Fraunhofer

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI
FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ARBEITSWIRTSCHAFT UND ORGANISATION IAO

KERSTIN CUHLS, WALTER GANZ, PHILINE WARNKE (HRSG.)

FORESIGHT-PROZESS IM AUFTRAG DES BMBF

ETABLIERTE ZUKUNFTSFELDER UND IHRE ZUKUNFTSTHEMEN

Impressum

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe

Telefon: +49 (0) 721 / 68 09-141
Telefax: +49 (0) 721 / 68 91 52

Internet: www.isi.fraunhofer.de

Angerer, Gerhard; Bauer, Elke; Beckert, Bernd; Bierwisch, Antje; Blümel, Clemens; Bradke, Harald; Cuhls, Kerstin; Doll, Claus; Friedewald, Michael; Gaisser, Sibylle; Georgieff, Peter; Gransche, Bruno; Hüsing, Bärbel; Koch, Daniel J.; Klug, Stefan; Lüllmann, Arne; Marscheider-Weidemann, Frank; Reiß, Thomas; Schirrmeister, Elna; Thielmann, Axel; Vollmar, Horst Christian; von Horn, Jana; Warnke, Philine

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO)
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon: +49 (0) 711 / 970-01
Telefax: +49 (0) 711 / 970-2299

Internet: www.iao.fraunhofer.de

Allmendinger, Katrin; Ardilio, Antonino; Bienzeisler, Bernd; Buck, Susanne L.; Buck, Hartmut; Ganz, Walter; Heubach, Daniel; Lang-Koetz, Claus; Malcotsis, Theodor; Ohlhausen, Peter; Pastewski, Nico; Rogowski, Thorsten; Rüger, Marc; Schletz, Alexander; Schnalzer, Kathrin; Stabe, Matthias; Warschat, Joachim

Technische Universität Berlin, Fakultät VII, Fachgebiet Innovationsökonomie (VWS 2), Müller-Breslau-Straße (Schleuseninsel)
10623 Berlin

Telefon: +49 (0) 30 / 314-76670
Telefax: +49 (0) 30 / 314-76628

Internet: www.isi.tu-berlin.de; Goluchowicz, Kerstin

Karlsruhe/ Stuttgart 2009

Inhaltsverzeichnis

1	**Foresight-Prozess – Im Auftrag des BMBF – Zusammenfassung**	**8**
1.1	Ausgangslage	8
1.2	Ergebnisse im Überblick	8
1.3	Das methodische Vorgehen	10
2	**Überblick über die identifizierten Zukunftsthemen**	**15**
3	**Gesundheitsforschung**	**23**
3.1	Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Gesundheitsforschung	23
3.2	Auswahlprozess der Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Gesundheitsforschung	28
3.3	Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick	31
3.4	Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern	38
4	**Mobilität**	**39**
4.1	Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Mobilität	39
4.2	Auswahlprozess der Zukunftsthemen	41
4.3	Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick	57
4.4	Bezug zu anderen Zukunftsthemen	61
5	**Energie**	**63**
5.1	Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Energie	63
5.2	Auswahlprozess der Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Energie	64
5.3	Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick	75
5.4	Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern	80
6	**Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung**	**81**
6.1	Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung	81
6.2	Auswahlprozess der Zukunftsthemen	82
6.3	Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick	87
6.4	Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern	91
7	**Industrielle Produktionssysteme**	**93**
7.1	Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Industrielle Produktionssysteme	93

7.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Industrielle Produktionsprozesse 95
7.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick 107
7.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern 113

8 Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) 114
8.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Informations- und Kommunikationstechnologie 114
8.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Informations- und Kommunikationstechnologie 116
8.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick 130
8.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern 135

9 Lebenswissenschaften und Biotechnologie 136
9.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Lebenswissenschaften und Biotechnologie 136
9.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen 139
9.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick 151
9.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern 157

10 Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren 158
10.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld »Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren« 158
10.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen 159
10.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick 166
10.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern 173

11 Nanotechnologie 174
11.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Nanotechnologie 174
11.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen 175
11.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick 184
11.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern 191

12 Neurowissenschaften und Lernforschung 192
12.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Neurowissenschaften und Lernforschung 192
12.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen 194
12.2.1 Neurowissenschaften 194
12.2.2 Lernforschung 207
12.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick 209
12.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern 214

13 Optische Technologien 216
13.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld »Optische Technologien« 216

13.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen 217
13.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick 226
13.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern 230

14 Services Science 231
14.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld »Services Science«/ Dienstleistungen und neue Wertschöpfungsformen 232
14.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen 233
14.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick 241
14.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern 245

15 System- und Komplexitätsforschung 246
15.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld System- und Komplexitätsforschung 246
15.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen 248
15.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick 253
15.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern 257

16 Wasser-Infrastrukturen 259
16.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Wasser-Infrastruktursysteme 259
16.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen 260
16.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick 266
16.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern 269

Literatur 271

1 Foresight-Prozess – Im Auftrag des BMBF – Zusammenfassung (September 2007 bis Juli 2009)

1.1 Ausgangslage

Welche Forschungsthemen sind langfristig wichtig? Welche Themen können in Deutschland adäquat vorangetrieben werden, weil sie an die Kompetenzen der deutschen Wissenschaft und Wirtschaft anknüpfen? Welche Gebiete in Forschung und Technologie haben ein ausreichendes Maß an Synergie- und Ausstrahleffekten, so dass sie Impulsgeber für andere Bereiche sein können? Welche Zukunftsfelder gehen über Disziplinen hinaus, versprechen einen herausragenden und bahnbrechenden Erkenntnisgewinn in Wissenschaft und Technologie und tragen deshalb maßgeblich zur Lebensqualität der Menschen und zur nachhaltigen Ressourcenschonung bei? Diese Fragen standen am Anfang des BMBF-Foresight-Prozesses, der im Herbst 2007 startete.

1.2 Ergebnisse im Überblick

Zukunftsthemen in den etablierten Zukunftsfeldern

Ausgangspunkt für diese Vorausschau waren die 17 Themenfelder der Hightech-Strategie sowie laufende Vorausschau-Aktivitäten in den Fachabteilungen, also das Aufgabenportfolio des BMBF. Bis Mitte 2009 wurde mit einem Set avancierter Methoden der Zukunftsforschung gearbeitet, um zunächst in 14 ausgewählten **etablierten Zukunftsfeldern** die neuen Schwerpunkte in Forschung und Technologie zu identifizieren – so ergaben sich für Gesundheitsforschung, Mobilität, Energie, Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung, Industrielle Produktionssysteme, Informations- und Kommunikationstechnologie, Lebenswissenschaften und Biotechnologie, Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren, Nanotechnologie, Neurowissenschaften und Lernforschung, Optische Technologien, Service Sciences, System- und Komplexitätsforschung sowie für Wasser-Infrastrukturen die so genannten **Zukunftsthemen.**

Die Zukunftsthemen wurden daraufhin in mehreren Schritten analysiert, mit nationalen und internationalen Expertinnen und Experten diskutiert und anschließend bewertet und sortiert. Es wurde bei der Bewertung danach gefragt, in welchem Maße Forschungsperspektive und -struktur der Zukunftsthemen eher gefestigt oder noch im Fluss sind. Schließlich wurden die Themen, gemessen an den eingangs formulierten Fragen, ausgewählt. In einem Workshop diskutierten Expertinnen und Experten der deutschen Forschungs- und Innovationsland-

schaft das Ergebnis dieser Analysen. Zukunftsthemen wurden hier erstmals gesichtet, bewertet und sortiert. Außerdem wurde danach gefragt, in welchem Maße Forschungsperspektive und -struktur zu den Zukunftsthemen eher gefestigt oder noch im Fluss sind. Schließlich wurden die Themen, gemessen an den eingangs formulierten Fragen, sortiert und ausgewählt.

Mit den in diesem Bericht vorgelegten Ergebnissen zu den Zukunftsthemen in den etablierten Zukunftsfeldern liefert der BMBF-Foresight-Prozess differenzierte Hinweise, bestätigend oder modifizierend, zur Programmatik innerhalb etablierter Forschungs- und Technologiefelder.

Zukunftsfelder neuen Zuschnitts

Darüber hinaus waren die Untersuchungen zu den etablierten Zukunftsfeldern notwendige Voraussetzung dafür, die zentrale Zielsetzung des BMBF-Foresight-Prozesses zu verfolgen: Die Herausarbeitung von Querschnittaspekten. Die Recherchen in den etablierten Feldern lieferten erste Ansatzpunkte für übergreifende Aktivitäten, um Bereiche zu benennen, die jenseits von bisherigen Fach- und Programmlogiken liegen und sich an Schnittstellen zwischen einzelnen Disziplinen bewegen. Aus der Zusammenschau der verschiedenen Methoden wie Bibliometrie, Monitoring, Inventorenscouting, Online-Befragung leiteten sich im Verlauf des Prozesses Strukturen für solche Felder ab, die in vielen Fachprogrammen als wichtig für FuE identifiziert wurden, bei denen die verbindenden Strukturen jedoch fachlich oft nicht erkennbar waren. Diese Gebiete, die Forschungs- und Innovationsfelder überspannen, wurden mehrfach differenziert bewertet, validiert und kontinuierlich modifiziert. Im Laufe des Prozesses haben sich aus dieser Gesamtschau der etablierten Felder und ihrer Zukunftsthemen so die folgenden **Zukunftsfelder neuen Zuschnitts** entwickelt:

a. Mensch-Technik-Kooperation

b. Das Altern entschlüsseln

c. Zukunftsfähige Lebensräume

d. ProduzierenKonsumieren2.0

e. Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation

f. Zeitforschung

g. Zukunftsfähige Energielösungen

Hier liefert der BMBF-Foresight-Prozess Ansatzpunkte für potenzielle neue Forschungsfelder. Sie sind im Bericht »Der BMBF-Foresight-Prozess - Zukunftsfelder neuen Zuschnitts« gesondert ausgearbeitet.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse zu den etablierten Zukunftsfeldern, inklusive der in diesen Feldern für besonders wichtig eingeschätzten Zukunftsthemen.

Alle Ergebnisse beruhen auf den unterschiedlichen Teilschritten des Prozesses und sind damit Einschätzungen von Experten. Die Interpretationen und Zusammenfassungen wurden von Themenkoordinatorinnen und Themenkoordinatoren vorgenommen.

1.3 Das methodische Vorgehen

Im Verlauf des BMBF-Foresight-Prozesses wurde ein Blick in die Zukunft von Forschung und Technologie mit einer Perspektive von mehr als 10 Jahren geworfen, um auf Grundlage der gewonnenen Informationen mögliche Schlussfolgerungen für forschungspolitisches Handeln in der Gegenwart abzuleiten.

Im Vorausschau-Prozess des BMBF wurden, aufeinander aufbauend, folgende Ziele[1] verfolgt:

1. Identifizierung neuer Schwerpunkte in Forschung und Technologie,

2. Benennung (und Ableitung) von Gebieten für Forschungs- und Innovationsfelder übergreifende Aktivitäten,

3. Potenzialanalyse, in welchen Technologie- und Innovationsfeldern strategische Partnerschaften[2] möglich werden,

4. Ableitung prioritärer Handlungsfelder für Forschung und Entwicklung.

Die im Prozess angelegte **längerfristige** Perspektive auf die Zukunft hat bereits begonnene spezifische Vorausschau-Aktivitäten im BMBF selbst sowie im öffentlichen und privaten Sektor mit berücksichtigt.

Im besonderen Fokus der Untersuchungen stand die Herausarbeitung von interdisziplinären Forschungs- und Technologiethemen. Mit dem anschließenden

1 Die den Zielen entsprechenden Symbole rechts unten auf der Seite zeigen, welches der Ziele der jeweilige Teilprozess primär adressiert. Die farbigen Linien rechts oben auf der Seite dienen nur der besseren Lesbarkeit und Auffindbarkeit der Zukunftsfelder. Sie haben keine inhaltliche Bedeutung.

2 Hier: Hebel bei der Schaffung geeigneter (Förder)strukturen.

Blick »zurück aus der Zukunft in die Gegenwart« sollte ausgelotet werden, welche Weichen heute forschungspolitisch zu stellen sind, damit deutsche Forschung und Innovation auch mittel- und langfristig eine Spitzenposition im internationalen Wettbewerb einnehmen werden.

Den Ausgangspunkt der Untersuchungen im BMBF-Foresight-Prozess bildete eine Analyse der Dynamik des Wandels in Forschung und Technologie (»Technology Push« Perspektive). Dabei sollte gezielt über eine Bestandsaufnahme hinausgegangen werden. Aktuelle Erwartungen wurden kritisch auf ihre Zukunftsfähigkeit geprüft und der Blick auf Signale, die über etablierte Strukturen hinausweisen, gelenkt. Für weitere Ausarbeitungen kamen nur solche Zukunftsthemen in Betracht, die einen angenommenen Bedarf decken können. Abbildung 1 gibt einen Überblick über den Verlauf der Untersuchungen.

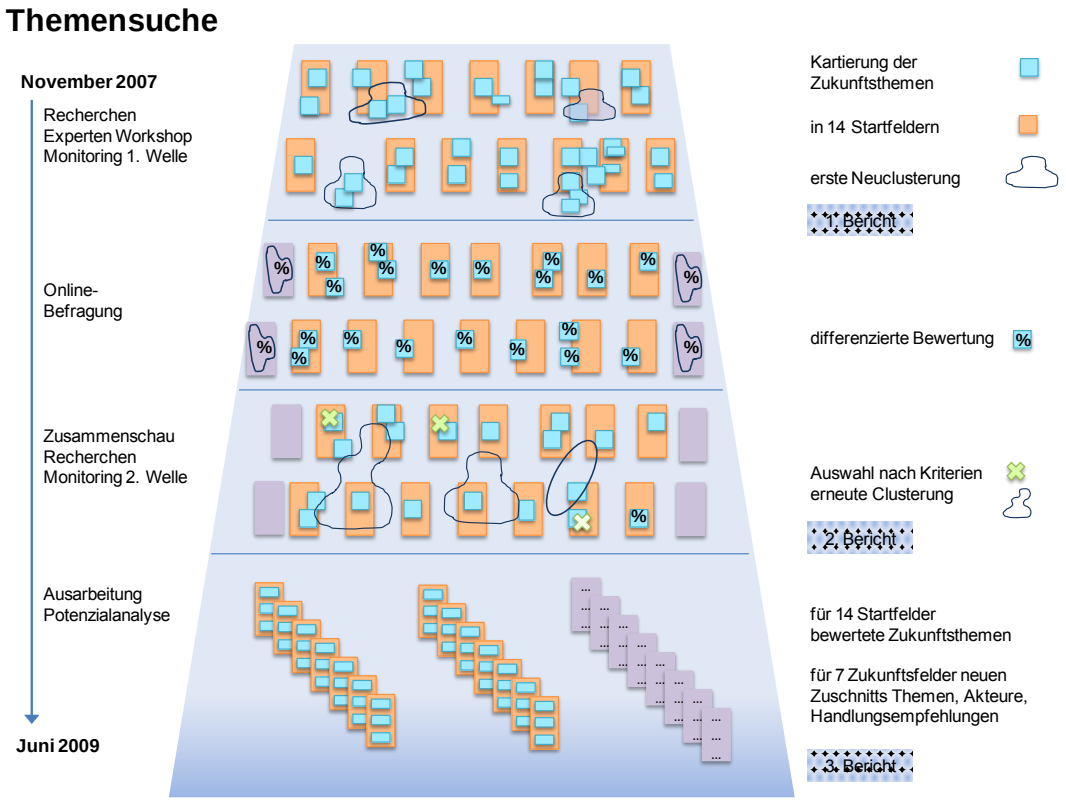

Abbildung 1: Vorgehen bei der Themensuche

Zur Identifizierung der Schwerpunkte in Forschung und Technologie (Ziel 1) wurde zunächst die im deutschen Innovationssystem etablierte Struktur übernommen. In 14 aus der deutschen Hightech-Strategie abgeleiteten Forschungsfeldern nahmen eigens ernannte Themenkoordinaten und Themenkoordinatorinnen eine ausführliche Kartierung der in den nächsten 10 bis 20 Jahren er-

warteten Entwicklungen vor. Diese **etablierten Zukunftsfelder** wurden im BMBF-Foresight unabhängig weiter entwickelt, lassen sich jedoch den Bedarfsfeldern der Hightech-Strategie »Gesundheit«, »Mobilität«, »Klima-/ Ressourcenschutz/ Energie«, »Sicherheit« sowie »Schlüsseltechnologien« zuordnen.

- strukturierte fokussierte Experteninteraktion (Workshops und Interviews)
- Innovationssystemanalyse einschließlich einer Sichtung aktueller strategischer Prozesse im BMBF
- Environmental Scanning (Literaturreche, Konferenzanalyse, Scanning relevanter Ereignisse)
- Sekundäranalyse aktueller internationaler Foresight-Studien zu Forschung und Technologie
- Analyse der Dynamik wissenschaftlicher Veröffentlichungen (Bibliometrie)
- Breite Online-Expertenbefragung zur differenzierten Bewertung von Relevanz und Handlungsbedarf (2.659 valide Antworten)
- Zweistufige persönliche Befragung internationaler Top-Experten (Monitoring-Panel)
- Inventorenscouting (gezielte Befragung junger Forscherinnen und Forscher)

Die Ergebnisse aus allen Methoden wurden kontinuierlich abgeglichen. Als Ergebnis der Scanning-Aktivitäten und Recherchen stand eine strukturierte, bewertete Zusammenstellung einer Vielzahl von langfristig relevanten Zukunftsfeldern und Zukunftsthemen in Forschung und Technologie (Ziel 1).

Zur Auswahl der Zukunftsthemen wurde ein stringenter Kriteriensatz definiert. Demnach wird ein **Zukunftsthema** als solches definiert, wenn es über zehn Jahre hinaus in Forschung und Technologie auf der Agenda steht und die folgenden **Kriterien** in hohem Maße erfüllt:

- verspricht herausragenden bis bahnbrechenden Erkenntnisgewinn in Wissenschaft und Technologie.
- ist Impulsgeber für andere Forschungsgebiete (Synergien, Ausstrahleffekte, Übertragung von Erkenntnissen)
- unterstützt die wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands und trägt zur internationalen Wettbewerbsfähigkeit bei
- trägt maßgeblich zur Lebensqualität der Menschen bei
- knüpft an Kompetenzen der deutschen Wissenschaft und Wirtschaft an.
- trägt nachhaltig zu Ressourcenschonung, Klima- und Umweltschutz bei.

Auch ein Zukunftsfeld im Sinne eines übergreifenden Themenfeldes, wird erst dann als zukunftsfähig definiert, wenn es in seiner Gesamtheit diesen Kriterien entspricht. Dabei gibt es etablierte Zukunftsfelder, von denen 14 in diesem Bericht benannt und ausgearbeitet sind und sogenannte **»Zukunftsfelder neuen Zuschnitts«**: Zur Identifikation von Gebieten für übergreifende Aktivitäten (Ziel 2) wurden die Erkenntnisse aus der Analyse zu den Zukunftsthemen einer kontinuierlichen Zusammenschau unterworfen. Dabei wurde regelmäßig neu geprüft, ob die Dynamik von Forschung und Technologie auf der einen und sozioökonomischen Rahmenbedingungen auf der anderen Seite es nahelegt, die identifizierten Zukunftsthemen zu völlig neuen Zukunftsfeldern zusammenzuführen. Zwei Kriterien waren für die Eröffnung eines »Zukunftsfeldes neuen Zuschnitts« ausschlaggebend:

Forschungsdynamik: Der neue Zuschnitt bündelt Forschungsaspekte mit hoher Dynamik und ähnlicher Perspektive in einer Weise, die eine bessere Erschließung des Innovationspotenzials verspricht.

Bedarfsdynamik: Der neue Zuschnitt verspricht eine Adressierung zentraler Zukunftsherausforderungen in neuer Qualität.

Die Ergebnisse der Queranalyse wurden mit den oben aufgeführten Methoden immer wieder hinterfragt und neu bewertet, bis am Ende des Prozesses die erarbeitete Struktur feststand. Als Resultat dieser Forschungsarbeiten liegen nunmehr zum Ende des Foresight-Prozesses folgende Ergebnisse vor (vgl. Abbildung 2):

- Bewertete Zusammenstellung von Zukunftsthemen in den 14 etablierten Zukunftsfeldern. Diese 14 Felder wurden teilweise neu formuliert, so dass auch sie den genannten Kriterien entsprechen und »Zukunftsfelder« im Verständnis des BMBF-Foresight-Prozesses sind.
- Ausarbeitung von Forschungsfragen und Akteuren für sieben Zukunftsfelder neuen Zuschnitts.

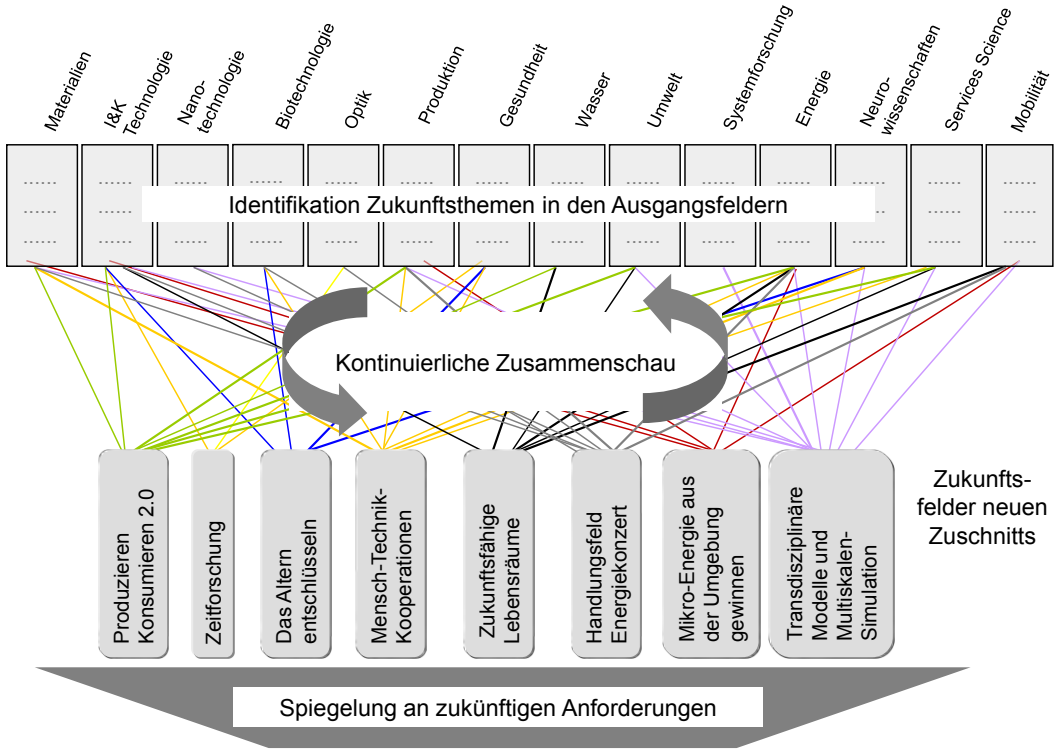

Abbildung 2: Alle Zukunftsfelder des BMBF-Foresight-Prozesses[3]

[3] Die beiden Zukunftsfelder zur Energie sind unterschiedlich entstanden, so dass sie in der Abbildung separat ausgewiesen sind.

