektroautos werden Klima auf absehbare Zeit nicht retten. URL: www.vcd.org/pressemitteilung.html?&no_cache=1&scale=0&=&tx_ttnews%5Btt_news%5D=649. Abgerufen am 17.03.2014.
- Wagner, S. et al. (2012): Targeted microRNA expression in dairy cattle directs production of β -lactoglobulin-free, high-casein milk. In: *PNAS*, vol. 109, no. 42.
- Weichert, T. (2013): Prism, Big Data und der Datenschutz – bei uns und in den USA. URL: www.datenschutzzentrum.de/bigdata/20130709-bigdata-und-prism.html. Abgerufen am 22.04.2014.
- WHO 2013. URL: www.who.int/trade/glossary/story021/en/. Abgerufen am 17.03.2014.
- who.int. URL: www.who.int/mediacentre/news/releases/2010/tb_test_20101208/en/index.html. Abgerufen am 17.04.2014.
- Wikipedia.de: Biowerkstoff. URL: www.de.wikipedia.org/wiki/Biowerkstoff. Abgerufen am 22.04.2014.
- Wikipedia.de: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. URL: www.de.wikipedia.org/wiki/Materialwissenschaft_und_Werkstofftechnik. Abgerufen am 22.04.2014.
- Wohlers Associates, Inc. (2012): Wohlers Report 2012. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report. Fort Collins: Wohlers Associates, Inc.
- Wyman, O. (2012): Car IT – Trends, Chancen und Herausforderungen für Automobilzulieferer. URL Management Summary: www.oliverwyman.de/media/ManSum_Charts_Zulieferer_Car_IT_Oliver_Wyman.pdf. Abgerufen am 17.04.2014.

-
- Wyman, O. (2012): Connected Cars zur Kundenbindung im After Sales.
URL Management Summary: www.oliverwyman.de/media/ManSum_Chart_AftersalesConnectedCars_Oliver_Wyman.pdf Abgerufen am 17.04.2014.
- Zäh, M. F. (Hrsg.) (2006): Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien – Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren. München, Carl Hanser Verlag.

Die VDI Technologiezentrum GmbH gibt Impulse und unterstützt innovative Forschung und Entwicklung. Ziel ist es, die technologische und innovatorische Leistungsfähigkeit von Wirtschaft, Wissenschaft und Forschung zu steigern.

Die Abteilung Innovationsbegleitung und Innovationsberatung (IBB) verbindet technologisches und sozioökonomisches Know-how mit langjähriger Erfahrung in der Beratung von Entscheidungsträgern aus politischer Administration, Industrie, Finanzwelt sowie Verbänden, Vereinen und Organisationen.



Das interdisziplinäre Team von IBB deckt dabei ein breites Themen- und Methodenspektrum ab. Unseren Kunden bieten wir strategische Beratung in technologischen und gesellschaftlichen Zukunftsfragen. Wir bewerten neue Technologien und Trends, entwickeln Ideen und Konzepte und unterstützen Sie bei der Umsetzung.

Produkte

- Innovationsbegleitende Maßnahmen und Agendaprozesse
- Innovationsscreening und Technologiemonitoring
- Studien und Analysen
- Szenarien und Prospektionen
- Prozessberatung und Umsetzungsunterstützung

Weitere Informationen erhalten Sie unter www.vditz-ibb.de



VDI Technologiezentrum GmbH
Innovationsbegleitung und Innovationsberatung
Airport City
VDI-Platz 1
40468 Düsseldorf

Telefon: +49 211 6214-536
Telefax: +49 211 6214-139
E-Mail: ibb@vdi.de
www.vditz-ibb.de