2 Überblick über die identifizierten Zukunftsthemen

Die im Verlauf des Prozesses identifizierten Zukunftsthemen wurden anhand der in (Abbildung 3) dargestellten Matrix strukturiert. Im folgenden wird entlang dieser Strukturierung eine Übersicht über alle identifizierten Themen geben.

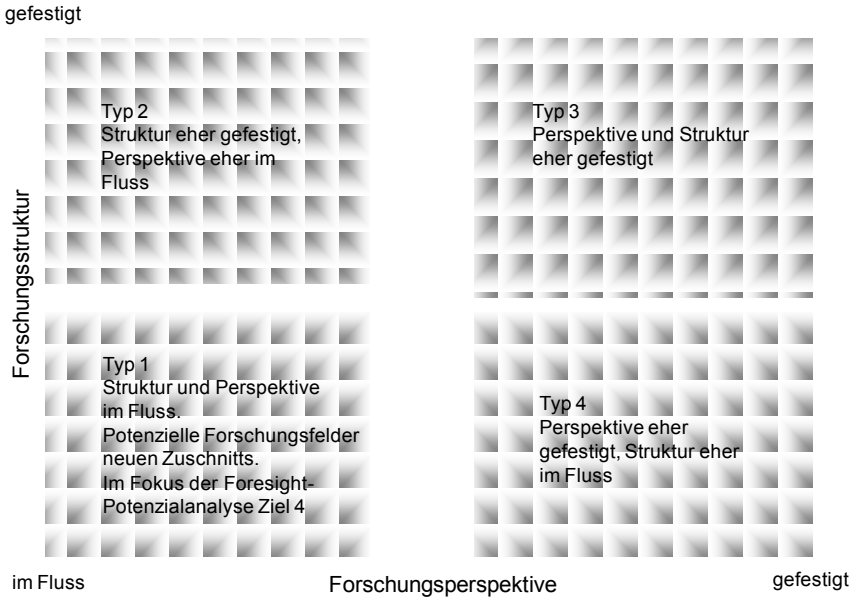

Abbildung 3: Strukturierung der Zukunftsthemen nach Etablierungsgrad von Forschungsperspektive und -struktur

Zukunftsthemen Typ 1

sind sowohl von der Perspektive als auch der Forschungsstruktur her noch im Fluss, sie sind in dem Bericht »Der BMBF-Foresight-Prozess – Zukunftsfelder neuen Zuschnitts« ausführlich beschrieben.

Zukunftsthemen Typ 2

Bei diesem Typ existieren Forschungsstrukturen, die sich der Themen annehmen bzw. annehmen könnten. Die Perspektive ist jedoch aus unterschiedlichen Gründen nicht voll entwickelt. Die hier verorteten Zukunftsthemen sind in Tabelle 1.1 aufgelistet.

Zukunftsthema	Herkunftsfeld
Integration von Dienstleistungen und neuen Technologien	Services Sciences
Laserbasierte, generative Verfahren für unterschiedliche Materialien	Industrielle Produktionssysteme
Selbstorganisierende Computer-Architekturen (»Growable electronics«)	Informations- und Kommunikationstechnologie
Adaptive Lernumgebungen; Lernen mit VR/ Augmented Reality	Neurowissenschaften und Lernforschung
Virtuelles Materialdesign	Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren
Bioaktive[4] und biodegenerative Materialien	Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren
Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK)	Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren
Kooperatives Mobilitätsdesign	Mobilität
Neue Eigenschaften nanoskaliger Materialien	Nanotechnologie
Neuroprothesen und Neuroimplantate	Neurowissenschaften und Lernforschung
Entwicklungsneurobiologie	Neurowissenschaften und Lernforschung
Mikrobielle Raffination von Energie- und Chemie-Rohstoffen	querliegend
Modellierung von Umweltphänomenen	Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung
Antworten auf klimabedingte Naturkatastrophen	Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung
Monitoring von Umweltzuständen	Umweltschutz und

4 Materialien, die in der Lage sind biologische Systeme zu beeinflussen, ohne selbst lebendige Komponenten zu enthalten z. B. Gläser, die das Knochenwachstum fördern oder antibakterielle Beschichtungen.

Zukunftsthema	Herkunftsfeld
	nachhaltige Entwicklung
Folgenforschung der Biomassenutzung	Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung
»Landfills Mining«	Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung

Tabelle 2.1: Zukunftsthemen Typ 2

Zukunftsthemen Typ 3

Bei Forschungsthemen vom Typ 3 existiert aktuell bereits eine Forschungsstruktur und auch die Perspektive ist erkannt. Trotzdem werden diese Themen noch längerfristig auf der Forschungsagenda stehen. Die in der folgenden Tabelle aufgeführten Forschungsthemen lassen sich tendenziell in diesem Bereich verorten.

Zukunftsthema	Herkunftsfeld
Bioraffinerien zweite Generation	Lebenswissenschaften und Biotechnologie
Pflanzliche Systeme zur Bewältigung von Klimawandel	Lebenswissenschaften und Biotechnologie
RNA-Technologien	Lebenswissenschaften und Biotechnologie
Biologische Produktionsplattformen	Lebenswissenschaften und Biotechnologie
Systembiologie	Lebenswissenschaften und Biotechnologie
Nanobiotechnologie	Lebenswissenschaften und Biotechnologie/ Nanotechnologie
Dienstleistungsinnovation	Services Science
Entwicklung neuer Organisations- und Geschäftsmodelle	Services Science
Neue Technologien für regenerative Energien	Energie
Neue Technologien für elektrische Netze und Speicher	Energie
Elektrofahrzeuge mit hinreichender Reichweite	Energie

Zukunftsthema	Herkunftsfeld
Wasserstoff und Brennstoffzellen	Energie
Regenerative Medizin	Gesundheitsforschung
Molekulare Analytik und Diagnostik	Gesundheitsforschung
Bottom-up-Nanoelektronik (»Beyond CMOS«)	Informations- und Kommunikationstechnologie
Sicherheit/Vertrauenswürdigkeit von IKT-Systemen	Informations- und Kommunikationstechnologie
Internet der Dinge	Informations- und Kommunikationstechnologie
Quanteninformationstechnik	Informations- und Kommunikationstechnologie
Wissenserwerb in ausgedehnten, kollaborativen Informationsräumen	Neurowissenschaften und Lernforschung
Smart Materials[5]	Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren
Komplexe Verbundwerkstoffe	Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren
Materialien unter extremen Bedingungen	Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren
Biokompatible[6] Materialien mit Einfluss auf biologische Systeme	Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren
Infrastrukturen für Antriebe der Zukunft	Mobilität

5 Smart Materials können ihre Eigenschaften in Abhängigkeit von externen Stimuli in kontrollierter Weise verändern
6 Materialien, die vom menschlichen Körper akzeptiert werden – etwa für Prothesen.

Zukunftsthema	Herkunftsfeld
Grüne und effiziente Logistik	Mobilität
Kulturspezialität im Lernen	Neurowissenschaften und Lernforschung
Brennstoffzellen	Mobilität
Elektromobilität	Mobilität
Weiterentwicklung klassischer Verbrennungsmotoren	Mobilität
Nanomedizin	Nanotechnologie
Nanoelektronik	Nanotechnologie
Manipulation von Licht durch künstliche Materialien	Neurowissenschaften und Lernforschung/ Optische Technologien
Modellierung des Gehirns	Neurowissenschaften und Lernforschung
Photonik für die Energietechnik	Optische Technologien
Optische Netzwerke	Optische Technologien
Industrielle Photonik	Optische Technologien
Licht als Werkzeug	Optische Technologien
Neue Herstellungsverfahren für die Nano- und Mikrooptik	Optische Technologien
Optische Methoden für die Lebenswissenschaften	Optische Technologien
Produktionstechnologien für neue Oberflächen	Industrielle Produktions-systeme
Flexible Maschinen, Produktionsprozesse und Wertschöp-fungsnetze	Industrielle Produktions-systeme
Selbstregelnde In-situ-Prozesssteuerung	Industrielle Produktions-systeme
Know-how-Schutz und Informationssicherheit	Industrielle Produktions-systeme
Lebenszyklusorientierte Produktentwicklung	Industrielle Produktions-systeme

Zukunftsthema	Herkunftsfeld
Energieverbrauchsoptimierte und -autarke Produktionsstätten	Industrielle Produktions-systeme
Systemtheoretische Grundlagenforschung	System- und Komplexi-tätsforschung
Naturnahe Gewässerstrukturen	Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung
Antworten auf die veränderte Wasserverfügbarkeit	Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung
Ausdehnung und Kopplung der Simulation auf alle Bereiche der industriellen Produktion	Industrielle Produktions-systeme
Mensch-Fabrik-Interaktion	Industrielle Produktions-systeme
Elimination der Einträge anthropogener Spurenstoffe	Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung
Bedarfsgerechte Düngung und Pflanzenschutz	Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung
Sekundärrohstoffe in Primärstoffqualität	Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung
Nutzung der im Abwasser enthaltenen Ressourcen	Wasser-Infrastrukturen
Wiederverwendung von Wasser	Wasser-Infrastrukturen

Tabelle 2.2: Zukunftsthemen Typ 3

Zukunftsthemen Typ 4

Typ 4 kennzeichnet Zukunftsthemen, in denen eine relevante Forschungsperspektive zwar klar erkennbar ist, jedoch aktuell keine adäquaten Forschungsstrukturen bestehen, um dieser neuen Perspektive zu begegnen. Die in der folgenden Tabelle aufgeführten Zukunftsthemen lassen sich tendenziell in diesem Bereich verorten.[7]

[7] Die ursprünglich ebenfalls hier eingeordneten Zukunftsthemen Energiekonzert sowie Mikro-Energie wurden in dem Zukunftsfeld neuen Zuschnitts »zukunftsfähige Energielösungen« zusammengeführt. Die ebenfalls als Typ 4 klassifizierten Zukunftsthemen des Zukunftsfeldes System- und Komplexitätsforschung wurden alle in das Zukunftsfeld neuen Zuschnitts Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation überführt und finden sich daher nicht in den Tabellen 1.1 bis 1.3.

Zukunftsthema	Herkunftsfeld
Artifizielle Fotosynthese, Photovoltaik nach biologischem Vorbild	Lebenswissenschaften und Biotechnologie
Epigenetik und Epigenomik	Lebenswissenschaften und Biotechnologie
Modellierung und Simulation von Dienstleistungen	Services Science
Energieeffiziente Anwendungstechniken	Energie
Optimierung der Energieeffizienz und der Energiesysteme durch IuK	Energie
Gesundheitsversorgungssystem der Zukunft	Gesundheitsforschung
Individualisierte Medizin	Gesundheitsforschung
Intrakorporale Nano-Pharmaproduktion	Gesundheitsforschung
Molekulare Chirurgie	Gesundheitsforschung
Sensornetze/ »Smart Dust«	Informations- und Kommunikationstechnologie
Wissenserwerb in informellen Lernsettings	Neurowissenschaften und Lernforschung
Nano-Materialien für Energieanwendungen	Nanotechnologie
Neurobionik (Bioinspirierte Sensorik & Bioanaloge Informationsverarbeitung)	Neurowissenschaften und Lernforschung
Social and Cultural Neuroscience	Neurowissenschaften und Lernforschung
Energie- und ressourceneffiziente Produktion	Industrielle Produktionssysteme/ Lebenswissenschaften und Biotechnologie/ Energie
Schallarme Bauteilegestaltung	Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung
Artenerhaltende Kultivierung von Böden	Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung
Translationsforschung: Wissensgenerierung an den Schnittstel-	querliegend

Zukunftsthema	Herkunftsfeld
len unterschiedlicher Wissenssysteme. Zentrale Aspekte: Verständnis der Problematik und Entwicklung von Konzepten zur Unterstützung.	
Flexible, (semi-)dezentrale Wasser-Infrastruktursysteme	Wasser-Infrastrukturen

Tabelle 2.3: Zukunftsthemen Typ 4

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse in den etablierten Zukunftsfeldern detailliert vorgestellt. Am Anfang eines jeden Zukunftsfeldes findet sich eine tabellarische Auflistung der identifizierten Zukunftsthemen. Anschließend wird die Entstehung der Zukunftsthemen hergeleitet. Darauf folgen Übersichtstabellen zu Zwischenständen im BMBF-Foresight-Prozess.[8] Der jeweils vierte Abschnitt erläutert die Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern.

8 Dabei ist die Untergliederung dieses Abschnitts unterschiedlich: In einigen Zukunftsfeldern standen die Zukunftsthemen gleich zu Beginn fest und wurden im Prozess nur in einzelnen Aspekten und Formulierungen geschärft und bewertet. In anderen Zukunftsfeldern wurden die Zukunftsthemen erst nach und nach durch die unterschiedlichen Methoden generiert. In diesen Fällen erfolgt die Gliederung nach methodischen Schritten. Entsprechend länger ist der Abschnitt.

3 Gesundheitsforschung

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 zu Erhalt und Schaffung von Arbeitsplätzen bei.

3.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Gesundheitsforschung

Gesundheitsversorgungssystem der Zukunft
biomedizinisch-technische Innovationen für Prävention, Diagnose, Therapie, Rehabilitation und ihre Einführung in die klinische Anwendung (Translation),
Bewertungstools für die Qualität der Gesundheitsversorgung,
organisatorische Innovationen zur effizienten und effektiven Gestaltung der Gesundheitsversorgung
Individualisierte Medizin
Neue Biomarker als molekulare Risikoprädiktoren auf Genom-, Transkriptom-, Proteom- und Metabolomebenen,
bildgebende Verfahren (z. B. molekulares Imaging) zur Messung der Biomarker
klinische Validierung von Biomarkern,
Translationale Forschung zum Testen und zur Prüfung von Individualisierungskonzepten
Prüfung und ggf. Anpassung der Rahmenbedingungen, z. B. für die Durchführung klinischer Studien an immer kleineren Patientenkollektiven
Intrakorporale Nano-Pharmaproduktion
Sensoren zur Ermittlung von Art und Dosis von Medikamenten,
zielgenaue Produktion (Qualität, Quantität, Wirkort) des Medikamentes
Molekulare Analytik und Diagnostik
In-vivo und in-vitro Methoden zur Analyse und Diagnose Krankheitsmechanismen und –ursachen
Nutzung von »omics« Technologien (Genomics, Proteomics, Metabolomics), die jeweils die Gesamtheit biologischer Funktionsmoleküle erfassen
Messplattformen für Hochdurchsatzanalysen (z. B. Chiptechnologien)
Automatisierte Diagnostik mit Biomarkern

Regenerative Medizin
Zelltherapie
Tissue Engineering
Biohybride Organe
Anregung körpereigener Reparatur- und Regenerationsprozesse durch Wachstumsfaktoren
Autonome Systeme, die im Körper Funktionen »on demand« übernehmen
Molekulare Chirurgie
Ersatz defekter Einzelmoleküle (z. B. Rezeptoren) durch intakte biologische oder bioanaloge Moleküle

Tabelle 3.1: Identifizierte Zukunftsthemen Gesundheitsforschung im Überblick

Tabelle 3.1 zeigt einen Überblick über die Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Gesundheitsforschung[9].

Ein **zukunftsfähiges Gesundheitsversorgungssystem** (siehe Abbildung 4) muss sich im Vergleich zur heutigen Ausrichtung auf die Akutversorgung, sehr viel stärker auf Prävention und die Versorgung chronisch Kranker konzentrieren (vgl. Sachverständigenrat 2009). Hierzu ist es aus Sicht des Foresight-Teams erforderlich, medizinisch-technische Innovationen für Prävention, Diagnose, Therapie und Rehabilitation zu erforschen, zu entwickeln und in die klinische Anwendung zu führen. Weiterhin werden neue Bewertungstools für die Gesundheitsversorgung (Ökonomie, Patientennutzen, Patientensicherheit) und organisatorische Innovationen zur effizienten und effektiven Gestaltung der Gesundheitsversorgung benötigt (Versorgungsforschung, Implementierungsforschung). Auch die Ernährungsforschung ist wichtiger Bestandteil einer umfassenden Präventionsstrategie. Sie wurde schon in der Leitvision »Ein Leben lang gesund und vital durch Prävention« des Futur-Prozesses und der Gesundheits-Roadmap 2020 des BMBF (Gesundheitsforschungsrat [GFR] des BMBF 2007) aufgegriffen und daher im Foresight-Prozess nicht weiter untersucht.

Die zunehmende Individualisierung der Lebensstile und Versorgungsbedürfnisse erfordert eine informations- und kommunikationstechnisch unterstützte regionale und lokale Bündelung von Versorgungsansätzen. Beispielsweise kann aus Sicht der befragten Experten die Bereitstellung adaptiver, selbstregulierender und einfacher Informationssysteme dem Patienten einen leichten Zugang zur Leistungserbringung verschaffen und Individualisierungstrends unterstützen. Voraussetzung für die Realisierung solcher Szenarien ist die Bereitstellung einer informationstechnischen Infrastruktur (Netzwerke).

9 Die dunkelgrau unterlegten Felder sind die Zukunftsthemen, die hellgrau hinterlegten einzelne, besonders wichtige Forschungsaufgaben.

Abbildung 4: Zukunftsfeld Gesundheitsforschung

Translationale Forschung beschäftigt sich mit der Umsetzung von Erkenntnissen aus der Grundlagenforschung in die klinische Anwendung. Die Effektivität dieses Prozesses hat sich weltweit in den letzten Jahren verschlechtert. Dies resultiert in immer weniger nutzbaren innovativen Produkten und neuartigen Therapieprinzipien. Die Lücke in der Innovationspipeline bedeutet eine Vergeudung von Ressourcen, da hochwertige Ergebnisse aus der Grundlagenforschung nur unzureichend der Steigerung der öffentlichen Gesundheit zugute kommen.

Daher ist es aus Sicht der Themenkoordinatoren notwendig, epidemiologische Methoden weiterzuentwickeln, die Forschung zum Transfer wissenschaftlicher Erkenntnisse in die klinische Praxis und die Versorgung voranzutreiben und Evaluationen verschiedener Strategien zur Entwicklung und Implementierung spezieller Qualitätsindikatoren und klinischer Leitlinien durchzuführen. Außerdem sollte die Analyse von Public-Health-Effekten medizinischer Innovationen forciert werden.

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. Die so genannten »-omics-Technologien«[10] (Genomics, Proteomics, Metabolomics), die Fortschritte im Bereich der molekularen und der bildgebenden Techniken sowie die Nanotechnologie, bilden die Grundlage für die Weiterentwicklung der analytischen und diagnostischen In-vitro- und In-vivo-Methoden.

Die zukünftigen technologischen Herausforderungen in diesem Forschungsgebiet sind vor allem die Weiterentwicklung von Messplattformen für parallele Hochdurchsatzanalysen (Chiptechnologien) und Hochdurchsatzdiagnostiken (Lab-on-a-Chip-Technologien). Die diagnostische Forschung zielt auf Validierung von Biomarkern und die automatisierte Diagnostik von Biomarkern ab (McCormick et al. 2007a, b).

Hierfür erscheinen Weiterentwicklungen bezüglich der Leistungsfähigkeit, der Miniaturisierung, der Automatisierung, der Geschwindigkeit und der Kosten von Diagnoseverfahren erforderlich. Ebenso müssen nach Einschätzung der Verfasser die Technologien stärker auf den Benutzer abgestimmt werden, sodass sie entweder für routinemäßige Anwendungen (»point of care«) genutzt werden können oder aber von Spezialisten in Speziallaboren.

Regenerative Medizin beinhaltet die Heilung verschiedener Erkrankungen durch die Wiederherstellung funktionsgestörter Zellen, Gewebe und Organe, sowohl durch den biologischen Ersatz mittels gezüchteter Gewebe, als auch durch die Anregung körpereigener Regenerations- und Reparaturprozesse (Dazzi et al. 2007; Stoltz et al. 2006; Capgemini 2007).

Aktuelle Forschungsthemen sind Zelltherapien, »Tissue Engineering«, adulte und embryonale Stammzellen, Organtransplantationen und biohybride Organe (Gesundheitsforschungsrat [GFR] des BMBF 2007). Im Bereich des »Tissue Engineerings« besteht großer Forschungsbedarf – für den Ersatz von beschädigtem oder erkranktem Gewebe, aber auch für den Ersatz kompletter Organe. Damit wird eine Unabhängigkeit von Organtransplantationen angestrebt. Abstoßungsreaktionen können vermieden und die Überlebenschancen des Patienten erhöht werden. Forschungsbedarf besteht auch bei der Anregung körpereigener Reparatur- und Regenerationsprozesse durch Wachstumsfaktoren.

Ein weiterer Aspekt ist die Entwicklung autonomer biologischer Systeme, die mithilfe von Nanotechnologie und synthetischer Biologie erzeugt werden und

10 »-omics« bedeutet, dass jeweils die Gesamtheit bestimmter biologischer Funktionsmoleküle (alle Gene, alle Proteine, alle Metaboliten) aufgeklärt wird.

im Körper Funktionen übernehmen könnten, wie z. B. die Produktion von benötigten Molekülen bzw. medikamentösen Wirkstoffen »on demand«. Sowohl die regenerative Medizin als auch die nachfolgend skizzierte individualisierte Medizin weisen zahlreiche Querbezüge zum Zukunftsfeld neuen Zuschnitts »Das Altern entschlüsseln«.

Jedes Lebewesen ist mit seiner 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 Medizin (Trusheim et al. 2007; Hüsing et al. 2008).

Eine wichtige Rolle spielen hierbei molekulare Biomarker auf Ebene des Genoms, Transkriptoms, Proteoms und Metaboloms, die als molekulare Risikoprädiktoren für eine verbesserte Prävention, Diagnostik und Therapie genutzt werden können. Eine zentrale Herausforderung liegt - so eine Schlussfolgerung aus den Recherchen – in der Identifizierung und klinischen Validierung solcher Biomarker. 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. 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.

Deutliche Querbezüge zum Zukunftsthema **individualisierte Medizin** hat die Entwicklung und Anwendung einer individualisierten intrakorporalen Pharmaproduktion im Nanomaßstab. Dabei wird mithilfe von Sensoren die notwendige Art und Dosis von Medikament ermittelt und direkt vor Ort im Körper in der erforderlichen Menge produziert.

Die **molekulare Chirurgie** zielt darauf ab, defekte Einzelmoleküle oder deren Bestandteile (z. B. Rezeptoren) zu entfernen und durch korrekte Moleküle zu ersetzen. Diese zielgenaue Manipulation von Einzelmolekülen in situ stellt die konsequente Weiterentwicklung von Miniaturisierungstendenzen in der Medizin dar. Zur Realisierung dieses Zukunftsthemas sind nach der von Experten vertretenen Einschätzung neue Entwicklungen in der Energietechnik, Sensorik und synthetischen Biologie erforderlich.

3.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Gesundheitsforschung

Zukunftsfähiges Gesundheitsversorgungssystem
Erforschung und Entwicklung medizin-technischer Innovationen
Erarbeitung eines Bewertungstools
Organisatorische Innovationen zur effizienten und effektiven Gesundheitsversorgung
Fortbildung
Schnittstelle Wirtschaft / Wissenschaft
Information / Aufklärung
Klinische Forschung
Populationsspezifische, integrierte Versorgung
Leitlinien für komplette Behandlungspfade
Transparenzerhöhung im Gesundheitssystem
Pharma economics
Vernetzte Gesundheitsstatistik
Wellness
Risikostatifizierung als Instrument der Prävention und Eigenverantwortung über Kassen erstatten

Translationale Forschung
Molekulare Genetik
Weiterentwicklung epidemiologischer Methoden
Entwicklung und Implementierung von Qualitätsindikatoren und klinischen Leitlinien
Transfer wissenschaftlicher Erkenntnis in die Praxis
Systematisches Monitoring / Case Management durch nicht-ärztliche Berufsgruppen

Andere / Neue Häufigkeiten/ Relevanz von Krankheiten
Neue Infektionskrankheiten
Klimabedingte neue Erkrankungen
Lebensstilbedingte Erkrankungen
Altersbedingte Krankheiten
Sozial benachteiligte Gruppen

Rolle von Umweltfaktoren bei komplexen Krankheiten
Erforschung von Gen-Umwelt-Interaktionen, die bei der Auslösung von Krankheiten beteiligt sind
Entwicklung neuer Technologien zur Erhebung relevanter Umweltfaktoren, die Krankheiten verursachen
Aufklärung von Krankheitsentstehung und Krankheitsverlauf

Individualisierte Medizin
Monitoring von Umweltfaktoren
Wirkung von Schad- und Suchtstoffen
Gen-Umwelt-Interaktionen
Verhaltens- und Verhältnisprävention

Molekulare Analytik und Diagnostik
DNA Sequenzierung
Chip-Technologie

Molekulare Bildgebung
Sequenzierung genomischer Prozesse
Validierung
Signaturen
System-biologische Forschung
Personal Enhancement
Soziale, ethische und ökonomische Auswirkungen
Erforschung der technologischen Ansätze
Transfer der wissenschaftlichen Erkenntnisse in kommerzielle Produkte
Private vs. pflichtversicherte Finanzierung von Enhancement
Neue Therapieprinzipien
Regenerative Medizin
Gentherapie
RNA-Technologien
Drug targeting and drug delivery
Therapeutische Impfstoffe
Kombinationstherapie

Tabelle 3.2: Themen Gesundheitsforschung und Medizin im ersten Foresight-Workshop 2007

Start des Prozesses

Das Gesundheitsversorgungssystem der Zukunft war eines der Startthemen, die schon im Auftakt-Workshop von den Experten als sehr wichtig eingeschätzt wurden (siehe Tabelle 3.2). Die Online-Befragung (Themen in der Online-Befragung siehe **Tabelle 3.3**) und die Monitoring-Interviews bestätigten diese Bewertung. Die Forschungsperspektiven des Themas sind klar erkennbar. Die Themen der Gesundheits-Roadmap 2020 des BMBF wurden nicht weiter untersucht, weil sie bereits auf der BMBF-Agenda stehen. Adäquate Forschungsstrukturen zur Bewältigung der Forschungsaufgaben , so die Einschätzung von FhG ISI und IAO, müssen jedoch erst etabliert werden. Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zum Gesundheitsversorgungssystem der Zukunft sind wichtige Impulsgeber für andere Forschungsgebiete und die Wirtschaft.

Ebenso trägt ein effizienteres Gesundheitsversorgungssystem unmittelbar zur Verbesserung der Lebensqualität bei. Schließlich erfordert auch der Megatrend demografischer Wandel ein verbessertes zukunftsfähiges Gesundheitssystem. Forschung und Entwicklung für ein Gesundheitsversorgungssystem der Zukunft ist aus unserer Sicht somit aus mehreren Gründen ein relevantes Zukunftsthema für das BMBF.

Auch für die translationale Forschung sind die Forschungsperspektiven klar erkennbar, adäquate Forschungsstrukturen jedoch nicht etabliert. Ähnlich wie das Gesundheitsversorgungssystem der Zukunft wurde die translationale For-

schung schon als Startthema identifiziert und beim ersten Experten-Workshop sowie in der Online-Befragung und in den Expertenbefragungen des internationalen Monitorings als sehr wichtig und relevant eingeschätzt.

Die translationale Forschung trägt dazu bei, Innovationen im Gesundheitssystem zu implementieren und gibt somit der medizinischen Forschung und der wirtschaftlichen Entwicklung in Deutschland unmittelbare Impulse. Ebenso leistet sie einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Lebensqualität, indem bestmögliche Behandlungen effizient eingesetzt werden können.

Auch die molekulare Analytik und Diagnostik war als eines der Startthemen in den Auftakt-Workshop eingeflossen und wurde von den Experten als sehr wichtig eingeschätzt. In den Monitoring-Interviews wurde die hohe Bedeutung dieses Zukunftsfeldes betont und insbesondere darauf hingewiesen, dass die Umsetzung bzw. Übersetzung der aus molekularer Analytik und Diagnostik gewonnenen Information in medizinisch relevante Therapiemaßnahmen eine zentrale Herausforderung darstellen. Die Forschungsperspektiven des Themas sind klar und auch die Forschungsstrukturen sind erkennbar.

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Analysestränge innerhalb des BMBF-Foresight-Prozesses zeigen jedoch deutlich, dass das Thema auch längerfristig auf der Forschungsagenda stehen wird und somit einer kontinuierlichen Unterstützung bedarf. Wegen der engen Verflechtung mit der biologischen Forschung, aber auch mit Forschung in den Bereichen Nanotechnologie und Informations- und Kommunikationstechnik, werden erhebliche Impulse für diese Gebiete erwartet. Ebenso kann die Beschäftigung mit diesem Thema die wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands unterstützen und zur Verbesserung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit beitragen, indem sich beispielsweise innovative KMU mit der Entwicklung der erforderlichen neuen Technologien befassen. Schließlich werden sich Fortschritte in der molekularen Analytik und Diagnostik unmittelbar positiv auf den Erhalt bzw. die Verbesserung der Lebensqualität der Menschen auswirken.

Die regenerative Medizin wurde im Auftakt-Workshop als ein wichtiges neues Therapieprinzip identifiziert, dessen Bedeutung in der Online-Befragung unterstrichen wurde. Die regenerative Medizin weist vielfältige Verflechtungen mit der Materialforschung, der Nanotechnologie und der biologischen Forschung auf und stellt somit einen wichtigen Impulsgeber für andere Forschungsgebiete dar. In den letzten Jahren konnten nicht zuletzt dank der Etablierung neuer Forschungseinrichtungen die Kompetenzen der deutschen Wissenschaft in diesem Zukunftsfeld weiter ausgebaut werden. Ebenso befassen sich zahlreiche Biotechnologieunternehmen mit diesem Thema. Wie von allen Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Gesundheitsforschung, werden auch von der regenerativen Medizin Beiträge zur Verbesserung der Lebensqualität erwartet.

Das Zukunftsthema individualisierte Medizin gelangte als eines der Startthemen über den ersten Experten-Workshop in den Auswahlprozess. Internationales Monitoring und Online-Befragung unterstrichen die Bedeutung des Themas. Die neuartige Kombination von Diagnose und Therapie auf individueller Ebene im Rahmen einer individualisierten Medizin strahlt erhebliche Impulse für andere Forschungsgebiete, aber auch für die Wirtschaft aus. Insbesondere die in Deutschland vorhandenen Stärken in der Diagnostik-Industrie könnten künftig einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit in diesem Bereich leisten.

Die erwartete Steigerung der Effizienz therapeutischer Interventionen durch Individualisierung wird schließlich einen wesentlichen Beitrag zu einem zukunftsfähigen Gesundheitsversorgungssystem leisten können. Individualisierte Medizin ist ein Beispiel für ein Thema, bei dem die Forschungsperspektiven klar erkennbar sind, adäquate Forschungsstrukturen derzeit jedoch nicht bestehen. Dies begründet sich darin, dass die Komplexität des Themas das Zusammenwirken ganz unterschiedlicher Akteursgruppen erfordert, die bislang eher getrennte Innovationspfade beschritten (z. B. Diagnostik-Industrie versus pharmazeutische Industrie).

Die Zukunftsthemen einer individualisierten, intrakorporalen Pharmaproduktion im Nanomaßstab sowie einer molekularen Chirurgie wurden im Anschluss an den Auftakt-Workshop als neue Querschnittsthemen identifiziert, die sich aus der interdisziplinären Zusammenarbeit der Bereiche Gesundheitsforschung, Nano- und Materialwissenschaften ergeben können. Beide Themen haben eine langfristige visionäre Dimension mit zwar klar erkennbaren Forschungsperspektiven, aber derzeit noch nicht vorhandener Forschungsinfrastruktur.

In diesen Forschungsbereichen bietet sich die Chance, eine Vorreiterposition aufzubauen, indem herausragender und bahnbrechender Erkenntnisgewinn in Wissenschaft und Technologie erzielt und zur Realisierung der Visionen genutzt wird. Es handelt sich somit in beiden Fällen um interdisziplinäre Zukunftsthemen mit langfristiger Perspektive, die sich nur bei einer adäquaten förderpolitischen Unterstützung weiterentwickeln dürften.

3.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick

Die folgende Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Zukunftsthemen im BMBF-Foresight-Prozess. **Themen nach 1. Recherche** sind die Themen aus den Prozessen der Fachreferate (sofern sie nicht aussortiert wurden, weil sie bereits auf der Forschungsagenda stehen) und aus der ersten Literaturanalyse. **Themen nach 1. Workshop** sind diejenigen Themen, die nach dem 1. Workshop besonders verfolgt werden sollten. Die Tabelle 3.2 im vorangegangenen Abschnitt ist der auf dem Workshop bearbeitete Stand und

damit zwischen den Themen nach erster Recherche und den Themen nach dem ersten Workshop anzusiedeln. **Themen Online-Befragung** sind in die Online-Befragung eingegangen, bedeuteten also eine weitere Zusammenfassung der Zwischenergebnisse, die in der Befragung bewertet wurden. Und die **Themen nach Kriterienfilter** sind bereits »Zukunftsthemen«, die in der letzten Phase des Prozesses untersucht wurden. Sie sind in der Regel sehr ähnlich den am Ende des BMBF-Foresight-Prozesses vorgeschlagenen Zukunftsthemen (siehe erste Tabelle dieses Kapitels). Durch letzte Recherchen und Experteninterviews sind jedoch noch einige Zukunftsthemen modifiziert worden.

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Zukunftsfähiges Gesundheitsversorgungssystem	**Kernbereich**	**Gesundheitsversorgungssystem der Zukunft**	Gesundheitsversorgungssystem der Zukunft
Erforschung und Entwicklung medizintechnischer Innovationen	zukunftsfähiges Gesundheitsversorgungssystem (Datenmanagement inkl. Expertensysteme, Prozess Analyse/ Reengineering, Parameter für Systemleistungen, Patientenbasiertes Monitoring, zukunftsfähige Beratungsstrukturen, Systemansätze)	Medizinisch-technische Innovationen für Prävention, Diagnose, Therapie und Rehabilitation	Individualisierte Medizin
Erarbeitung eines Bewertungstools	neue Krankheitsbilder (altersbedingte Erkrankungen, Life Style Erkrankungen, gruppenspezifische Erkrankungen)	Entwicklung neuer Bewertungstools für die Gesundheitsversorgung (Ökonomie, Patientennutzen, Patientensicherheit)	Intrakorporale Nano-Pharmaproduktion
Organisatorische Innovationen zur effizienten und effektiven Gesundheitsversorgung	Molekulare Analytik & Diagnostik & Überführung in klinische Anwendung	Informations- und kommunikationstechnische unterstütze Regionalisierung der Versorgung	Molekulare Analytik und Diagnostik
Fortbildung	Rolle von Umweltfaktoren bei komplexen Krankheiten	Entwicklung und Bereitstellung einer informationstechnischen Infrastruktur für die Einführung individualisierter Versorgungskomponenten auf regionaler Ebene	Regenerative Medizin
Translationale Forschung	Transnationale Forschung	**Translationale Forschung**	Molekulare Chirurgie
Weiterentwicklung epidemiologischer Methoden	Individualisierte Medizin	Weiterentwicklung epidemiologischer Methoden	
Entwicklung und Implementierung von Qualitätsindikatoren und klinischen Leitlinien	Systembiologie	Forschung auch zu grundlegenden Fragen des Transfers wissenschaftlicher Erkenntnisse aus der Biomedizin vorantreiben	
Transfer wissenschaftlicher Erkenntnis in die Praxis	**Schnittstellen**	Evaluation von Qualitätsindikatoren und Leitlinien	
Systematisches Monitoring/ Case Management durch nicht-ärztliche Berufsgruppen	Prothesen, Orthesen (energieautark multifunktionell)	Analyse der Public Health Effekte medizinischer Innovationen	
Neue Krankheiten	Früherkennung, Diagnostik, komplexe Therapeutika		
Neue Infektionskrankheiten	Neuroprothetik		

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
		Neue Krankheiten/ Andere Häufigkeit von Krankheiten	
		Erforschung von Krankheiten, die durch den demografischen Wandel bedingt sind	
Klimabedingte neue Erkrankungen	Bewältigung von Demenzerkrankungen	Erforschung neuer Infektionskrankheiten	
Lebensstilbedingte Erkrankungen	Systemansätze, insbesondere für Gesundheitsversorgung	Erforschung klimawandelbedingter Krankheiten	
Altersbedingte Krankheiten	Systembiologie für die Gesundheitsforschung	Erforschung von lebensstilbedingten Krankheiten	
Sozial benachteiligte Gruppen		Erforschung von Krankheiten, die durch soziale Benachteiligung entstehen	
Rolle von Umweltfaktoren bei komplexen Krankheiten		**Rolle von Umweltfaktoren bei komplexen Krankheiten**	
Erforschung von Gen-Umwelt-Interaktionen, die bei der Auslösung von Krankheiten beteiligt sind		Erforschung von Gen-Umwelt-Interaktionen, die bei der Auslösung von Krankheiten beteiligt sind	
Monitoring von Verhaltens- und Verhältnisprävention		Entwicklung neuer Technologien zur Erhebung relevanter Umweltfaktoren, die Krankheiten verursachen	
		Aufklärung von Krankheitsentstehung und Krankheitsverlauf	
Individualisierte Medizin		**Individualisierte Medizin**	
Identifikation und Validierung von Biomarken		Klinische Validierung von Biomarkern	
Entwicklung von wissensbasierten Entscheidungsgrundlagen		Nachweis des klinischen Nutzens	
Sozioökonimische Bewertung		Strukturanpassungen in der Gesundheitsversorgung für individualisierte Interventionen	
		Neurologie: Individuelle Bestimmungsme-	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
		thoden zur Lokalisation zerebraler Funktionen	
		Entwicklung einer individualisierten intrakorporalen Pharmaproduktion im Nanomaßstab	
Molekulare Analytik und Diagnostik		**Molekulare Analytik/ Diagnostik**	
DNA Sequenzierung		Weiterentwicklung von Messplattformen, insbesondere Chiptechnologien für parallele Hochdurchsatzanalysen und -diagnostiken	
Chip-Technologie		Klinische Validierung von Biomarkern	
Molekulare Bildgebung		Verbesserte Automatisierung zur Diagnostik von Biomarkern	
System-biologische Forschung		Maßschneidern der Analyse- und Diagnostiktechnologien für routinemäßige Anwendungen (point of care)	
Personal Enhancement		Maßschneidern der Analyse- und Diagnostiktechnologien für den Einsatz in Speziallaboren	
Soziale, ethische und ökonomische Auswirkungen			
Erforschung der technologischen Ansätze			
Transfer der wissenschaftlichen Erkenntnisse in kommerzielle Produkte			
Neue Therapieprinzipien		**RNA-Technologien**	
Regenerative Medizin		Funktionsaufklärung von siRNA	
Gentherapie		Funktionsaufklärung von piRNA	
RNA-Technologien		Funktionsaufklärung von miRNA	
Drug targeting and drug delivery Therapeutische Impfstoffe		Identifikation der Zielmoleküle von nicht-	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
		codierenden RNAs	
		Entwicklung von geeigneten Formulierungen der RNAs, um RNA als Therapeutikum stabil zu halten und sie zum Wirkort zu dirigieren	
		Gentherapie	
		Entwicklung von geeigneten Vektoren zum stabilen und gezielten Einbringen des therapeutischen Gens ins Genom	
		Gewährleistung einer sicheren Gentherapie ohne negativen Nebenwirkungen	
		Optimale Nutzung der Potenziale der somatischen Gentherapie	
		Keimbahntherapie	
		Nanotechnologie/ Nanomedizin	
		Optimierung des Einsatzes der Nanotechnologie in der Diagnostik	
		Optimierung des Einsatzes der Nanotechnologie in der Therapie	
		Weiterentwicklung von Methoden für die molekulare Chirurgie	
		Regenerative Medizin	
		Ersatz von Gewebe durch In-vitro-Züchtung	
		Ersatz von ganzen Organen durch In-vitro-Züchtung	
		Anregung körpereigener Reparatur- und Regenerationsprozesse durch entsprechende pharmakologische Stimulation	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
		Entwicklung autonomer biologischer Systeme, die als bioanaloge künstliche Organe zur Produktion von benötigten Molekülen im Körpersystem genutzt werden.	
		Smart Materials für Prothetik	
		Gewährleistung der Biokompatibilität des genutzten Materials	
		Optimierung der Materialeigenschaften Steifheit, Flexibilität und Gewicht. Langlebigkeit und Widerstandsfähigkeit müssen berücksichtigt werden	
		Erforschung und Nutzung neuer (beispielsweise sensorischer oder aktorischer) Funktionalitäten von Smart Materials für die Prothetik	

Tabelle 3.3. Entstehung der Zukunftsthemen Gesundheitsforschung – Zwischenstände

3.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern

Viele Gesundheitsthemen weisen Querbezüge zur sozialwissenschaftlichen Forschung auf, da es um die Kernfrage geht, wie neue Therapieansätze tatsächlich zum Patienten kommen und wie Gesundheitsversorgungssysteme der Zukunft am besten gestaltet werden können.

Alle medizinisch und viele der naturwissenschaftlich orientierten Themen haben naturgemäß starke Bezüge zur biowissenschaftlichen Forschung, so z. B. individualisierte Medizin, molekulare Analytik und Diagnostik, RNA-Technologien oder regenerative Medizin. Ebenso bestehen vielfältige Anknüpfungspunkte zu den biologischen und gesundheitlichen Aspekten des Zukunftsfeldes »Das Altern entschlüsseln«.

Vielfältige Querverbindungen gibt es auch zur Informations- und Kommunikationstechnik. Sie hat eine wichtige Funktion bei der Entwicklung von Gesundheitsversorgungssystemen der Zukunft, da informations- und kommunikationstechnische Infrastrukturen und Werkzeuge die Systemoptimierung unterstützen können. Ebenso spielen informationstechnische Ansätze eine zentrale Rolle bei allen Themen, die sich mit Gesundheitsdaten befassen. So wurde in den Monitoring-Interviews darauf hingewiesen, dass sich prinzipiell alle biologischen Informationen mit Gesundheitsrelevanz digitalisieren ließen. Somit könnten ihre Auswertung und Nutzung durch informationstechnische Ansätze ermöglicht oder optimiert werden.

Im Gebiet Umweltfaktoren bei komplexen Krankheiten spielen naturgemäß Querbezüge zur Umweltforschung eine wesentliche Rolle. In der Nanomedizin sowie bei der Entwicklung von »Smart Materials« für die Prothetik als auch in der regenerativen Medizin existieren Verbindungen zu den Nanowissenschaften und zur Materialforschung.

Viele der Zukunftsthemen in diesem Zukunftsfeld enthalten neue Dimensionen beim Zusammenspiel von Mensch und Technik. Zur vollen Erschließung des Innovationspotenzials erscheint interdisziplinäre und technologieübergreifende Forschung zu neuen Formationen von Mensch und Technik, wie sie im Zukunftsfeld neuen Zuschnitts Mensch-Technik-Kooperationen skizziert ist (siehe Bericht zu den Zukunftsfeldern neuen Zuschnitts), notwendig.

Themenkoordination:
Dr. Thomas Reiß, ISI (thomas.reiss@isi.fraunhofer.de)

4 Mobilität

Das Zukunftsfeld Mobilität befasst sich mit Fragestellungen im Personen- und Güterverkehr der Bereiche Fahrzeug- und Antriebstechnologien, Infrastrukturen, Mobilitäts-, Logistik- und Siedlungskonzepte, Steuerungsinstrumente der Verkehrspolitik sowie dem Einfluss des Verkehrs auf Gesellschaft und Umwelt. Ziel der Gestaltung eines zukunftsfähigen Verkehrssystems besteht dabei in der Berücksichtigung der drei Säulen der Nachhaltigkeit, d. h. der langfristigen ökologischen, ökonomischen und sozialen Verträglichkeit. Vor den Herausforderungen zunehmender Konkurrenz auf den internationalen Produktions- und Absatzmärkten, der Verknappung fossiler Rohstoffe, des Klimawandels und einer wachsenden globalen Armut, wird die Bewältigung der Herausforderungen an nachhaltige Wirtschafts- und Verkehrssysteme immer drängender.

Durch die langsam einsetzenden Wirkungen des demografischen Wandels in den meisten europäischen Ländern und die schwieriger werdenden wirtschaftlichen Bedingungen hat sich die Wahrnehmung der Herausforderungen an zukunftsfähige Verkehrssysteme in den letzten Jahren und Jahrzehnten deutlich gewandelt. Während noch bis in die 1990er-Jahre die Bekämpfung des drohenden Verkehrsinfarktes oberste Priorität der Mobilitätsforschung darstellte, verlagerte sich, getrieben durch stagnierende und gebietsweise stark rückläufige Bevölkerungszahlen, der Fokus der Mobilitätsforschung zunehmend in Richtung der Gestaltung von Lebensräumen, finanzierbarer öffentlicher Verkehrsangebote und umweltfreundlicher Technologien. Im Bereich des Güterverkehrs spielt die Frage von Kapazitätsmanagement und Effizienz der Transportsysteme zwar noch eine wichtige Rolle, diese wurde aber durch die drastischen Folgen der Krise und zukünftig unklarer Wachstumsraten (OECD, ITF 2009), insbesondere der internationalen Warenströme, zunehmend in Frage gestellt.

4.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Mobilität

Kooperatives ganzheitliches Mobilitätsdesign
Anreizmodelle und verhaltensbildende Maßnahmen
Kooperation kollektiver und individueller Mobilitätsdienste
Institutionelle Fragestellungen und Geschäfts- und Kooperationsmodelle von Unternehmen und Behörden

Infrastrukturen für Antriebe der Zukunft
Betankungsinfrastrukturen
Diffusionsstrategien
innovative Geschäftsmodelle
Integration der Antriebe in ganzheitliche Mobilitätskonzepte

Grüne und effiziente Logistik
Regionale Wirtschaftskreisläufe
Aufbau stabiler internationaler Kooperationsnetzwerke
Marktbedingungen und Marktordnungen

Tabelle 4.1: Identifizierte Zukunftsthemen Mobilität im Überblick

Tabelle 4.1: Identifizierte Zukunftsthemen Mobilität im Überblick zeigt einen Überblick über die Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Mobilität[11]. Die dort genannten Zukunftsthemen sind die folgenden.

Kooperatives, ganzheitliches Mobilitätsdesign: Wie unsere gesamte Gesellschaft steht auch der Mobilitätssektor vor sich rasch verändernden Rahmenbedingungen. Verschiedene Szenarien zeigen, dass durch eine konsequente Mobilitätspolitik unter Ausnutzung aller Instrumente eine Annäherung an diese Ziele möglich ist. Viele Parameter sind jedoch noch unbekannt, wie die Entscheidungsmuster von Nutzern und Firmen oder die langfristige Wirkung vieler Instrumente auf unterschiedliche gesellschaftliche Schichten. Wichtig hierbei sind ferner die Gesetzmäßigkeiten, Dynamik und Anpassungsoptionen gesellschaftlicher, politischer und wirtschaftlicher Netzwerke und Strukturen. An diesen Punkten muss eine erfolgreiche und nachhaltige Mobilitätspolitik ansetzen. Einzelne Elemente eines ganzheitlichen Mobilitätsdesigns sind nach Einschätzung der Experten die Optimierung der Verkehrsträger, die Einrichtung sinnvoller Übergangspunkte, die Gestaltung von Geschäfts- und Kooperationsmodellen, die Implementierung wirkungsvoller Anreizsysteme und die Regulierungen hin zu einem nachhaltigen Verkehrsverhalten, die Regelung von Entscheidungs-, Finanzierungs- und Ordnungsprinzipien im Verkehrsmarkt, die Bildung von Netzwerken, die Aufstellung von Verhaltensmodellen und Planungstools etc. Dahinter steht aus Sicht der Themenkoordinatoren die grundsätzliche Frage, in welchem Ausmaß der Einzelne und die Gesellschaft bereit sind, gewohnte Lebensstile aufzugeben, um für nachfolgende Generationen eine lebenswerte Umwelt zu erhalten oder zumindest wahrscheinlicher zu machen.

Infrastrukturen für Antriebe der Zukunft: Die verfügbaren technischen Lösungen für emissionsarme oder -freie Antriebe sind breiter denn je, und eine eindeutige Alternative zu fossilen Kraftstoffen scheint sich nicht abzuzeichnen. Um die verschiedenen Vorteile je nach Fahrzweck und Anwendungsart sinnvoll nutzen zu können, wird eine Diversifizierung der Betankungsinfrastrukturen stattfinden. Eine Herausforderung an die zukünftige Forschung ist entsprechend die Ausarbeitung kostengünstiger Marktpenetrationsstrategien für zent-

[11] Die dunkelgrau unterlegten Felder sind die Zukunftsthemen, die hellgrau hinterlegten einzelne, besonders wichtige Forschungsaufgaben.

rale Infrastrukturen zum Betrieb der Antriebe der Zukunft. Speziell bei der Elektromobilität deutet sich eine mögliche Dualität zwischen Ladestationen einerseits und Batteriewechselsystemen andererseits an. In jedem Fall müssen die Infrastrukturen für die Antriebe der Zukunft »intelligent« sein. Insbesondere beim Aufbau von »Vehicle-to-Grid-Netzen« werden hier hohe Anforderungen an Datenschnittstellen und Datensicherheit gestellt. Eng verbunden mit intelligenten Netzen sind innovative Geschäftsmodelle. Einzubetten sind diese in eine zukunftsfähige Verkehrsmarktordnung und in ganzheitliche Mobilitätskonzepte, so die Sicht der Experten.

Grüne und effiziente Logistik: Sowohl auf europäischer Ebene mit dem »Greening of Transport Package« der EU-Kommission als auch national mit dem Masterplan Güterverkehr und Logistik steht das Thema sauberer Warenketten auf den Forschungsagenden. Für das Erreichen der gesteckten Klimaziele ist der Übergang zu regionalen Wirtschaftskreisläufen einerseits und der Aufbau stabiler internationaler Kooperationsnetzwerke andererseits notwendig. An wichtigen Knotenpunkten werden zudem Kapazitätsfragen von alles entscheidender Wichtigkeit sein – insbesondere für die Verfügbarkeit der Bahn als umweltfreundlicher Alternative. Wie die Strukturen und Rahmenbedingungen eines zukunftsfähigen und ökologisch vertretbaren Transport- und Logistiksektors aussehen werden, stellt für die Bearbeiter des Themas eine der wichtigsten und ergebnisoffensten Fragen in der Mobilitätsforschung dar. Ansatzpunkte bieten hier kooperative, sektor-übergreifende Geschäftsmodelle.

4.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen

Foresight-Workshop 2007

Zum ersten Workshop im November 2007 in Berlin wurden zum Zukunftsfeld Mobilität, Experten aus Wissenschaft und Praxis folgender Themenbereiche geladen: Straßenverkehr/ Mobilität (ifmo), Schienenverkehr (Allianz pro Schiene e.V.), Güterverkehr und Logistik (Fh-ATL) sowie Automobilbau (BMW). Ausgangspunkt waren die Startthemen der **Tabelle 4.2**

Effiziente Fahrzeug- und Antriebstechnologien
hybrid, rein elektrische Antriebe, Brennstoffzelle
neue Materialien
Energie- und Kosteneffizienz
neue Konstruktionen
Alternative Kraftstoffe
Produktionsverfahren
Verfügbarkeit
Speicherung
Transport von Kraftstoffen

Wirkungsgrad
alternative Energien
Geräuschminderung an Fahrzeugen und Infrastrukturen
fahrzeugseitig
infrastrukturseitig
innenmotorische Maßnahmen
aerodynamische Bauweisen
Rad-Schiene und Rad-Straßen Konzepte
Sichere Fahrzeuge und Infrastrukturen
intelligente Verkehrsinfrastruktur
Fahrerassistenzsysteme
Verkehrssicherheit
Verkehrsmanagement
Kommunikationssysteme
Verkehrs- und Mobilitätsmanagement durch Telematik
Entschärfung der Engpasslagen
Vernetzung von Informationen
intermodale Vernetzung
dynamische Filterung
Effiziente Logistik
neue Versorungsprozesse
Unterstützung der Netzwerke
neue Technologien in Material- und Informationsfluss
Planungssysteme

Tabelle 4.2: Themen Mobilität im ersten Foresight-Workshop 2007

Das Votum aller Experten ging stark in Richtung zur Aufnahme weicher Themen wie Verhaltensforschung im Personen- und Güterverkehr, integrierte Verkehrskonzepte und neue Verkehrssysteme. Die Standpunkte der Experten zu diesen Themenblöcken werden im Folgenden kurz skizziert:

Vor dem Hintergrund der stark steigenden Kraftstoffpreisentwicklung Ende 2007 wurden **energieeffiziente Antriebe** als zentral für zukünftige Forschungsaktivitäten gesehen. Wichtiges Element sind hier die Potenziale bei Verbrennungsmotoren. Diese werden auch weiterhin eine wichtige Rolle in Forschung und Entwicklung einnehmen (vgl. McKinsey 2008, King 2007, TNO et al. 2008). Während die Bedeutung hybrider und elektrischer Antriebe für die zukünftige Forschung bestätigt, dabei jedoch kein Konzept priorisiert wurde, erhielten die Themen Energierückgewinnung im Betrieb und sichere Leichtbau-Materialien einen hohen Stellenwert. Weiter erwähnt wurden neue Fahrzeugkonzepte, z. B. Ein- oder Zweipersonenautos für den Alltagseinsatz. In Konsequenz bedeutet dies, dass Energieeffizienz und Energieeinsparung in einer zukunftsgerichteten Forschungsstrategie einen ebenso hohen Stellenwert wie die Nutzung regenerativer Energiequellen einnehmen muss.

Im Nutzfahrzeugsegment werden alternative Antriebe eher als langfristig bedeutsam angesehen, bieten demnach einen weiteren Forschungshorizont. Hier wird vor allem Wasserstoff und Brennstoffzelle, unterstützt durch batteriebetriebene Elektromotoren als aussichtsreiche Alternative zu fossilen Brennstoffen genannt. Weniger überzeugt waren die Experten hingegen von dem Konzept modularer, d. h. schnell auf verschiedene Anwendungsarten umrüstbarer Fahrzeuge. Als relevanter im Bereich Fahrzeugbau wurden aerodynamische Konzepte, automatische Reifendrucküberwachung etc. eingeschätzt. Im Luftverkehr stellen sich die wesentlichen Herausforderungen im Bereich effizienter Triebwerke, bei Aggregaten für alternative Kraftstoffe oder neuen Rumpf- und Flügelformen. Im Bereich des Schiffbaus wurde die Weiterführung unterstützender Segelantriebe und neuer Rumpfformen und -materialien wie auch der Übergang von Schweröl zu leichteren Kraftstoffen als zukunftsweisend für die Reduktion der negativen Auswirkungen des Verkehrs, und hier insbesondere des stark steigenden internationalen Seeverkehrs, hervorgehoben.

Wesentliche Vernetzungen bestehen zunächst zum Zukunftsfeld Materialien über leichte und hochfeste Werkstoffe, Composit-Materialien, Metallschäume, keramische Werkstoffe und Materialen für aerodynamische Oberflächen. Letzteres bildet auch eine Brücke zur Nanotechnologie.

Wie auch das Zukunftsthema Fahrzeuge und Antriebe, stellen die **alternativen Kraftstoffe** ein zwar für die Zukunft sehr wichtiges Thema dar, das jedoch bereits jetzt intensiv beforscht wird. Ein wesentliches Potenzial für Forschung und Entwicklung wird hier beim Verfahren zur großtechnischen und ressourcenschonenden Produktion von Biokraftstoff der zweiten Generation und von Wasserstoff gesehen. Kritisch erscheint auch der adäquate Mix von Energieträgern, die Frage des geeigneten Einsatzes in stationären Kraftwerken zur Verstromung oder in Fahrzeugen sowie die dafür benötigten Transport- und Betankungsinfrastrukturen. Von besonderer Bedeutung sind die ökologischen und energetischen Optionen hochreiner synthetischer Kraftstoffe (SynFuel, SunFuel), wie auch das Design regenerativer Kraftstoffe für den Flugbetrieb.

Über die Kraftstofferzeugung bestehen naturgemäß enge Verbindungen zum Zukunftsfeld »Industrielle Produktionsprozesse«, speziell Biokraftstoffe der zweiten Generation haben starke Verbindungen zu der Biotechnologie. Nicht zuletzt über die Frage der energetischen Nutzung ist das gesamte Thema der Kraftstoffe integraler Bestandteil des Zukunftsfeldes Energie und weist wichtige Verbindungen zum Feld Umweltschutz und Nachhaltigkeit auf.

Die **Sicherheit von Fahrzeugen und Infrastrukturen** ist eng verbunden mit telematischen Anwendungen. Hierzu zählen Fahrerassistenzsysteme und die entsprechenden Mensch-Maschine-Schnittstellen, Fahrzeug-Fahrzeug- und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation sowie der Komplex der intelligenten

Infrastrukturen. Der technologische Bereich dieses Themengebietes wurde von den Teilnehmern des Workshops eher kritisch beurteilt, da die augenscheinlichen Vorteile technischer Unterstützungssysteme schwerwiegende Sicherheitsrisiken beim Systemausfall oder bei Bedienungsfehlern durch den Nutzer bergen könnten. Hieraus erwachsen wieder juristische Fragestellungen über die Verantwortlichkeit bei Unfällen, an denen die Assistenzsysteme wesentlichen Anteil haben. Ferner sind hieraus Fragestellungen der Systemeinführung sowie der laufenden Analyse und Begrenzung der genannten systemischen Risiken ableitbar.

Schnittstellen bestehen zu den Zukunftsfeldern IKT über die Architektur der Assistenzsysteme, optische Technologien über die benötigten Sensoren, Infrastrukturen, Neurowissenschaften, System- und Komplexitätsforschung. Diese Verknüpfungen sind jedoch sämtlich als nicht überdurchschnittlich relevant eingestuft.

Das **Management von Verkehrs- und Kapazitätsengpässen** war zum Zeitpunkt des ersten Workshops eines der zentralen Themen in der Verkehrspolitik. Durch das starke Wachstum des internationalen Handels stellten sich in den großen Seehäfen zweistellige Wachstumsraten insbesondere im Containerverkehr ein, welche die Leistungsfähigkeit der Hafenhinterlandsysteme in weiten Teilen forderten. Vor diesem Hintergrund ist der Masterplan Güterverkehr und Logistik sowie das dritte Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung zu lesen. Entsprechend sehen die Experten in Fragen des Kapazitätsmanagements ein zentrales Forschungsthema mit langfristiger Perspektive. Im Straßenpersonenverkehr konzentrieren sich Kapazitätsprobleme auf wachsende Metropolregionen, welche aufgrund der herrschenden demografischen Entwicklung vornehmlich im Ausland zu sehen sind. Bezogen auf Deutschland zeigt sich ferner in den Kernnetzen des Schienen- und Luftverkehrs zunehmend Handlungsbedarf.

Als Lösungsansatz werden IKT-Systeme betrachtet, wobei insbesondere die Aufbereitung, Standardisierung, individualisierte Weitergabe und die intermodale Vernetzung von Informationen zum Verkehrsmanagement noch Forschungs- und Entwicklungspotenzial birgt. Aussichtsreiche Optionen zur Milderung der Kapazitätsprobleme sind daneben differenzierte Maut- und Abgabensysteme. Entwicklungsmöglichkeiten bestehen hier in der Vereinfachung und Kostensenkung der Systeme, da anderenfalls, wie bei den bestehenden Implementierungen, volkswirtschaftlicher Nutzen durch die Systemkosten neutralisiert wird. Weiter wird ein ressourcenschonender Bau und Betrieb der Verkehrsinfrastrukturen genannt, wobei der Aspekt angepasster Geschwindigkeiten und Fahrstile am deutlichsten herausgestellt wurde. Verbindungen bestehen zwischen Kapazitätsmanagement, Infrastrukturen und IKT.

Viel diskutiert, aber schließlich nicht überdurchschnittlich hoch eingestuft, wurden die zukünftigen Forschungspotenziale im Bereich **effizienter**, nachhaltiger **Logistik**ketten und -netze. Die meisten positiven Nennungen erhielt der Bereich regionaler Produktions- und Dienstleistungsstrukturen, gefolgt von effizienten, d. h. möglichst gleichmäßigen Auslastungen von Transport- und Informationsinfrastrukturen mit den Unterpunkten Aufkommensbündelung und Leerfahrtenvermeidung. Netzwerkbildung zwischen Transporteuren, Produzenten und Kunden sowie neue Versorgungssysteme und Technologien spielen dagegen nach Expertenvotum eine untergeordnete Rolle.

Insgesamt decken sich die Einschätzungen damit mit der positiven Beurteilung des Themas Verkehrsmanagement. Obwohl aus der krisenbehafteten Perspektive 2009 die Dringlichkeit des Themas stark an Aktualität verloren hat, muss langfristig doch mit anziehenden Wachstumsraten gerechnet werden (OECD, ITF 2009). Daneben bieten die wachsenden Metropolen Asiens und Südamerikas Anwendungsgebiete und Märkte für heimische Lösungen. Verknüpfungen bestehen auch hier zu den Bereichen Infrastrukturen und IKT.

Ein sehr eindeutiges Votum gaben die Experten zu dem Thema Verhaltensforschung und -modellierung **(Verkehrsverhalten)** ab. Obwohl Erklärungsansätze zum Verhalten von Verkehrsteilnehmern und die Wirkung verhaltensbeeinflussender Instrumente bereits seit Jahrzehnten Untersuchungsgegenstand der Verkehrsforschung ist, fehlt es nach wie vor an validen Verhaltensmodellen. Da technische Lösungen allein aber nicht ausreichen werden, um die Herausforderungen Klimaschutz und Ressourcenschonung zu meistern, sind diese Modelle zum wirkungsvollen Design verkehrspolitischer Strategien unabdingbar. Lernfähige, agentenbasierte Systeme mit einer hohen räumlichen, zeitlichen und lebensstil-typischen Differenzierung könnten hier einen Lösungsweg markieren. Die Forschung ist dabei interdisziplinär auszurichten, um soziale, ökonomische und technologische Trends und Trendbrüche, Optionen und Grenzen angemessen zu berücksichtigen.

Ferner stellt die Ausarbeitung realpolitischer Ansätze zur Verhaltenssteuerung im Personen- und Güterverkehr eine wichtige Herausforderung für eine zukunftsfähige Verkehrspolitik dar. Auch hier weisen vergangene Forschungsanstrengungen nur bedingt erfolgreiche Ergebnisse vor. Interdisziplinäre Ansätze, Dienstleistungskonzepte, z. B. im Bereich des nachhaltigen Tourismus oder einer nachhaltigen Konsumpolitik, umreißen auch hier das Forschungsfeld. Direkte Verbindungen zu anderen Zukunftsfeldern bestehen allenfalls zu ähnlichen Fragestellungen im Zukunftsfeld Umwelt und nachhaltige Entwicklung.

Die Frage nach **neuen Verkehrssystemen** neben den klassischen Verkehrsträgern Straße, Schiene, Luftfahrt und Schifffahrt tauchen periodisch wieder auf. Vorstellbar wären hier Magnetschwebebahnen, unterirdische Röhrensysteme

wie »Cargo-Cap« oder »Swiss Metro«, Zeppeline zur Lastenbeförderung und andere Konzepte. Zum Teil sind diese bereits in Pilotanwendungen wie der Transrapid gescheitert oder wie der Cargo-Lifter aus wirtschaftlichen Gründen nicht gebaut worden. Ferner denkbar sind neue Anwendungen auf bestehenden Systemen aufbauend, wie etwa selbstfahrende Einheiten auf dem Schienennetz à la »Rail Cab« oder das im Betrieb befindliche Schnellbussystem TransMilenio in den südamerikanischen Städten Coritiba und Bogotá und der »Dual Mode Bus« für Straßen- und Schienenbetrieb im japanischen Hokkaido. Zur letzteren Kategorie können auch die neueren Anwendungen von »Car Sharing«, etwa das »Go-Car-Konzept« in Ulm oder das Pariser Mietfahrrad-Konzept gerechnet werden.

Die laufenden Anwendungen deuten darauf hin, dass sich die Untersuchung neuer Systeme und Systemanwendungen durchaus lohnen kann. Durch die zunehmend fallspezifischen Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer über das am besten geeignete Verkehrsmittel können hier durchaus Marktchancen für neue Anwendungen erkannt werden. Entsprechend ist das Votum der Expertinnen und Experten, neue Verkehrssysteme weiter in den Forschungsprogrammen zu berücksichtigen.

Weitere Themen wie die Lärmbekämpfung im Verkehr wurden als unbedeutend für die zukünftige Forschung identifiziert, gerade für den Schienenverkehr gilt diese Einschätzung jedoch nicht. Ebenfalls als wichtig, aber bereits gut beforscht bezeichneten die Expertinnen und Experten Modellansätze im Zusammenhang zwischen Verkehr und Wirtschaft. Jedoch wurden Details wie die tatsächlichen regionalwirtschaftlichen Impulse von Infrastrukturinvestitionen als bislang unbefriedigend beschrieben dargestellt.

Monitoring-Panel und Fachgespräche

Die beiden Monitoring-Wellen waren durch eine drastische Änderung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen aufgrund der Finanz- und Wirtschaftskrise und den Verfall der Rohölpreise gekennzeichnet. Entsprechend verlagerten sich die Einschätzungen der teilnehmenden Experten teilweise; die Annahmen zu langfristigen globalen Trends wie fortschreitende Globalisierung, Verknappung der Ölreserven und die Anforderungen an den Klimaschutz bildeten jedoch auch in der zweiten Monitoring-Welle tragende Elemente für die Identifikation wichtiger Zukunftsfelder der Mobilitätsforschung. Neben dem internationalen Panel wurden zahlreiche Gespräche mit nationalen und internationalen Experten zu ausgewählten Fragen der Mobilitätsforschung geführt. Im Folgenden einige Ergebnisse.

Effiziente Fahrzeug- und Antriebstechnik: Durch die jüngst fallenden Ölpreise und zu erwartende Kürzungen bei Forschungsmitteln in Zeiten der Krise besteht die Gefahr einer Reduktion der Forschungsintensität bei alternativen Antrieben und Kraftstoffen. Klimawandel und die mittelfristige Verknappung fossiler Energieträger verlangen jedoch eine Fortführung von Initiativen speziell in internationalen Netzwerken wie der »Green-Cars»-Initiative der EU[12], der Systemforschung Elektromobilität im Rahmen des Konjunkturprogramms II, aber auch des nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff[13]. Die Zukunft von Wasserstoff und Brennstoffzelle für mobile Antriebe wird jedoch eher kontrovers gesehen. Wichtige Forschungsthemen in dem Kontext sind das Energiemanagement und die Kraftstoffspeicherung an Bord (Letzteres speziell für Wasserstoff), die konstruktiven Optionen durch neue Materialien und Antriebsstrang-Konfigurationen wie z. B. die Verwendung von Radnabenmotoren, so eine Aussage der befragten Experten. Im Bereich der Elektromobilität wird weiterhin das Thema Batterietechnologie, und hier speziell die Punkte Sicherheit (Kühlung), Ladezeiten, Haltbarkeit und Kosten, von langfristiger Bedeutung für die Forschung sein. Da die Zugangshürden für die Entwicklung elektrischer Fahrzeuge relativ niedrig sind, muss Europa, folgt man den Einschätzungen, die im Foresight-Prozess abgegeben wurden, in der Batterieforschung Kompetenzen bilden, um im internationalen Wettbewerb bestehen zu können. Die begrenzte Verfügbarkeit von Lithium und anderen wichtigen Elementen für die Batterieherstellung wird die Batterieforschung dabei vor große Herausforderungen bezüglich Recyclingverfahren und Substitutionsstrategien stellen.

Eine Reduktion der CO_2-Emissionen im Verkehr um 40 Prozent durch technische Maßnahmen ist möglich, die Entwicklungsdynamik wird sich jedoch stark verlangsamen. Als schwierig wird jedoch die Marktfähigkeit neuer Antriebskonzepte angesehen. Die Erweiterung des Blickfeldes von den Antriebstechnologien auf gesamtheitliche Fahrzeug- und Nutzungskonzepte bis hin zu Kooperationsmodellen zwischen Automobilherstellern, Flottenbetreibern, ÖV-Unternehmen und/ oder der Energiewirtschaft gewinnen damit an Bedeutung für das Design der Mobilitätssysteme der Zukunft. Fahrzeugtechnik und Fahrzeugdesign, insbesondere auch in den stark wachsenden Segmenten Flug- und Schiffsverkehr, spielen hier aus Sicht der Bearbeiter eine wichtige Rolle.

Alternative Kraftstoffe und Versorgungsinfrastrukturen: Der Forschungsschwerpunkt wird eher bei den Antrieben und weniger bei den Kraftstoffen gesehen. Von Bedeutung werden jedoch die wirtschaftliche Herstellung von Biokraftstoffen der zweiten Generation sowie Fragen des geeigneten Einsatzes der

12 http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/lists/green-cars_en.html
13 http://www.bmvbs.de/-,302.959574/Nationales-Innovationsprogramm.htm

Energieträger in stationären und mobilen Anwendungen (vgl. Energiekonzert) sein.

Aus der Literatur lassen sich allerdings erhebliche Forschungspotenziale im Bereich der Versorgungsinfrastrukturen erkennen. In technischer Hinsicht stellt die sichere Speicherung und der Transport von Wasserstoff sowie der Umgang mit einer inhomogenen »Patchwork«-Struktur aus Kraftstoffen (Wasserstoff, Strom, Erd-/ Autogas, Biokraftstoffe, »Syn-Fuels« und konventioneller Sprit) vor dem Hintergrund einer in vielen Gebieten sinkenden Nachfrage eine enorme Herausforderung dar (vgl. auch das Zukunftsfeld »Zukunftsfähige Lebensräume«). Von zentraler Bedeutung für den Markterfolg der entsprechenden Antriebstechnologien sind Verfügbarkeit und Kosteneffizienz der Versorgungsinfrastrukturen, was durch geeignete Rahmenbedingungen und Förderprogramme gesteuert werden kann.

Intelligente, vernetzte Fahrzeuge und Infrastrukturen: Im Bereich Nutzerinformation bietet sich noch ein großes Potenzial z. B. durch »On-Trip-Information« zur Echtzeitgestaltung intermodaler Reiseketten oder personalisierter, orts- und umfeldsensitiver Dienste (»Location Based Services«).

In allen Verkehrsträgern werden Systeme zum energieeffizienten Fahren eine große Rolle sowohl für die Kostensenkung, als auch für die Umwelt- und Klimafreundlichkeit des Verkehrs spielen. Wichtig wird die Integration verschiedener Leit-, Sicherungs-, Assistenz- und Informationssysteme werden. Insbesondere bei den Leitsystemen im Bahnverkehr (ECTS) und im Luftverkehr (»Single European Sky«) werden Rechtsrahmen, Standardisierung und Schnittstellendesign bei der horizontalen Systemintegration verschiedener nationaler Subsysteme und Strukturen zu klären sein.

Die Entwicklung umfassender Assistenzsysteme zur Erhöhung der Fahrgastsicherheit wird innerhalb der Experten sehr kontrovers betrachtet. Hier werde der Aspekt der Eigenverantwortung und des »Faktors Mensch« vernachlässigt. Dieser bedarf in zukünftigen Forschungsprogrammen erhöhter Aufmerksamkeit, so die Forderung.

Verkehrs- und Kapazitätsmanagement: Im Zuge der krisenbedingt dramatischen Rückgänge in der Verkehrsnachfrage wurde das Thema zwar in seiner Bedeutung im Vergleich zu Klima- und Ressourcenthemen zurückgestuft, langfristig werden Kapazitätsengpässe aber insbesondere in den Seehäfen und deren Hinterlandanbindungen bedeutsam bleiben. Zielkonflikte können zwischen maximaler Kapazitätsauslastung, Sicherheit und Umweltschutz auftreten. Kapazitätsmanagement ist entsprechend intermodal zu verstehen, was wichtige Brücken zu den Fragekomplexen intelligenter Infrastrukturen sowie Verkehrsmanagement schlägt. Ein weiterer Punkt für zukünftige Forschung ist der Umgang

mit dispersen Auswirkungen von Infrastrukturen, z. B. Hochgeschwindigkeitsstrecken oder Flughäfen, in der Regional- und Siedlungspolitik.

Effiziente und grüne Logistik: Die Bedeutung des Güterverkehrs und der Logistik für Klima, Ressourcenverbrauch und Kapazitätsmanagement wird wegen des langfristigen Wachstums globaler Warenströme weiter steigen. Spannende Themen können hier der Einsatz neuer IKT- und Sensortechnologien speziell für die Organisation der Verteilung auf der »letzten Meile« sein. Hier fehlen aus Sicht der Befragten noch grundsätzliche Kenntnisse zu Entscheidungsabläufen, welche für die Entwicklung einer erfolgreichen Logistikpolitik notwendig sind.

Neuere Trends in der Forschung sind Carbon Management Standardisierung/Interoperabilität und Vernetzung. Wieder aufkommen wird das Thema lokaler Güterverkehrszentren. Die Trends zu regionalen Wertschöpfungsketten einerseits und zu grenzüberschreitenden Netzwerken andererseits werden zu effizienten Strukturen zu integrieren sein.

Verhaltensbeeinflussung und Mobilitätsmanagement: Weiche Maßnahmen des Mobilitäts- und Verkehrsmanagements sind zur Erreichung der Klimaziele unbedingt notwendig. Die Reduktionspotenziale werden als ebenso hoch (40 Prozent Reduktion des CO2-Ausstoßes im Verkehr bis 2050) wie bei technischen Maßnahmen eingeschätzt und zur Minderung von »Rebound«-Effekten benötigt. Die Herausforderung besteht in der Akzeptanz und Umsetzbarkeit bekannter Konzepte wie kompakte Stadtstrukturen (»Walkable Neighbourhoods«) und der notwendigen Umgestaltung institutioneller Strukturen. Entscheidende Rollen spielen nach Auffassung der Experten flexible und nachhaltige Siedlungs- und Raumstrukturen sowie dafür regional angepasste »Governance«-Strukturen. Damit besteht eine enge Verbindung zum Zukunftsfeld »Zukunftsfähige Lebensräume«. Insgesamt wird der PKW jedoch trotz stark steigender Kraftstoffpreise in der Gestaltung zukünftiger Mobilitätsformen eine zentrale Position behalten.

Erklärungsmodelle für strukturelle Veränderungen: Die Auswirkungen der Krise haben die engen Grenzen bestehender Verkehrs- und Wirtschaftsmodelle aufgezeigt. Der strukturelle Wandel in den Verkehrs- und Logistiksystemen, bedingt durch wirtschaftliche Verwerfungen, die Dynamik von Märkten und Produktionsstandorten, Demografie, Lebensstilen und Stadtstrukturen, Weltklima, Katastrophen und militärische Auseinandersetzungen, bedarf neuer adaptiver Erklärungsmodelle. Auch die Analyse von vermehrt auftretenden monopolistischen Strukturen und der Umgang mit diesen wird bedeutsam sein. Bedingt durch Globalisierung und Marktliberalisierung sowohl im internationalen Handel, als auch bei der Energieversorgung von Verkehrsunternehmen und dem Infrastruktur-Management zeichnet sich dies bereits ab. Aufgabe wäre schließlich auch die Analyse von Hemmnissen für intermodale Verlagerungen im Per-

sonen- und Güterverkehr, welche sich im Rückblick auf die gescheiterten Bemühungen der letzten Jahrzehnte zeigen. Zu betrachten sind die Verbindungen von Lebens-, Produktions- und Konsummodellen, Arbeitsmärkten und Einkommensstrukturen. Als spannendes Zukunftsthema eröffnen sich mobile Wohn- und Lebensstile bis hin zu »Smart Homes« (vgl. Zukunftsfeld »Zukunftsfähige Lebensräume«).

Optionen sind etwa dynamische agentenbasierte Systeme mit einer flexiblen Subsystem-Architektur. Nach Einschätzung der Befragten sollte Zielstellung der Forschung sollte die Analyse systemischer Risiken und die Bewertung multinationaler oder regionaler verkehrs- und wirtschaftspolitischer Strategien sein. Mit diesem Votum gehen die internationalen Experten weit über die verhaltene Einschätzung des Startthemas »Verkehr und Wirtschaft« hinaus.

Neue Verkehrs- und Transportsysteme: Neue Verkehrssysteme werden durch die Experten kaum angesprochen. Die Antworten lassen sich jedoch derart interpretieren, dass die Konzentration eher auf der optimierten Nutzung bestehender Systeme liegen wird.

Emissionsminderung: Sowohl die Reduzierung von Luftschadstoffemissionen als auch die Lärmreduktion spielen im Bahn- und Luftverkehr weiter eine wichtige Rolle für die Forschung. Hintergrund sind die im Gegensatz zum Straßenverkehr geringen jährlichen Stückzahlen an Fahrzeugen, welche eine intensive Forschungstätigkeit wirtschaftlich schwierig gestalten. Wichtig sind deshalb intelligente Rahmenbedingungen, um technologische Innovationen im Bereich der Nachhaltigkeit für die Verkehrsunternehmen interessant zu machen. Ein Beispiel wären lärm- und emissionsabhängige Trassengebühren bei der Bahn ähnlich zu Straßen und zum Luftverkehr. Insofern werden die Ergebnisse des ersten Workshops bestätigt.

Online-Befragung

Nach Analyse der Startthemen und Fachgespräche ergab sich eine in sieben Themenblöcke unterteilte Gliederung des Online-Fragebogens zum Zukunftsfeld Mobilität (siehe **Tabelle 4.3**). 162 Experten und Expertinnen beantworteten den Fragebogen.

Die Auswertung der Online-Befragung ergab zunächst, dass die Bedeutung der einzelnen Forschungsfragen, bis auf wenige Ausnahmen, als wichtig bis sehr wichtig eingestuft wurde. Für die sieben Themenbereiche ergibt sich folgendes Bild:

Die Forschungsthemen **Alternative Antriebe** und **Kraftstoffe und Infrastrukturen** werden jetzt und in zehn Jahren als sehr relevante Themen mit ho-

her wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Bedeutung angesehen. Aufgrund der aktuellen Medienpräsenz und Förderschwerpunkte ist hier die Benennung der Elektromobilität mit einem Zeithorizont der höchsten Forschungsintensität von fünf bis zehn Jahren als bedeutendste Technologielinie nicht verwunderlich. Zentrale Forschungsaufgaben sind aus Sicht der Teilnehmenden die Entwicklung der Batterietechnologie, Akzeptanzfragen und die regenerative Energieerzeugung. Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologien erscheinen technisch problematisch, teuer und nachhaltigen Mobilitätsstilen entgegen gerichtet, bieten jedoch eine längerfristige Forschungsperspektive.

Als gesellschaftlich wichtig und innerhalb des Gebietes **Fahrzeugtechnik und -design** langfristig forschungsrelevant erwiesen sich in der Auswertung leichte Verbundwerkstoffe sowie – insbesondere im Flugzeug- und Schiffsbau – alternative Fahrzeugkonzepte zur Verminderung des Energieverbrauchs ohne Sicherheitseinbußen. Technische Systeme zur Fahrerassistenz oder zur Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastrukturen wurden als weniger relevant oder weitgehend erforscht klassifiziert. Im Gebiet **intelligente Infrastruktursysteme** werden Echtzeitprognosen des Verkehrsgeschehens, Stau- und Kapazitätsmanagement sowie sozialwissenschaftliche Kompetenz bei der Fahrzeug-Fahrzeug- und der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation sowie bei Intermodalität und Interoperabilität als relevant bewertet. Ebenfalls mit hohen Forschungsreichweiten und eher durchschnittlichen Relevanzen werden komplexe systemische Risiken im Verkehr, nachhaltige Planungs- und Betriebsformen sowie regulatorische Aspekte benannt.

Im **Mobilitätsmanagement** wird die höchste Forschungsintensität den Themen barrierefreie Mobilität für spezielle Nutzergruppen, ressourceneffiziente Raumplanung und Förderung des nichtmotorisierten Verkehrs zugeschrieben, was in erster Linie der demografischen Entwicklung in Europa zuzuschreiben ist. In der **Logistik** werden Forschungsfragen zu regionalen Produktions- und Dienstleistungsstrukturen mit dem Hinweis auf mehr Vernetzung und Interdisziplinarität der Ansätze als bedeutendster Einzelaspekt genannt. Weniger wichtig bezüglich beider Indikatoren stellen sich aus deutscher Perspektive die Forschungsfragen Kapazitätsmanagement und Sicherheit dar.

Das Themengebiet **visionäre Verkehrskonzepte** weist naturgemäß die größte Forschungsreichweite und in einigen Forschungsaufgaben eine signifikante Relevanz auf. Durch persistente Kapazitätsengpässe in zentralen Netzteilen ist der Problemdruck und damit die Notwendigkeit für Forschungsaktivitäten in den Bereichen Güterverkehr und intermodale Systeme am größten, während visionären Konzepten im Personenverkehr eine längerfristige Bedeutung bei etwas geringerer Relevanz beschieden wird. Dieses Ergebnis der Online-Befragung deckt sich mit Aussagen der Fachliteratur.

Das Fazit lautet: Aus dem Bereich der Verkehrstechnologien stechen im Zuge der aktuellen Klima- und Rohstoffdebatte Fragen energiesparsamer Fahrzeuge mit zum Teil langen Forschungsreichweiten heraus. Der ausschließliche Verlass auf technische Lösungen wird jedoch sowohl in der Literatur, den Experteninterviews, als auch in der Online-Befragung stark in Frage gestellt. Telematik, Sicherheit, Komfort und Kapazitätsmanagement werden zwar als mehr oder minder bedeutsam, jedoch als entweder schon stark beforscht oder wenig relevant in der Zukunft bewertet.

Ausgewählte Literaturstellen – qualitative Literaturanalyse

Parallel zu Fachgesprächen und Online-Befragung wurden relevante Literaturstellen und Veranstaltungen ausgewertet. Die Ergebnisse werden im Folgenden kurz skizziert.

Antriebe und Kraftstoffe: In der Studie »Mobilität 2030« nennt das World Business Council for Sustainable Development (WBCSD 2004) als die zentrale Herausforderung zukünftiger alternativer Antriebe die Speicherung von Wasserstoff in Fahrzeugen, die Verbesserung der Zellmembrantechnologie und die sichere Unterbringung von Brennstoffzellen in Fahrzeugen (vgl. auch Grünwald 2006).

Kraftstoffe und Versorgungsinfrastrukturen: Nach WBCSD (2004) stellen Verfahren und Infrastrukturen für die flächendeckende Verfügbarkeit synthetischer Kraftstoffe wie BTL (»Biomass-to-Liquid«), GTL (»Gas-to-Liquid«) und CTL (»Coal-to-Liquid«) Zukunftsperspektiven für die Verringerung der Abhängigkeit von Erdöl dar. Insgesamt sind die Produktions- und Vertriebskosten alternativer Kraftstoffe in allen Bereichen noch wesentliche Hinderungsgründe für die Marktdurchdringung. Neben kostensenkenden Technologien ist hier die Entwicklung von Geschäftsmodellen zwischen Fahrzeug- und Kraftstoffherstellern denkbar.

Vernetzte und intelligente Fahrzeuge und Infrastrukturen: Aus den Beiträgen der Konferenz »Traffic and Transport 2030« der TU Darmstadt im Februar 2008 (TU Darmstadt 2008) lassen sich Abstandsassistenten, Spurhaltesysteme und gegenseitige Gefahrenwarnungen als Forschungsaufgaben in der Fahrzeugtechnologie beschreiben, die jedoch derzeit schon in mehreren Verbundprojekten angegangen werden. Zukünftig relevant werden hier adaptronische Verfahren zur Erhöhung der Systemzuverlässigkeit und das Design von Mensch-Maschine-Schnittstellen (HMIs), was besonders in Flugzeugcockpits von sicherheitsrelevanter Bedeutung ist. Ebenfalls im Entstehen sind derzeit hochpräzise Inertiale Navigationssysteme (INS) auf der Basis von faseroptischer und von MEMS-Technologie (TU Darmstadt 2009). Weitere Konzepte für zukünftige Entwicklungen sind (Baker et al. 2006): Autopiloten,

Pulks/Konvois, Integration der Verkehrsträger, Fahrzeug als Teil der Infrastruktur, intelligente Geschwindigkeitsanpassung oder robotische Notfall-Hilfesysteme.

Unter dem Stichwort Umfelderfassungssysteme werden in der Literatur die Stichworte »Ambient Intelligence« (AI), uniquitäre Kommunikation, »Peer-to-peer«(P2P)-Netzwerke und »Conduct-by-Wire« genannt. Diese sollen zur Errichtung allzeit verfügbarer ortssensitiver Dienste (»Location Based Services«, LBS), personalisierter Dienste und autonomer Systeme sowie von Diensten in Mobilität und Logistik beitragen.

Herausforderungen bestehen einerseits in der Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Transparenz, z. B. bei Abrechnungssystemen. Wegen der zu erwartenden Vielzahl von Systemkomponenten, die miteinander kommunizieren, werden sich derartige orts- und kontextsensitive Assistenzdienste in selbstorganisierenden Netzen mit sich selbst generierenden Subsystemen dynamisch verbinden. Dies kann schwierige Fragen hinsichtlich der entsprechenden Generation von Datenschnittstellen und System- und Sicherheitsarchitekturen aufwerfen, welche derzeit noch nicht in vollem Umfang absehbar sind. Diese komplexen, selbstorganisierenden Systeme und Ad-hoc-Netze benötigen schließlich Verfahren zur Selbstdiagnose bei Bedienungsfehlern, menschlichem Versagen oder technischen Störungen.

Vollständig oder teilweise automatisiertes Fahren wird in modernen Fahrzeugen möglich sein und in fernerer Zukunft zum Standard gehören. Allerdings werden nicht alle Fahrzeuge gleichermaßen mit Assistenzsystemen ausgestattet sein. Es stellt sich dann die Frage einer möglichen Mischung automatisch und manuell gelenkter Fahrzeuge in einer Infrastruktur oder der Trennung der Systeme, so Kommentare von Experten.

Verkehrs- und Kapazitätsmanagement: Kern der Verkehrssteuerung wird aus Sicht der Themenkoordinatoren die Berücksichtigung von situations-, umwelt- und nutzerspezifischen Daten in Verkehrsmanagement- und Preissystemen, die flexible, situationsabhängige Kombination verschiedener Verkehrsbeeinflussungssysteme (Zugangskontrolle, dynamische Spurfreigabe, Geschwindigkeitskontrolle, Preise, Information etc.) sowie Echtzeit-Kurzfristprognosen sein. Diese Verkehrslenkungssysteme werden intermodal und einfach handhabbar sein müssen. Hierbei stellen sich die gleichen Herausforderungen an die Integration zuverlässiger und sicherer Datennetze wie bei intelligenten Infrastrukturen. Mit zunehmender Systemkomplexität stellt die Erforschung der Wirkungen von zeitlich, räumlich, fahrzeugtechnisch und nutzerspezifisch hochgradig differenzierten Preissystemen und Verkehrsmanagement-Instrumenten eine wichtige Voraussetzung für die Nachhaltigkeitsbewertung verkehrspolitischer Maßnahmen dar.

Die Option der Trennung der Verkehrsarten wird, so die Schlussfolgerungen aus den Recherchen, ein wiederkehrendes Thema bei steigendem Transportaufkommen im Bahnverkehr sein. Hier können neuere Entwicklungen der Signal- und Sicherungstechnik (ECTS) die bisher mäßigen Ergebnisse in einem neuen Licht erscheinen lassen. Ebenfalls weiter von Bedeutung werden Entwicklungen in der Container-Umschlagstechnologie sein.

Logistik: Die TU Darmstadt (2008) nennt hier die Gestaltung von Logistik- und Produktionsprozessen in zunehmend kompetitiven Märkten, die Auswirkung umweltpolitischer Maßnahmen auf Güterströme und Wirtschaft, die Veränderung von Produktionsnetzwerken und Produktionsformen infolge der Entwicklung der Energiepreise und die Internalisierung der externen Kosten des Verkehrs sowie Sicherheitsrisiken als Forschungsthemen mit noch langer Perspektive. Gefordert sind Leistungsfähigkeit von Drehkreuzen, Entwicklungsstrategien und neue Logistikkooperationen. Ferner sind neue organisatorische Konzepte zwar für den innerstädtischen Lieferverkehr und die Distribution auf der »letzten Meile« nicht neu, unter zunehmendem Druck zur Ökologisierung der Logistik aber von verstärktem wissenschaftlichem wie praktischem Belang.

Mobilitätsmanagement und Verkehrsplanung: Ein Ergebnis der Auswertung ist, dass Konzepte zur Attraktivitätssteigerung des ÖPNV müssen auf zukunftsfähige Finanzierungs- und Kooperationsmodelle für eine konsequente Nutzerorientierung setzen. Die TU Darmstadt (2008) nennt hier u. a. Geschäftsmodelle zur Verknüpfung des ÖPNV mit Car Sharing, Warentransport beim Einkauf oder sonstigen individuellen Mobilitätsformen. Die Zusammenhänge zwischen ökonomischen Veränderungen und Verkehrsmittelwahl sowie die Grenzen und Einsatzmöglichkeiten nachfrageorientierter, flexibler Systeme bedürfen der Analyse. Besonders unterstrichen wird dabei die Imagebildung für den ÖPNV und die Erörterung der Zukunft fahrerloser Systeme.

Die Identifikation individueller und regionaler Mindeststandards der Mobilitätsversorgung ist bei der Konzeption von Mobilitätssystemen eine weitere, nach Interpretation der vorliegenden Rechercheergebnisse, bislang nicht befriedigend gelöste Aufgabe. Im Umfeld sozialer Gerechtigkeit ist aus Sicht der Themenkoordinatoren zu prüfen, inwieweit Energiepreise und Marktinstrumente der Verkehrspolitik soziale Ungleichheit fördern oder mindern. Insbesondere bei sehr viel knapper werdenden öffentlichen Mitteln sollte die Kompetenz regionaler Planungsbehörden im Umgang mit selbstorganisierenden Strukturen der Mobilitätsverortung gestärkt werden.

Neue Verkehrssysteme: Im Bereich der Luftfahrt zeichnen sich derzeit einige Ansätze zu straßenfähigen Kleinflugzeugen (»fliegende Autos«) und zur wachsenden Bedeutung senkrecht startender Luftfahrzeuge ab. Obwohl der individualisierte Luftverkehr aus Kraftstoffeffizienz- und Sicherheitsgründen sehr um-

stritten ist, könnte eine breite Forschungsförderung diese Entwicklungen, so eine mögliche Schlussfolgerung, im Auge behalten.

Ausgewählte Zukunftsthemen und erweiterter Input für »Energiekonzert« und »Lebensräume der Zukunft«

Die im Lauf des Foresight-Prozesses identifizierten Forschungsthemen im Bereich Verkehr, Mobilität und Logistik sind nicht grundsätzlich neu. Ebenso sind die langfristigen Trends und möglichen Trendverschiebungen, welche die Entwicklung der Mobilitätsmärkte prägen, hinlänglich bekannt. Manche dieser Trends sind jedoch recht unstetig, wie z. B. die Kapazitätssituation in der internationalen Logistik, und manche Technologielinien sind umstritten (z. B. automatisiertes Fahren). Entsprechend werden die wichtigen Kernthemen der Verkehrsforschung je nach Beurteilungszeitpunkt und je nach Standpunkt der Beurteilenden unterschiedlich wahrgenommen. Während sich erstere Differenzierung deutlich in den Panel-Interviews und Fachgesprächen vor und nach Beginn der Krise zeigte, tritt letzterer Unterschied deutlich zwischen Fachgesprächen und Literatursichtung zutage.

Dennoch lassen sich die verschiedenen Quellen des Foresight-Prozesses zu einigen grundsätzlichen Trends der zukünftigen Forschung im Umfeld Verkehr und Mobilität zusammenfassen. Die Anordnung der Zukunftsthemen (siehe Tabelle 4.1) erfolgt dabei absteigend nach der durch die Autoren eingeschätzten gesellschaftlichen Bedeutung und Langfristigkeit.

Kooperatives, ganzheitliches Mobilitätsdesign: Wie unsere gesamte Gesellschaft steht auch der Mobilitätssektor vor sich rasch verändernden Rahmenbedingungen. Daneben wächst der Druck zur Umwelt- und Klimafreundlichkeit und zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs stetig. Einzelmaßnahmen wie die Förderung umweltfreundlicher Fahrzeuge oder umweltfreundliche Mobilitätsangebote können nur eine geringe Wirkung entfalten bzw. die hohen Ziele nur zum Teil erreichen. Verschiedene Szenarien zeigen, dass eine Annäherung an diese Ziele durch eine konsequente Mobilitätspolitik unter Ausnutzung aller Instrumente möglich ist. Viele Parameter sind jedoch noch unbekannt, wie die Entscheidungsmuster von Nutzern und Firmen oder die langfristige Wirkung vieler Instrumente auf unterschiedliche gesellschaftliche Schichten. Wichtig hierbei sind ferner Gesetzmäßigkeiten, Dynamik und Anpassungsoptionen gesellschaftlicher, politischer und wirtschaftlicher Netzwerke und Strukturen. An diesen Punkten muss, so die hier vertretene Einschätzung, eine erfolgreiche und nachhaltige Mobilitätspolitik ansetzen.

Die Elemente eines ganzheitlichen Mobilitätsdesigns sind nach Auffassung der Bearbeiter die Optimierung der Verkehrsträger, die Einrichtung zweckmäßiger Übergangspunkte, die Gestaltung von Geschäfts- und Kooperationsmodellen,

die Implementierung sinnvoller Anreizsysteme und Regulierungen für nachhaltiges Verkehrsverhalten, die Regelung von Entscheidungs-, Finanzierungs- und Ordnungsprinzipien im Verkehrsmarkt, die Bildung von Netzwerken, die Aufstellung von Verhaltensmodellen und Planungstools etc. Dies hat technologische, soziologische, ökonomische, politische und sogar philosophische Dimensionen. Dahinter steckt, wie oben schon erwähnt, die grundsätzliche Frage, wie viel des gewohnten Lebensstils die Gesellschaft und der Einzelne aufzugeben bereit ist.

Infrastrukturen für Antriebe der Zukunft: Die verfügbaren technischen Lösungen für emissionsarme oder -freie Antriebe sind breiter gestreut denn je und eine eindeutige Alternative zu fossilen Kraftstoffen scheint sich nicht abzuzeichnen. Um die verschiedenen Vorteile der Antriebsarten je nach Fahrzweck und Anwendungsart sinnvoll nutzen zu können, werden die Betankungsinfrastrukturen diversifiziert werden. Betrachtet man die aktuell eher schleppende Ausbreitung von Gastankstellen trotz massiver steuerlicher Förderung dieses Kraftstoffs, zeigen sich die Hemmnisse bei der Markteinführung neuer Technologien deutlich. Eine Herausforderung für die zukünftige Forschung ist aus unserer Sicht entsprechend die Ausarbeitung kostengünstiger Marktpenetrationsstrategien für zentrale Infrastrukturen zum Betrieb der Antriebe der Zukunft.

Speziell bei der Elektromobilität deutet sich eine mögliche Dualität zwischen Ladestationen einerseits und Batteriewechselsystemen andererseits an. Beide Verfahren sind mit technischen Schwierigkeiten verbunden. In jedem Fall müssen die Infrastrukturen für die Antriebe der Zukunft intelligent sein. Im Fall der Elektromobilität bedeutet dies einen Informationsfluss zwischen Auto und Energieversorger. Insbesondere beim Aufbau von »Vehicle-to-Grid«-Netzen werden hier hohe Anforderungen an Datenschnittstellen und Datensicherheit gestellt. Eng verbunden mit intelligenten Netzen sind innovative Geschäftsmodelle. Diese können neben den Stromkunden und Energieversorgern auch öffentliche Verkehrsunternehmen, Arbeitgeber, Geschäfte, Freizeitveranstalter etc. umfassen. Einzubetten sind diese Modelle in eine zukunftsfähige Verkehrsmarktordnung und in ganzheitliche Mobilitätskonzepte. Entsprechend erfordert auch das nutzergerechte Design von Geschäftsmodellen neuer Infrastrukturen interdisziplinäre Ansätze gemäß der Schlussfolgerungen durch die Themenkoordinatoren.

Grüne und effiziente Logistik: Das Thema saubere Warenketten steht sowohl auf europäischer Ebene mit dem »Greening of Transport Package« der EU-Kommission als auch national mit dem Masterplan Güterverkehr und Logistik auf den Forschungsagenden. Die wirtschaftspolitischen Rahmenbedingungen belohnen jedoch nicht immer die konsequente Anwendung verfügbarer Instrumente zum Klima- und Umweltschutz in der Logistik. Verfügbare IT-Lösungen sind teilweise noch zu unsicher und der Trend zeigt weiter in Rich-

tung Globalisierung. Die Logistik wird jedoch vor enormen Veränderungen stehen, was Kostenstrukturen, Rahmenbedingungen und Technologien betrifft. Für die Erreichung der gesteckten Klimaziele ist nach Annahmen der Experten der Übergang zu regionalen Wirtschaftskreisläufen einerseits und der Aufbau stabiler internationaler Kooperations-Netzwerke andererseits notwendig. In wichtigen Knotenpunkten werden zudem Kapazitätsfragen von alles entscheidender Wichtigkeit sein - insbesondere für die Verfügbarkeit der Bahn als umweltfreundliche Alternative. Wie die Strukturen und Rahmenbedingungen eines zukunftsfähigen und ökologisch vertretbaren Transport- und Logistiksektors aussehen werden, ist eine der wichtigsten und ergebnisoffensten Fragen in der Mobilitätsforschung. Diese kann nur interdisziplinär und ganzheitlich befriedigend gelöst werden. Die aufgesetzten Forschungsprogramme - auch jene des BMBF - bieten hier aus Sicht der Themenkoordinatoren eine gute Ausgangsbasis für die weitere Beschäftigung mit dem Zukunftsfeld.

4.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick

Die folgende **Tabelle 4.3** gibt einen Überblick über die Entwicklung der Zukunftsthemen im BMBF-Foresight-Prozess. **Themen nach 1. Recherche** sind die Themen aus den Prozessen der Fachreferate (sofern sie nicht aussortiert wurden, weil sie bereits auf der Forschungsagenda stehen) und aus der ersten Literaturanalyse. **Themen nach 1. Workshop** sind diejenigen Themen, die nach dem 1. Workshop besonders verfolgt werden sollten. **Themen Online-Befragung** sind in die Online-Befragung eingegangen, bedeuteten also eine weitere Zusammenfassung der Zwischenergebnisse, die in der Befragung bewertet wurden. Und die **Themen nach Kriterienfilter** sind bereits »Zukunftsthemen«, die in der letzten Phase des Prozesses untersucht wurden. Sie sind in der Regel sehr ähnlich den am Ende des BMBF-Foresight-Prozesses vorgeschlagenen Zukunftsthemen (siehe erste Tabelle dieses Kapitels). Durch letzte Recherchen und Experteninterviews sind jedoch noch einige Zukunftsthemen modifiziert worden.

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Effiziente Fahrzeug- und Antriebstechnologien	**Kernbereich**	**Antriebstechnologie**	Alternative Fahrzeug- und Antriebskonzepte
hybrid, rein elektrische Antriebe, Brennstoffzelle	Reduzierung und Lenkung des Verkehrs durch Mobilitäts- und Logistikkonzepte	Weiterentwicklung klassischer Verbrennungsmotoren	Intermodalität und Interoperabilität (Mobilität + IuK)
neue Materialien	verkehrsreduzierende Siedlungs- und Produktionskonzepte	Wasserstoff und Brennstoffzelle	Brennstoffzellen
Energie- und Kosteneffizienz		Rein elektrische Antriebe	Elektromobilität
neue Konstruktionen		Hybride Antriebskonzepte	Weiterentwicklung klassischer Verbrennungsmotoren
		Alternative Antriebskonzepte	
Alternative Kraftstoffe	**Schnittstellen**	**Kraftstoffe und Versorgungsinfrastrukturen**	
Produktionsverfahren	Energieeffizienz	Synthetische Kraftstoffe	
Verfügbarkeit	netzgekoppelte Hybridfahrzeuge	Wasserstoff	
Speicherung		Elektrizität für Fahrzeugantriebe	
Transport von Kraftstoffen		**Fahrzeugtechnik und -design**	
Wirkungsgrad		Abgasminderungstechnologien	
alternative Energien		Autonome Assistenz- und Diagnosesysteme	
Geräuschminderung an Fahrzeugen und Infrastrukturen		Rechtliche Aspekte autonomer Systeme	
fahrzeugseitig		Neue Materialien und Konstruktionsformen	
infrastrukturseitig		Personalisierte Fahrzeuge	
innenmotorische Maßnahmen			
aerodynamische Bauweisen			

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
		Intelligente Verkehrsinfrastruktursys-teme	
		Fahrzeug-Fahrzeug- und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation	
Rad-Schiene und Rad-Straßen Konzepte		Intelligente Verkehrszeichen	
Sichere Fahrzeuge und Infrastrukturen		Echtzeit-Prognosen des Verkehrsgeschehens	
intelligente Verkehrsinfrastruktur		Stau- und Kapazitätsmanagement	
Fahrerassistenzsysteme		Bewertung und Antworten auf systemische Risiken im Verkehr	
Verkehrssicherheit		Nachhaltigkeit in Planung und Betrieb von Verkehrsprojekten	
Verkehrsmanagement		Interoperabilität und Intermodalität der Systeme	
Kommunikationssysteme		Regulatorische Aspekte des Infrastrukturbe-triebs	
Verkehrs- und Mobilitätsmanagement durch Telematik		**Mobilitätsmanagement**	
Entschärfung der Engpasslagen		Mobilitätsverhalten und Zeitwahrnehmung	
Vernetzung von Informationen		Neue Formen der Autonutzung	
intermodale Vernetzung		Förderung des nichtmotorisierten Verkehrs	
dynamische Filterung		Ressourceneffiziente Raumplanung	
		Barrierefreie Mobilität für spezielle Gruppen	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Effiziente Logistik		**Effiziente Logistik**	
neue Versorungsprozesse		Modellierung logistischer Prozesse	
Unterstützung der Netzwerke		Neue Technologien in Material- und Informationsfluss	
neue Technologien in Material- und Informationsfluss		Regionale Produktions- und Dienstleistungsstrukturen	
Planungssysteme		Innovatives Kapazitätsmanagement	
		Sicherheit im Warenverkehr	
		Sonstige	
		Visionäre Verkehrssysteme	
		Entwicklung städtischer Transportsysteme	
		Konzepte für den Personenfernverkehr	
		Gütertransportsysteme	
		Intermodale Konzepte	

Tabelle 4.3: Entstehung der Zukunftsthemen Mobilität – Zwischenstände

4.4 Bezug zu anderen Zukunftsthemen

Eine wichtige Verbindung zur Mobilität besteht naturgemäß im Bereich Energiesysteme. Mobilität ist dabei integraler Bestandteil des Zukunftsfeldes **Energiekonzert**. Hier ist v. a., so die Analyse im Foresight-Prozess, die Frage des mobilen oder stationären Einsatzes knapper erneuerbarer Energien im Gesamtzusammenhang zu klären. Forschungspotenzial besteht außerdem in der Frage der Einbindung der Mobilität in regionale, autarke Energieversorgungssysteme. Bei Produktion und Nutzung von Verkehrsmitteln besteht ferner eine wichtige Verbindung zum Forschungsgebiet Energieeffizienz. Schließlich spielt aus Sicht der Verfasser der Einsatz hybrider oder rein elektrischer Fahrzeuge als Energiespeicher in Stromnetzen über das »Vehicle-to-Grid«-Konzept möglicherweise eine weitere wichtige Rolle für das Design nachhaltiger Energiesysteme.

Mobilität selbst und die Versorgung der Fahrzeuge mit Energie benötigt Infrastrukturen, welche wiederum die Gestalt unserer Lebensräume entscheidend prägen. Wie die Lebensstile der Menschen wird auch deren Mobilitätsverhalten in Zukunft wesentlich individueller sein als in der Vergangenheit. Verkehrs- und Versorgungsinfrastrukturen müssen daher einerseits flexibel an Veränderungen anpassbar sein und andererseits den Bedürfnissen heterogener Nutzergruppen und diverser Technologien gerecht werden. Es besteht hier ein enger Zusammenhang zum Zukunftsfeld **Lebensräume der Zukunft**. Wichtige Konzepte sind zum einen »Governance«-Strukturen, also Planungs-, Entscheidungs- und Betreibermodelle, welche flexibel auf die mitunter raschen Veränderungen der Rahmenbedingungen reagieren können, zum anderen flexible, reversible und/oder dezentrale Infrastrukturlösungen, welche diese Anpassung unterstützen und kostengünstig möglich machen.

Für neue, leichte Fahrzeuge im Straßen- und Luftverkehr wird die **Materialforschung** bei der Entwicklung neuer, hochfester und sicherer Verbundwerkstoffe, aber auch für die Batterieforschung wichtige Impulse geben. Neue Produktionsverfahren, mithin das Zukunftsfeld neuen Zuschnitts »**Produzieren-Konsumieren2.0**«, sind ferner entscheidend, um die Kosten der Fahrzeugherstellung zu begrenzen, aber auch zur Erarbeitung von Recycling- und Substitutionsstrategien für komplexe Verbundwerkstoffe und seltene Rohstoffe. Der Bereich der **Nanotechnologien** zeigt Wege auf zu besonders aerodynamischen Oberflächen oder zur gezielten Beeinflussung der Eigenschaften von Verbrennungskraftstoffen. **Optische Technologien** spielen schließlich bei der dreidimensionalen Echtzeitmessung von Strömungsfeldern bei der Optimierung der Aerodynamik und Fahrzeugen eine nennenswerte Rolle.

Wegen der enormen Bedeutung von IKT-Systemen für vernetzte Fahrzeuge und intelligente Infrastrukturen, Verkehrsleit- und Informationssysteme sowie für

mobile, orts- und situationssensitive Dienste, besteht eine wichtige Verbindung zu den **Informationswissenschaften** wie auch der Kognitionswissenschaft.

Insbesondere im Hinblick auf die Tätigkeit von Piloten und auf mobilitätseingeschränkte Verkehrsteilnehmer wird eine starke Verbindung zu den **Neurowissenschaften** gesehen. Wesentlich ist hier das Design von Mensch-Maschine-Schnittstellen (»Human-Machine-Interfaces«, HMI) und damit der **Mensch-Technik-Kooperation**. Ferner entstehen wegen des demografischen Wandels auch wichtige Verbindungen zur **Alternsforschung**. Bei der weiteren Analyse der gesundheitlichen Auswirkungen von Verkehrstechnologien und externen Effekten sowie der Folgen von mobilitätsbeeinflussenden Maßnahmen auf Lebens- und Wohnstile kommt dem gesamten Bereich der **Gesundheitsforschung** ein wichtiger Stellenwert zu. Dies gilt auch beim Design verursachergerechter Preis- und Gebührenmodelle im Verkehr, bei dem Verbindungen zwischen Haftpflichtversicherungen und Krankenkassen etabliert werden müssen und nach der Implementierung die Wirkung der Preissysteme auf die Gesundheitskosten analysiert werden muss.

Themenkoordination:
Dr. Claus Doll, ISI (claus.doll@isi.fraunhofer.de) und
Thorsten Rogowski, IAO (thorsten.rogowski@iao.fraunhofer.de)

5 Energie

Eine Verdoppelung der Energienachfrage bei einer gleichzeitig erforderlichen Halbierung der Treibhausgasemissionen bis Mitte dieses Jahrhunderts sowie steigende Preise für Erdöl und Erdgas sind die globalen Herausforderungen, denen sich die Energieforschung stellen muss. »Neue effiziente und umweltfreundliche Technologien sind für die sichere, wirtschaftliche und umweltfreundliche Energieversorgung unverzichtbar. Die Bundesregierung unterstützt daher die Förderung von Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien« (Bundesbericht Forschung 2006).

Als langfristiges Ziel steht dabei im Vordergrund, durch Sicherung und Erweiterung der technologischen Optionen die Reaktionsfähigkeit und Flexibilität der Energieversorgung zu verbessern.

5.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Energie

Neue Technologien für regenerative Energien
Neue Technologien für Photovoltaik
Solarthermische Stromerzeugung
Energetische Biomassenutzung der 2. Generation
Neue Technologien für elektrische Netze und Speicher
global link
smart grid
Speicher für thermische Energie
Speicher für elektrische Energie
Energieeffiziente Anwendungstechniken
Elektrofahrzeuge mit großer Reichweite
Energieeffiziente Beleuchtung
Energieeffiziente Industrieprozesse
Nutzung von Abwärme
Green IT
Verhaltensbeeinflussung bei Nutzern und Investoren im Hinblick auf Energieeffizienz
Neue Werkstoffe und Materialien zur Steigerung der Energieeffizienz
Nanotechnologie für energietechnische Anwendungen
Hochtemperaturwerkstoffe für energietechnische Anwendungen
Verbundwerkstoffe und Metallschäume zur Senkung des Energiebedarfs von Fahr- und Flugzeugen
Neue Katalysematerialien
Neue Membrane
Wasserstoff und Brennstoffzellen
Brennstoffzellen-Komponenten
Brennstoffzellen-Systeme
Wasserstofftechnologie-Komponenten

Optimierung der Energieeffizienz und der Energiesysteme durch Informations- und Kommunikationstechniken
Optimierung der Anlagenauslegung für einen energieeffizienten Betrieb
Optimierung des Anlagenbetriebs in Richtung Energieeffizienz

Tabelle 5.1: Identifizierte Zukunftsthemen Energie im Überblick

Die Auswahl der Zukunftsthemen in der **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** deutet auf eine Präferenz für einen Übergang von einer auf fossilen und nuklearen Brennstoffen basierten Energiewirtschaft hin zu einer auf erneuerbare Energieträger und Energieeffizienz setzende. Dieser Schwerpunkt kristallisierte sich während des Foresight-Prozesses heraus, der am Anfang bewusst für alle Pfade offen angelegt war.

5.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Energie

Ausgangspunkt: Die Ergebnisse des Referenzszenarios im »World Energy Outlook« der Internationalen Energieagentur vom November 2008 lassen ein schnelles, entschlossenes und international abgestimmtes Handeln ratsam erscheinen: Das Wirtschaftswachstum der Schwellenländer, insbesondere Chinas und Indiens, und die dort stark zum Einsatz kommende Kohle wird dazu beitragen, dass die CO_2-Emissionen im Jahr 2030 im Referenzszenario auf etwa 40 Gigatonnen ansteigen werden. Dies entspricht einer Verdoppelung des Wertes von 1990 und würde zu einer Erhöhung der globalen Temperatur bis zum Ende des Jahrhunderts um sechs Grad Celsius führen.

Eine Abschwächung dieses möglichen Temperaturanstiegs und die Sicherstellung einer ausreichenden Energieversorgung ruft alle heute bekannten Maßnahmen der Energietechnik auf den Plan, insbesondere eine rationelle Energienutzung und den Einsatz erneuerbarer Energien. Dies zeigen nahezu alle Studien, die sich mit einer zukünftigen Energieversorgung beschäftigen. Auch der Workshop in Hamburg und die Experteninterviews im Rahmen dieser Studie kamen zum Ergebnis, dass (nahezu) alle Technologien, die einen Beitrag zur Deckung des Energiebedarfs bzw. zur Senkung der CO_2-Emissionen liefern können, benötigt werden.

Betrachtet werden sollte die gesamte Kette von der Exploration und Förderung fossiler Brennstoffe über die zentrale und dezentrale Umwandlung fossiler und nicht-fossiler Energieträger in End- und Nutzenergie und deren Transport, Verteilung und Speicherung bis zur effizienten Nutzung in Industrie, Dienstleistungssektor, Haushalten und Verkehr sowie die Möglichkeiten der Substitution von Energie. Die energiespezifische Forschung findet überwiegend in Großforschungseinrichtungen, an Universitätsinstituten und bei Anlagenherstellern statt, kaum bei Energieversorgungsunternehmen oder Anwendern. Wesentlich beeinflusst werden die Entwicklungen in diesem Gebiet von Forschungsergeb-

nissen aus der Grundlagenforschung, den Materialwissenschaften, der Informations- und Kommunikationstechnik etc. Aufgrund der insbesondere im Energieumwandlungsbereich im Vergleich zu anderen Wirtschaftszweigen langen Nutzungsdauer und hohen Investitionskosten verläuft der Innovationszyklus relativ langsam. Im Folgenden wird nicht das gesamte Forschungsgebiet beschrieben, sondern nur jene Grundlagen- und Technologiefelder, die auch in 15 bis 20 Jahren noch einen relevanten Forschungsbedarf erwarten lassen.

Start des Prozesses

Am Anfang des Suchprozesses standen elf Startthemen, die im Folgenden näher beschrieben werden. Die Beschreibung diente als Vorlage für die Diskussionen und Einschätzungen auf dem ersten Workshop im November 2007 in Berlin.

Brennstoffzellen: Brennstoffzellen bieten in einer breiten Leistungsklasse interessante Perspektiven für eine effiziente Energieumwandlung. 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. Für Wasserstoff 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 Diesel als Übergangstechnologie zu nutzen. Entwicklung von Brennstoffzellen, die sich für Synthesegas (H2 + CO) eignen, Entwicklung »reversibler« Brennstoffzellen/ Elektrolyseur-Systeme sowie zur Weiterentwicklung der Brennstoffzellen-Systemtechnik zur Integration in Versorgungsstrukturen.

Photovoltaik: Die direkte Umwandlung von Sonnenenergie in Strom mithilfe der Photovoltaik kann langfristig einen bedeutenden Beitrag zur nachhaltigen Deckung des weltweiten Energiebedarfs leisten. Hierzu ist jedoch vor allem eine deutliche Reduktion der Kosten erforderlich. Forschungsbedarf wird mittel- bis langfristig für Solarzellen mit neuen Materialien gesehen, wie z. B. Galliumarsenid (GaAs), Cadmiumtellurid (CdTe) oder Kupfer-Indium-Diselenid (CuInSe2), bei Tandem- oder Stapelzellen, die ein breiteres Strahlungsspektrum nutzen können, indem unterschiedliche Halbleitermaterialien, die für verschiedene Spektralbereiche geeignet sind, übereinander angeordnet werden oder MIS-Inver-sionsschicht-Zellen, bei denen das innere elektrische Feld nicht durch ei-

nen p-n-Übergang erzeugt wird, sondern durch den Übergang einer dünnen Oxidschicht zu einem Halbleiter.

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

»Clean Coal«: Heute stammen 60 Prozent der weltweit erzeugten Elektrizität aus fossilen Energieträgern. Dieser Anteil wird bis zum Jahr 2020 voraussichtlich noch weiter steigen. Die weltweit noch in großen Mengen preiswert förderbare Kohle macht diese zu einem lukrativen Energieträger. Aufgrund ihres hohen Kohlenstoffgehalts ist ihre Nutzung nicht mit CO_2-Minderungsstrategien kompatibel. Nur mit hohen Wirkungsgraden und der Abscheidung und Speicherung des CO_2 ist dies nachhaltig möglich. Mittelfristig könnten Kombi-Technologien auf Kohlebasis zum Einsatz kommen, wie Kombiprozesse mit Kohlevergasung (IGCC), mit Druckwirbelschichtfeuerung und teilweiser Vergasung (DWSF der zweiten Generation) sowie mit externer Feuerung (EFCC). Langfristig aussichtsreich für eine weitere Steigerung des Wirkungsgrades erscheinen von den zahlreich vorliegenden Konzepten die so genannten Hybridprozesse. Das sind Gasturbinen-Kombi-Kraftwerke (GTCC oder GuD) mit vorgeschalteten Hochdruck-Hochtemperatur-Brennstoffzellen (HDTBSZ) und Kombinationen von Kohlevergasung, HDTBSZ und GuD (IGCC mit BSZ, IGFC). Zusätzlich sind Verfahren erforderlich, mit denen das erzeugte CO_2 möglichst vollständig abgeschieden sowie verwertet oder langfristig gespeichert werden kann. Auch wenn die ersten kommerziellen Anlagen etwa im Jahr 2020 verfügbar sein sollen, wird danach noch ein hoher Forschungsbedarf gesehen.

Kernspaltung: Aufgrund der Endlichkeit fossiler Brennstoffe und der CO2-Freiheit der Stromerzeugung aus nuklearen Brennstoffen könnte die Kernspaltung eine Option darstellen. Da aber auch das preiswert zu gewinnende Uran nur begrenzt verfügbar ist, müsste für eine weltweite Renaissance der Kernenergie die Brütertechnologie mit dem dazugehörigen nuklearen Brennstoffkreislauf weiterentwickelt werden. Darüber hinaus müsste die Technologie inhärent sicher gemacht, die Endlagerfrage eindeutig geklärt und ein langfristig tragfähiges Konzept zum Schutz des gesamten Systems – von der Aufbereitung und Wiederaufbereitung über Transport, Nutzung und Endlagerung – vor terroristischen Angriffen entwickelt werden.

Fusionsforschung: Fusion, d. h. die Verschmelzung von Atomkernen, ist jener Prozess, mit dem die Sonne und Sterne ihre Energie erzeugen. Die Fusionsforschungsarbeiten in Deutschland, die ein integraler Bestandteil des europäischen Fusionsforschungsprogramms sind, reichen von sehr grundlegenden Untersuchungen der Plasmaphysik bis hin zur Realisierung technologisch äußerst anspruchsvoller Komponenten für Fusionsanlagen und dem Aufbau von Großexperimenten. An die Fusionsenergie werden viele Hoffnungen für einen wesentlichen Beitrag zur Lösung der Energiefrage geknüpft.

Elektrochemie: 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 noch ein sehr hoher Forschungsbedarf, der auch auf mittlere bis lange Sicht weiter bestehen wird.

Neue Werkstoffe und Materialien zur Steigerung der Energieeffizienz: Höhere Temperaturen bedeuten bei den meisten Energieumwandlungsverfahren eine Steigerung des Umwandlungswirkungsgrades, z. B. bei Dampf- und Gasturbinenprozessen. Hochwarmfeste Materialien wie z. B. keramische Werkstoffe bieten hier noch erhebliche unausgeschöpfte Potenziale.

Bei bewegten Teilen bedeutet eine Gewichtsreduktion einen geringeren Energieaufwand bei der Beschleunigung. Dies gilt insbesondere für den Verkehrssektor, aber auch bei bewegten Teilen in stationären Anwendungen. Da geringere Massen zudem weniger kinetische Energie speichern, können die mechanischen Konstruktionselemente häufig für geringere Kräfte gestaltet werden, was zu einer weiteren Gewichtsreduktion führt. Die Gewichtsreduktion kann auf vielfältige Weise erreicht werden, z. B. durch sehr leichte, hochfeste oder geschäumte Materialien oder Verbundwerkstoffe.

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 nichtmetallischen 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 Materialien, die zur Speicherung thermischer Energie ihre latente Energie nutzen, können zum Durchbruch bei der Nutzung von Solar- oder Abwärme führen. Membranen ermöglichen die Trennung von Stoffen mit einem deutlich niedrigeren Energieaufwand als thermische Trennverfahren. Mit Materialien, die für Strom leitend sind, aber nicht für Wärme, 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.

Nanotechnologie – Beiträge für den Energiesektor: Die Nanotechnologie kann als eine Basisinnovation bedeutende Beiträge zu einer effizienten zukünftigen Energieversorgung und -nutzung liefern. Nanotechnologie kann nicht exakt abgegrenzt werden und hat ihre wissenschaftlichen Grundlagen im Überschneidungsbereich von Physik, Chemie, Biologie und Feldern der Elektrotechnik und dem Maschinenbau. Sie beschreibt die Herstellung, Untersuchung und Anwendung von Strukturen, molekularen Materialien, inneren Grenz- und Oberflächen mit mindestens einer Dimension unterhalb von 100 Nanometern. Entscheidend ist dabei, dass sich allein aus der Nanoskaligkeit der Systemkomponenten neue Produkte und Anwendungsoptionen ergeben. Die Forschung und die daraus resultierenden Anwendungen der Nanotechnologie befinden sich derzeit noch im Anfangsstadium. In der Energietechnik können Nanotechnologien neue Impulse geben bzw. gänzlich neue Ansätze bei der Speicherung und Umwandlung von Energie liefern, z. B. bei Brennstoffzellen, Batterien, Solarzellen, Leuchtdioden, thermoelektrischen Schichten etc. Darüber hinaus hat die Nanotechnologie Einfluss auf den Energiebedarf und die Umweltauswirkungen bei der Herstellung und Nutzung von Produkten.

Biotechnologie zur Senkung des Energieverbrauchs: 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, wie z. B. die Chemie-, die 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. Mithilfe biotechnologischer Verfahren ist die Produktion von Biomasse für eine stoffliche und energetische Nutzung möglich. 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 schneller wirtschaftlich machen.

Informations- und Kommunikationstechnologien, Mess-Steuer-Regel-Technik und mathematische Verfahren: Viele Prozesse 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 Turbinenschaufeln, Verbrennungsprozessen in Verbrennungsmotoren) oder die Online-Erfassung und Weiterleitung der Betriebsparameter nicht kostengünstig ermöglicht werden kann. Viele Fehlfunktionen und Fehlbedienungen können durch Automatisierung bzw. Fernüberwachung vermieden bzw. frühzeitig erkannt werden. Auch die Optimierung von Stromangebot und Nachfrage, z. B. bei »virtuellen Regelkraftwerken«, mithilfe dieser Technologien kann die ökonomische und ökologische Effizienz des gesamten Systems erhöhen.

Foresight-Workshop 2007

Von den Experten und Expertinnen des Workshops wurden neben den genannten weitere relevante Themen identifiziert und als besonders wichtig und zukunftsträchtig bewertet: »Energieanwendungstechniken« sowie »Energiesystemanalyse und -modellierung«. Als wichtig wurden auch »Energieumwandlung aus erneuerbaren Energiequellen« und »Energiespeicher« genannt. Als bereits gut etabliert wurden »Clean Coal« und die »Wasserstoff- und Brennstoffzellenforschung« eingeschätzt. Letztere wurden daher im weiteren Verlauf des BMBF-Foresight-Prozesses nicht weiter betrachtet. Als nicht relevant wurde die Kernenergieforschung von den Workshopteilnehmern und -teilnehmerinnen eingeschätzt. Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse des Workshops zeigt Tabelle 5.2.

Kernenergie
Kernfusion
Kernspaltung
neue Werkstoffe und Materialien
Photovoltaik
Nano-Technologie
Hochtemperaturwerkstoffe
Supraleitende Materialien
Superisolierende Materialien
Thermogeneratoren
IuK-Technologien, MSR-Technik und mathematische Verfahren
Anlagenauslegung
Anlagenbetrieb
Energiesysteme

Biotechnologie
Biomasse für Energiezwecke
Substitution chemischer Prozesse
Leistungselektronik
für Stromerzeugung
für Stromübertragung
für Stromnutzung
Elektrochemie
Brennstoffzellen
Elektrolyse (Wasserstoff, Metalle)
Batterien (Elektro-/ Hybridfahrzeuge, Lastmanagement)
clean coal
neue Kraftwerkstechniken
Carbon Capture and Storage (CCS)

Tabelle 5.2: Themen Energie im ersten Foresight-Workshop 2007

Monitoring-Interviews

Auf Grundlage der Experteneinschätzungen während des Workshops sowie der Anregungen und Bewertungen der anschließenden Experten- und Monitoring-Interviews musste entschieden werden, welche Themen vertieft bearbeitet werden sollten, weil sie den eingangs genannten Kriterien entsprechen. Entsprechend musste ausgewählt werden, welche Themen im Rahmen des Foresights zunächst nicht weiter ausgearbeitet werden sollen. Die folgenden Ausführungen dokumentieren den Entscheidungsprozess und das Ergebnis.

Konventionelle Kraftwerkstechniken (auf Basis fossiler Brennstoffe): Auf dem Workshop und in den Interviews wurde die Meinung vertreten, dass konventionelle Kraftwerkstechniken auch mittel- bis langfristig eine wichtige Rolle in der Energieversorgung spielen werden. Das Thema wird aber bereits stark beforscht, was auch weiterhin so sein sollte. Die Forschung zu »Carbon Capture and Storage« wird nach Einschätzung der Experten noch mittelfristig abgeschlossen werden können.

Kernenergie: Den Themen zur Kernspaltung wird aus Sicht deutscher und internationaler Experten zukünftig keine Relevanz beigemessen, da kein Unternehmen in Deutschland mehr auf diesem Gebiet arbeitet und somit Forschungsergebnisse nicht mehr zugunsten der deutschen Volkswirtschaft genutzt werden können. Die Meinung in der Bevölkerung wird als weiterhin ablehnend gegenüber der Kernenergienutzung eingestuft. International wird diese Technologie zwar weiterhin betrieben und auch einige Neuanlagen werden in Betrieb genommen werden; sie wird aber nur als Übergangstechnologie mit weiter abnehmender Bedeutung gesehen.

Ebenfalls kritisch wird die Forschung für die Kernfusion unter energiewirtschaftlichen Gesichtspunkten eingeschätzt. Ergebnisse aus der Forschung zur Kernfusion werden zu spät wirtschaftlich zur Verfügung stehen und die erneuerbaren Energien werden dann nicht mehr zu verdrängen sein. Da die Kernenergie auch unter Fachleuten sehr kontrovers diskutiert wird, wurde sie in den weiteren Umfragen aufgeführt, um nicht durch eine zu kleine Stichprobe zu wenig repräsentativen bzw. falschen Aussagen zu gelangen.

Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energieträger: Hierbei handelt es sich nach übereinstimmender Einschätzung der Experten um ein besonders wichtiges Forschungsthema, da erneuerbare Energieträger mittel- bis langfristig einen wesentlichen Beitrag zu einer nachhaltigen Deckung des weltweiten Energiebedarfs leisten müssen. Hingegen dürfte die Forschung zur Stromerzeugung mithilfe von Solarthermie und Geothermie in den nächsten 10 bis 15 Jahren abgeschlossen sein.

Stromnetze und Energiespeicher: Dieses Thema gewinnt mit zunehmender Verbreitung von Strom aus fluktuierenden Energieträgern und aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und solarthermischer Wärmenutzung an Bedeutung, so die einhellige Einschätzung der nationalen und internationalen Experten.

Energieeffiziente Anwendungstechniken: Als neues Forschungsthema im Forschungsfeld Energie wurde die Steigerung der Energieeffizienz von Energieanwendungstechniken identifiziert und mit der höchsten Punktzahl bewertet. Aus Sicht der Expertinnen und Experten finden diese Techniken unter Energieaspekten bisher noch deutlich zu wenig Beachtung in der Forschungsförderung, obwohl sie für die Lösung der anstehenden Herausforderungen eine herausragende Rolle spielen. So sollte z. B. die Substitution von thermischen Trennungs- und Syntheseverfahren mit hohem Energieeffizienzpotenzial ein zentrales Forschungsthema sein, ebenso wie thermoelektrische Anwendungen und Wärmetauscher, ORC-Technologien (Stromerzeu-gung aus Niedertemperaturwärme) sowie die Nutzung von Abwärme zur Kälteerzeugung.

Neue Materialien für Energietechnologien und Produkte: Wichtige Schnittstellen sind die Werkstoff- und Materialforschung sowie die Nanotechnologie für die Energietechnik, wobei wichtige Themen in der Zukunft bei Katalysematerialien, Materialien für Thermogeneratoren, für die Wasserstoffproduktion und neue Solarzellen sowie für Energiespeicher gesehen werden. Verstärkt sollte auch zum Thema Substitution energieintensiver Materialien durch organisch basierte Werkstoffe geforscht werden. Wie bisher werden auch in Zukunft hochtemperaturbeständige Werkstoffe, polymere Solarzellen und Leichtbau relevante Themen bleiben. Demgegenüber dürfte, so die Prog-

nose der Befragten, die Forschung an supraleitenden Materialien mittelfristig abgeschlossen sein.

Informations- und Kommunikationstechniken für einen effizienten Energieeinsatz: Ebenfalls werden aus dem Forschungsfeld IKT wichtige Impulse für den Bereich Energie erwartet. Diese Forschung wird weit über die bisherigen Arbeiten zum »intelligenten Haus« hinausgehen und die Abstimmung von Verbrauch und Erzeugung zur Optimierung des Gesamtsystems zum Ziel haben, zu dem zukünftig auch Elektrofahrzeuge gehören werden.

Energiesystemanalyse und -modellierung: 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. Aber auch neue methodische Erkenntnisse müssen berücksichtigt werden, insbesondere zu einem nicht-rationalen Entscheiderverhalten, bei Entscheidungen mit begrenzter Information und zu strategischem Verhalten. Beeinflusst wird dies zudem von sich ändernden Wertesystemen. Doch vor der Umsetzung solcher Modelle in die Praxis ist nach Auffassung der Befragten eine umfangreiche empirische Forschung nötig.

Wasserstoff und Brennstoffzellen: Kontrovers wird gesehen, ob mittel- bis langfristig noch Forschung zu Wasserstoff und Brennstoffzellen erforderlich sein wird oder nicht bereits vorher die wesentlichen Erkenntnisse vorliegen werden. Um hier eine breitere Basis für die Beurteilung zu erhalten, wurde das Thema in die Online-Befragung aufgenommen.

Nichtkonventionelle fossile Energieträger: Als nicht weiterverfolgungswürdig wird der Bereich der nichtkonventionellen fossilen Energieträger wie Gashydrate und Ölsande gesehen. Insbesondere Gashydrate bilden aus Expertensicht eine sehr große Energiequelle, aber sie kommen nicht in unseren Regionen vor. Außerdem kann ihre unsachgemäße Gewinnung schwerwiegende Auswirkungen auf das Klima haben, so die Begründung.

Energieeffiziente Produktionsmethoden mit Biotechnologien: Die Forschungsergebnisse aus der Biotechnologie werden ebenfalls wichtige Beiträge zum Energiebereich liefern, wie z. B. bei der Produktion, Umwandlung und Speicherung von biologischen Energieträgern sowie Abscheidung, Verwertung und Speicherung der Treibhausgase CO2 und CH4. Einschränkend wurde von den Befragten geäußert, dass Forschung und Einsatz von Gentechnik für Freiland-Energiepflanzen auf starke gesellschaftspolitisch bedingte Ablehnung stößt.

Online-Befragung

Im Zukunftsfeld Energie wurden in der Befragung aufgrund der Vorrecherchen und Expertengespräche neun Zukunftsthemen mit ihren jeweiligen Forschungsfragen (insgesamt 44) zur Diskussion gestellt (Tabelle 5.3).

Die Ergebnisse der Online-Befragung ergeben, dass mit Ausnahme des Themengebietes »Kernenergie« alle anderen Themengebiete als »wichtig« bis »sehr wichtig« eingestuft werden. Der starke Anstieg der Energieträgerpreise, die deutlichen Warnungen des IPCC vor den Folgen eines weiter beschleunigten Anstiegs der globalen Treibhausgasemissionen sowie die Störungen bei Kernkraftwerken in der Laufzeit der Studie, mögen diese Ergebnisse mit beeinflusst haben. Auf den vordersten Plätzen der Relevanzskala liegen dicht beieinander »Neue Technologien für regenerative Energien«, »Energieeffiziente Anwendungstechniken«, »Neue Technologien für elektrische Netze und Speicher« sowie »Neue Werkstoffe und Materialien zur Steigerung der Energieeffizienz«. Dicht dahinter werden »Wasserstoff und Brennstoffzellen« sowie »Optimierung der Energieeffizienz und der Energiesysteme durch IKT-Techniken» gesehen.

Auch Themen mit Energiebezug in anderen Forschungsfeldern werden als besonders relevant eingeschätzt. So wird der »Antriebstechnologie« im Feld »Mobilität« die zweithöchste Relevanz der ganzen Umfrage beigemessen. »Materialien mit anwendungsspezifischen Eigenschaften – Neue Energiewerkstoffe für die Energiesicherheit der Gesellschaft« und »Energie- und Ressourceneffizienz in der industriellen Produktion« sind jeweils die wichtigsten Bereiche in ihren jeweiligen Feldern »Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren» bzw. »Industrielle Produktionssysteme«.

Nahezu identisch wie in ihrer »Relevanz« werden die Themen von den im Durchschnitt etwa 200 Antwortenden im Forschungsfeld Energie auch als besonders »wichtige Forschungsthemen in 10 Jahren und später« und besonders »wichtig für die wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands« gesehen. Ohne ihren relativen Platz untereinander zu verändern, rutschen sie bezüglich des Kriteriums »Verbesserung der Lebensqualität« etwas in Richtung Mittelfeld. Auffällig ist die bei den anderen Themen nicht oder kaum feststellbare Tendenz zur mit sinkender Fachkenntnis abnehmenden »Wertschätzung« der Kernenergie.

Auch in anderen Forschungsfeldern werden energierelevante Themen für die Forschung auch in 10 und mehr Jahren von den Teilnehmer der Befragung sehr hoch bewertet: »Energie- und Ressourceneffizienz in der industriellen Produktion« landet z. B. auf Platz eins im Zukunftsfeld »Industrielle Produktionssysteme« und auf Platz zwei der Gesamtwertung dieses Kriteriums. Gleiches gilt für »Biotechnologie zur Bereitstellung von Energie« im Zukunftsfeld »Lebenswis-

senschaften und Biotechnologie«. Mit Abstand als am wichtigsten für die wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands wird »Energie- und Ressourceneffizienz in der industriellen Produktion« im Zukunftsfeld »Industrielle Produktionssysteme« gesehen.

Dass die Energieforschung sehr wichtig ist, aber ihrerseits nur wenige »wichtige Erkenntnisse für Wissenschaft und Technologie« bringt oder kaum ein »wichtiger Impulsgeber für andere Forschungsgebiete« ist, zeigen die Ergebnisse der Online-Erhebung: Als wichtig wird hier vor allem das Thema »Neue Werkstoffe und Materialien zur Steigerung der Energieeffizienz« erachtet, während alle anderen niedriger eingestuft wurden. Dies widerspricht etwas der starken Bewertung in den anderen Zukunftsfeldern, die exakt diese Impulse erwarten lassen.

Im Bereich der Energienachfrage sind die relevantesten Themen die »energieeffizienten Industrieprozesse«, die »Elektrofahrzeuge mit hinreichend großer Reichweite«, die »energieeffiziente Beleuchtung« (auch wenn diese energiewirtschaftlich eine viel kleinere Rolle spielt als weithin angenommen) und die »Nutzung von Nieder- und Mitteltemperaturabwärme«. Insbesondere letztere ist eine bislang unterschätzte Herausforderung, da diese Techniken nicht nur für die Nutzung industrieller Abwärme, sondern auch für eine bessere Nutzung von solarer Wärme und von Geothermie eingesetzt werden können. Das Thema Elektrofahrzeuge wird möglicherweise zurzeit überbewertet. Ähnlich wie vor wenigen Jahren bei den Brennstoffzellenfahrzeugen, heizen die Marketingabteilungen der großen Automobilkonzerne die öffentliche Wahrnehmung für dieses Thema an, während die Technik, vor allem die Batterietechnik, noch nicht die erforderliche Reife erlangt hat. Angesichts der besonderen Bedeutung des Autos für die Exportnation Deutschland und deren Arbeitsplätze, sollte der technologische Vorsprung der deutschen Automobilindustrie aber nicht aufs Spiel gesetzt und daher die Forschung auf diesem Gebiet forciert werden. Auch für die Begrenzung der CO_2 -Emissionen in den Industrieländern bzw. deren Zuwachs in den Schwellenländern könnte die Elektromobilität eine wichtige Rolle spielen, da sie aufgrund der Stromspeicher an Bord der Fahrzeuge eine bessere Integration erneuerbarer Energien in das Energiesystem zulässt.

Angesichts des Handlungsdrucks beim Thema Energie, mithin auch bei jenem des anthropogen verursachten Klimawandels, wird die Zeit der höchsten Forschungsintensität bezüglich nahezu aller Einzelaspekte überwiegend innerhalb der nächsten 10 Jahre gesehen. Einzige Ausnahme – und das ist nicht überraschend – ist die Fusionsforschung bzw. Kernfusion, bei der deutlich längere Zeiträume für die Forschung erwartet werden.

Dass in Anbetracht der Größe der Herausforderungen rein technische Lösungen allein nicht die notwendigen Potenziale aufweisen werden, sondern auch der Mensch dabei unterstützt werden muss, sein Verhalten zu ändern, wird auch

von den Teilnehmerinnen und Teilnehmern der Online-Befragung erwartet, die diese Einzelaspekte sehr hoch bewertet haben. Hier sind vor allem Soziologen und Psychologen gefragt, neue Ansätze zu entwickeln.

Zweite Welle Monitoring

Bei den Monitoring-Interviews der zweiten Welle wurden von den befragten internationalen Experten folgende Punkte in den Vordergrund gestellt:

- Eine Verbesserung der Effizienz von Forschung und Entwicklung für Energie und Technologie ist zur Steigerung des technischen Fortschritts erforderlich. Hinweise auf die Effizienzverbesserung von FuE liefert eine neue Studie (Jochem 2009). Darüber hinaus muss die Kooperation zwischen der akademischen Welt und der Industrie verbessert werden.
- Eine größere Flexibilität bei den Forschungsförderprogrammen würde es nach Einschätzung der internationalen Experten den Wissenschaftlern deutlich einfacher machen, auf neue Herausforderungen und neue Methoden zu reagieren. Die bisherigen Forschungsprogramme würden zu sehr die traditionellen Ansätze stärken.
- Als neue Schlüsselherausforderung, ohne deren Bewältigung die ehrgeizigen europäischen Ziele zur CO_2-Reduktion und zum Anteil erneuerbarer Energien am europäischen Strommix nicht zu halten sind, ist die Integration erneuerbarer Energien in das Stromnetz. Dies gilt sowohl regional als auch für das gesamte europäische Stromnetz und darüber hinaus. Hier spielt die Hochspannungs-Gleichstromübertragung eine ebenso wichtige Rolle wie »Smart Grids« und Stromspeichermöglichkeiten.
- Sehr oft wird die Marktdiffusion neuer Technologien durch vielfältige Hemmnisse behindert. Diese Hemmnisse sind Politikanalysten bekannt, aber meist nicht Forschern und Entwicklern von technischen Lösungen. Von einigen dieser Hemmnisse sollte das FuE-Personal jedoch frühzeitig wissen, um sie beim Design der Produkte bzw. Lösungen zu berücksichtigen, so die Empfehlung. Hochrechnungen der Kostenreduktionspotenziale aufgrund steigender Produktionsmengen sind ein Beispiel hierfür.

5.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick

Die folgende Tabelle 5.3 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Zukunftsthemen im BMBF-Foresight-Prozess. **Themen nach 1. Recherche** sind die Themen aus den Prozessen der Fachreferate (sofern sie nicht aussortiert wurden, weil sie bereits auf der Forschungsagenda stehen) und aus der ersten Literaturanalyse. **Themen nach 1. Workshop** sind diejenigen Themen, die nach dem 1. Workshop besonders verfolgt werden sollten. Die Tabelle 5.2 im vorangegangenen Abschnitt ist der auf dem Workshop bearbeitete Stand und

damit zwischen den Themen nach erster Recherche und den Themen nach dem ersten Workshop anzusiedeln. **Themen Online-Befragung** sind in die Online-Befragung eingegangen, bedeuteten also eine weitere Zusammenfassung der Zwischenergebnisse, die in der Befragung bewertet wurden. Und die **Themen nach Kriterienfilter** sind bereits »Zukunftsthemen«, die in der letzten Phase des Prozesses untersucht wurden. Sie sind in der Regel sehr ähnlich den am Ende des BMBF-Foresight-Prozesses vorgeschlagenen Zukunftsthemen (siehe erste Tabelle dieses Kapitels). Durch letzte Recherchen und Experteninterviews sind jedoch noch einige Zukunftsthemen modifiziert worden.

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Kernenergie	**Kernbereich**	**Kernenergie**	Photovoltaik
Kernfusion	Effizienzsteigerung bei der Energieumwandlung im Nachfragebereich	Kernspaltung - neue Reaktorgenerationen und -technologien	Speicher für elektrische Energie
Kernspaltung	Reduktion der Energienachfrage durch technische und organisatorische Maßnahmen	Kernspaltung - Brennstoff-Lebenslauf	Elektrofahrzeuge mit hinreichender Reichweite
	Regenerative Energieträger	Kernspaltung -Sicherheitskonzepte	Smart Grid
	Analyse und intelligente Verknüpfung des Energiesystems	Kernfusion	
Neue Werkstoffe und Materialien	Katalyse	**Neue Technologien für Regenerative Energien**	Solarthermische Stormerzeugung
Photovoltaik	Regelungstechnik	Neue Technologien für Photovoltaik	Nutzung von Nieder- und Mitteltemperatur-Abwärme
Nano-Technologie	**Schnittstellen**	Solarthermische Stromerzeugung	Energieeffizientes Verhalten
Hochtemperaturwerkstoffe	Thermoelektrische Materialien	Energetische Biomassenutzung der 2. Generation	
Supraleitende Materialien	Materialien für neue Konzepte von Solarzellen	Geothermie	**Energieeffiziente Industrieprozesse (zu PK2.0)**
Superisolierende Materialien	Energiemanagement durch IKT-Systeme	Neue Technologien zur Wasserkraftnutzung	
Thermogeneratoren	Nanotechnologie für Energiesysteme	**Neue Technologien für elektrische Netze und Speicher**	
IuK-Technologien, MSR-Technik und mathematische Verfahren	molekular gekoppelte Prozesse	global link	
Anlagenauslegung	CO_2-neutrale Wasserstoffproduktion	smart grid	
Anlagenbetrieb	Produktion, Umwandlung und Speicherung von biologischen Energieträgern	Speicher für thermische Energie	
Energiesysteme	Katalyse zur CO_2-Kreislaufführung	Speicher für elektrische Energie	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Biotechnologie	Fotovoltaik	Elektrofahrzeuge als Strom-Zwischenspeicher	
Biomasse für Energiezwecke	Optimierung von Fotosystemen für technische Zwecke	**Energieeffiziente Anwendungstechniken**	
Substitution chemischer Prozesse		Elektrofahrzeuge mit hinreichend großer Reichweite	
Leistungselektronik		Energieeffiziente Beleuchtung	
für Stromerzeugung		Energieeffiziente Industrieprozesse	
für Stromübertragung		Biochemische Verfahren	
für Stromnutzung		Katalytische Verfahren	
		Nutzung von Nieder- und Mitteltemperaturabwärme	
		Green IT	
		Verhaltensbeeinflussung bei Nutzern und Investoren im Hinblick auf Energieeffizienz	
Elektrochemie		**Wasserstoff und Brennstoffzellen**	
Brennstoffzellen		Brennstoffzellen-Komponenten	
Elektrolyse (Wasserstoff, Metalle)		Brennstoffzellen-Systeme	
Batterien (Elektro-/ Hybridfahrzeuge, Lastmanagement		Wasserstofftechnologie-Komponenten	
		Wasserstofftechnologie-Systeme	
clean coal		**Emissionsarme hocheffiziente Kraftwerke für fossile Brennstoffe**	
neue Kraftwerkstechniken		Neue Kraftwerkstechniken	
Carbon Capture and Storage (CCS)		Carbon Capture and Storage (CCS)	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Neue Werkstoffe und Materialien		**Neue Werkstoffe und Materialien zur Steigerung der Energieeffizienz**	
Photovoltaik		Nanotechnologie für energietechnische Anwendungen	
Nano-Technologie		Hochtemperaturwerkstoffe für energietechnische Anwendungen	
Hochtemperaturwerkstoffe		Verbundwerkstoffe und Metallschäume zur Senkung des Energiebedarfs von Fahr- und Flugzeugen	
Supraleitende Materialien		Supraleitende Materialien	
Superisolierende Materialien		Materialien für Thermogeneratoren	
Thermogeneratoren		Materialien für Thermo-Photovoltaik	
		Neue Katalysematerialien	
		Neue Membrane	

Tabelle 5.3: Entstehung der Zukunftsthemen Energie – Zwischenstände

5.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern

Das Feld Energie ist wie kaum ein anderes mit vielen anderen technischen Zukunftsfeldern – Umwelt, Mobilität, industrielle Produktionssysteme, Informations- und Kommunikationstechnologien, Biotechnologie, Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren u. a. – verknüpft. Hier wird Energie als »Rohstoff« benötigt oder hat durch die bei ihrer Umwandlung entstehenden »Abfälle« (wie CO_2) Auswirkungen auf Umwelt und Klima. Im Bereich der Forschung sind es aber weniger die Forschungsergebnisse aus dem Energiebereich, die in andere Themenbereiche eindringen und diese verändern. Vielmehr werden die Fortschritte der Energietechnik sehr oft in anderen Forschungsfeldern erarbeitet wie in der Material- und Werkstoffforschung einschließlich der Nanotechnik oder im Zuge der Fortschritte bei den Informations- und Kommunikationstechniken und teilweise auch der Biotechnologie. Daher kann, so die hier vertretene Schlussfolgerung, eine Forschungsförderung in diesen Bereichen wesentlich zu Erfolgen im Energiebereich beitragen. Beispiele hierfür wären Durchbrüche bei der Membran- und Katalysatorenforschung, die einen deutlichen Schub bei der Entwicklung von Brennstoffzellen oder Batteriesystemen verursachen könnten. Ebenso wichtig sind neue Materialien für Photovoltaik, Thermogeneratoren und Supraleiter sowie hochwarmfeste und korrosionsbeständige Materialien für Turbinen und Fusionsreaktoren. Katalysatoren, Membranen und Enzyme könnten den Energiebedarf vieler chemischer Prozesse deutlich senken und bei der Bereitstellung von Energie aus biologischen Prozessen helfen.

Ein enger Bezug besteht auch zum Zukunftsfeld neuen Zuschnitts »ProduzierenKonsumieren2.0«, in dem eine ganzheitliche Perspektive auf systemischen Wandel hin zu ressourceneffizienten Wertschöpfungsformen vorgeschlagen wird. Diese ist aus Sicht der Autoren geeignet, die zahlreichen genannten Einzelperspektiven der Forschung zu Energieerzeugung und Energienachfrage zu integrieren und auf diese Weise Effizienzsteigerungen in neuen Dimensionen zu erschließen. In ähnlicher Weise hat das Zukunftsfeld »Zukunftsfähige Lebensräume« Synergieeffekte auf die Energieforschung. Weitere wichtige Forschungsthemen existieren an den Schnittstellen zum Energiebereich mit den Feldern Optische Technologien (Energieübertragung), Industrielle Produktionsprozesse (produktintegrierter Umweltschutz), Infrastrukturen (integrierte Versorgungssysteme und -netze), Umweltschutz und Nachhaltigkeit (Materialeffizienz und Ressourcenschonung sowie »life cycle analysis«), Mobilität (Energieeffizienz und netzgekoppelte Hybridfahrzeuge), »Services Science« (dezentrale Energieversorgung und neue Geschäftsmodelle) sowie System- und Komplexitätsforschung (Modellierung und Simulation komplexer Energiesysteme).

Themenkoordination:
Dr. Harald Bradke, ISI (harald.bradke@isi.fraunhofer.de)

6 Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung

Das Zukunftsfeld Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung fokussiert sich auf technologische Innovationen und Themen der Umweltfolgen- und Risikoforschung, darunter die Anpassung an den Klimawandel (Adaptation).

6.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung

Ressourcen schonendes rohstoffeffizientes Wirtschaften
Sekundärrohstoffe in Primärstoffqualität
Landfills Mining
Nachhaltige, zukunftsfähige Landwirtschaft
Elimination der Einträge anthropogener Spurenstoffe
Bedarfsgerechte Düngung und Pflanzenschutz
Naturnahe Gewässerstrukturen
Technologien zur Anpassung an den Klimawandel
Antworten auf die veränderte Wasserverfügbarkeit
Antworten auf klimabedingte Naturkatastrophen
Bodenschutz und Erhalt der Biodiversität
Artenerhaltende Kultivierung von Böden
Folgenforschung der Biomassenutzung
Lärmbekämpfung und Luftreinhaltung
Unterdrückung der Schallbildung an der Quelle
Modelle, Bewertungs- und Beobachtungsmethoden
Modellierung von Umwelt-Phänomenen
Monitoring von Umweltzuständen

Tabelle 6.1: Identifizierte Zukunftsthemen Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung im Überblick

Tabelle 6.1: Identifizierte Zukunftsthemen Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung im Überblick zeigt einen Überblick über die Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung[14]. Die Herausforderungen der Zukunft bei **ressourcenschonendem und rohstoffeffizientem Wirtschaften** liegen darin, durch nachhaltigen Umgang mit Ressourcen die Rohstoffversorgung zu angemessenen Preisen in einer rasch wachsenden Weltwirtschaft zu sichern, während die Nachfrage auf den Weltmärkten vom technischen Wandel massiv umgestaltet wird. Dieses Zukunftsthema, welches in diesem Zuschnitt erst in den letzten Jahren an Aufmerksamkeit gewonnen hat, wird von vielen Experten in Analogie zur Energieeffizienz gesehen, welche

[14] Die dunkelgrau unterlegten Felder sind die Zukunftsthemen, die hellgrau hinterlegten einzelne, besonders wichtige Forschungsaufgaben.

thematisch aber wegen der Ölkrisen ca. 30 Jahre Vorsprung hat. Zur Ressourcenschonung gehören auch ein hochwertiges Recycling zur Erzeugung von Sekundärrohstoffen in Primärstoffqualität und »Landfills Mining«, die Nutzung von Deponien zur Gewinnung von Rohstoffen (siehe Tabelle 6.1).

Unter dem Zukunftsthema **nachhaltige, zukunftsfähige Landwirtschaft** werden verschiedene relevante Fragen adressiert, wie die Folgenforschung für die Biomassenutzung, bedarfsgerechte Düngung und Pflanzenschutz, die artenerhaltende Kultivierung von Böden (Artenschutz) sowie Fragen der naturnahen Gewässerstrukturen und der veränderten Wasserverfügbarkeit. Dies unterstreicht, dass die praktizierte Bewirtschaftung von Kulturlandschaften als nicht nachhaltig und zukunftsfähig eingeschätzt wird.

Mit den nicht für möglich gehaltenen Erfolgen bei der Eindämmung stofflicher Emissionen in der Luftreinhaltung sind die Schallemissionen zu einem ubiquitären Problemfeld aufgestiegen. Zwei Drittel der deutschen Bevölkerung fühlen sich durch Lärm belästigt (UBA 2008). Morbidität und vorzeitige Mortalität durch anhaltenden Lärmstress sind wissenschaftlich untersucht und belegt (Ising/ Maschke 2000). Von der **Unterdrückung der Schallbildung an der Quelle** werden zukünftig Antworten zur Minderung der Lärmemissionen erwartet.

Technologien und Modellierungsinstrumente für Umwelt- und Klimaphänomene werden gebraucht, um einerseits bei Modellen, die den Umweltzustand und die Wirkungen von Schadstoffen erfassen, potenzielle Risiken besser erkennen zu können sowie mit verbesserten Klimamodellen Antworten auf klimabedingte Naturkatastrophen zu erhalten. Andererseits dient die Verbesserung von Instrumenten der Technikbewertung auch der umweltfreundlichen Produkt-, Prozess- und Technikentwicklung, beispielsweise durch Elimination der Einträge anthropogener Spurenstoff.

6.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen

Start des Prozesses

Im Zuge des Experten-Workshops zu Beginn des Prozesses, der Experteninterviews, des Monitorings und des im laufenden Prozess im Zukunftsfeld gewonnenen Know-hows wurde die Vision eines zukunftsorientierten Forschungsportfolios entworfen. Dabei wurde die gesamte Recherche bewusst breit angelegt.

In einer umfangreichen Durchsicht früherer und laufender Umweltforschungsprogramme seit dem Jahr 1984, der Analyse aktueller Umweltproblemfelder, der Sichtung der Literatur und Einbeziehung von Strategiepapieren wie z. B. der Hightech-Strategie für Deutschland oder der »The Raw Materials Initiative« der

EU wurde ein erstes Set von Startthesen im Bereich Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung erstellt.

Foresight-Workshop 2007

Während des Workshops zum Foresight-Prozess im November 2007 wurden diese Themen mit den teilnehmenden nationalen Fachleuten diskutiert und ergänzt (vgl. Tabelle 6.2).

Monitoring-Panel

In Tiefeninterviews bei der US Environmental Protection Agency (EPA) und dem japanischen National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) wurden die Themen auch mit hochrangigen internationalen Experten (Monitoring-Panel) erörtert. In wesentlichen Teilen deckten sich deren Ansichten mit der skizzierten nationalen Sichtweise zu den adressierten Themen. Vor allem infolge des US-EPA-Interviews, in welchem der Interviewpartner auf den wirtschaftlichen Nutzen der Umwelt, z. B. durch Reinigungsleistungen von Flüssen, einging, kam als potenzielles Zukunftsthema noch »Modelle, Bewertungs- und Beobachtungsmethoden« hinzu. Aus den Ergebnissen der durch FhG ISI und IAO durchgeführten Bibliometrie ergaben sich keine neuen Themen.

Materialeffizienz und Ressourcenschonung
Recycling
Abfallvermeidung/-entsorgung
Materialeffiziente Produktionstechniken
Bionischer Leichtbau
Materialeffiziente Produkte
Miniaturisierung durch Mikro- und Nanotechniken
Biomassenutzung
Klimaschutz
Lärmschutz
Entstehung von Schall
Schallausbreitung
Aktive Dämpfung und Löschung an der Quelle
Schallschutz
Luftreinhaltung
Sommerliche Ozonperioden
Feinstaubbelastung
Stationäre Emissionsquellen in Gebäuden
Gewässerschutz
Belastungen von Abwasser, Gewässern und Trinkwasser mit anthropogenen Spurenstoffen
Dezentrale Wasserver- und Abwasserentsorgungssysteme
Nachhaltiges Management von Wasserressourcen

Produktionsintegrierte Umwelttechnik (Produktions- und Fertigungstechnik)
Materialeffizienz
Bionik
Nutzung nachwachsender Rohstoffe
Integrierte Produktpolitik
Umweltfreundliche Produkte
Nachhaltige Produkt- und Nutzungskonzepte
Neue Nutzungsformen, wie Contracting, Sharing, Pooling und Leasing etc.
Altlasten und Bodenschutz
Beseitigung von Altlasten
In-situ Sanierungstechnologien
Vermeidung von Schadstoffeinträgen in Böden und Gewässer durch die Landwirtschaft
Rückgewinnung von Wertstoffen aus Deponien

Tabelle 6.2: Themen Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung im ersten Foresight-Workshop 2007

Ergebnisse der Online-Befragung

Aus den Ergebnissen des Experten-Workshops 2007, den Experteninterviews und weiteren internationalen Recherchen wurden die Themengebiete festgelegt, die in die Online-Befragung eingingen (**Tabelle 6.3**).

Online-Befragung

In der Online-Befragung fällt die Relevanz des **Ressourcenschonenden und rohstoffeffizienten Wirtschaftens** besonders hoch aus, die Bedeutung der unterlegten Forschungsaufgaben wird dagegen als weniger wichtig beurteilt. Den höchsten Mittelwert erzielt hierbei die Bereitstellung von Sekundärrohstoffen in Primärstoffqualität. Dagegen fallen die Themengebiete Eco-effiziente Produktion sowie Produkte der Zukunft, die ebenfalls Teilaspekte des hier betrachteten Gebietes enthalten, in der Relevanzbeurteilung ab. Hier wurden offenbar nicht alle bestimmenden Forschungsaufgaben in der Befragung aufgeführt bzw. nicht trennscharf und umfassend dargestellt. Beim ITAS-Projekt Roadmap Umwelttechnologie 2020, in dem wegen des auf Umwelttechnologien eingeschränkten Analyseumfangs Forschungsaufgaben in größerer Breite und Detailtiefe abgefragt werden konnten, ergab sich hinsichtlich der Bedeutung des Zukunftsthemas ein ähnliches Bild.

Die Ergebnisse der Online-Befragung bescheinigen den **Technologien zur Anpassung an den Klimawandel** in der Relevanzbeurteilung mit der dritthöchsten Bewertung hohe Bedeutung. Dies zeigt sich ebenfalls in den Relevanzbewertungen der einzelnen Forschungsaufgaben: Antworten auf die veränderte Wasserverfügbarkeit zu finden wird die höchste Relevanz im Zukunftsfeld zugesprochen, gefolgt von Antworten auf klimabedingte Naturkatastrophen und der Entwicklung leistungsfähiger Klimamodelle.

Obwohl die Modelle, Bewertungs- und Beobachtungsmethoden in der Online-Befragung als unterdurchschnittlich relevant bewertet wurden, erreichten die unterlegten konkreten Forschungsaufgaben Monitoring von Umweltzuständen und Modellierung von Umweltphänomenen hohe Bewertungen. Hier wird also insgesamt Bedarf an konkreten Modellierungsinstrumenten für Umwelt- und Klimaphänomene sowie an technischen Lösungsansätzen für bestehende Herausforderungen gesehen.

Es mag überraschen, dass die **Umweltlasten der Landwirtschaft** in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt sind, obwohl diese Problematik in der Landwirtschafts-, Umwelt-, Forschungs- und Technologiepolitik bisher keinen Niederschlag findet.

Für alle drei Forschungsaufgaben wird von vielen Befragten mangelnde Akzeptanz als zentraler Hemmnisfaktor für eine Intensivierung der Forschungsaktivitäten benannt. Für die arterhaltende Kultivierung von Böden wird auch das Fehlen von Promotoren von vielen Befragten als primäre Barriere angegeben.

In den Expertenurteilen spiegelt sich die Herausforderung, beim Thema Lärmbekämpfung wirksame Lösungen bereitzustellen, nicht wider. Zwar wird **Lärmbekämpfung und Luftreinhaltung** als überdurchschnittlich bedeutsam eingeschätzt und ist sogar unter den drei Spitzenreitern der gesamten Befragung in der Kategorie der Bedeutung für die Verbesserung der Lebensqualität. Die angebotenen Forschungsaufgaben, mit Ausnahme der schallarmen Bauteilegestaltung, wurden jedoch weit unterdurchschnittlich bewertet. Dies wird beim Einsatz der Adaptronik zur Unterdrückung der Schallbildung an der Quelle und bei der akustischen Schalllöschung besonders deutlich. Dem hier erkennbaren Widerspruch zwischen der Brisanz der Problemlage und den Expertenurteilen auf der Lösungsebene wird noch nachzugehen sein. Möglicherweise haben andere Lösungsansätze bessere Perspektiven und es muss hinsichtlich der Minimierung von Schallemissionen neu, d. h. auch in andere Richtungen, gedacht werden.

Insgesamt haben sich die Zukunftsthemen über die Laufzeit des Foresight-Prozesses stabilisiert. Parallele Forschungsvorhaben, die Überschneidungen zum Zukunftsfeld haben, ergaben vergleichbare Ergebnisse. Das Zukunftsthema Ressourcenschonendes und rohstoffeffizientes Wirtschaften ging bei der Konferenz im Juni 2009 teilweise im Zukunftsfeld neuen Zuschnitts ProduzierenKonsumieren2.0 mit auf. Dort sind Umweltaspekte in einer breiteren Perspektive integriert.

Ähnliche Sichtweisen national und international

Die Ergebnisse der ersten und zweiten Befragung des internationalen Panels zeigten sehr ähnliche Sichtweisen in Japan und den USA, wobei sich die Schwerpunktsetzungen unterscheiden. In Japan war rohstoffeffizientes Wirtschaften als Dauerthema nach wie vor sehr wichtig, genauso wie die Anpassung an den Klimawandel. Für den Experten der EPA stehen demgegenüber Fragestellungen zur gesicherten Energieversorgung und die Gewährleistung eines ökonomischen Nutzens im Mittelpunkt.

Ausblick in den Zukunftsthemen

Im Bereich Ressourcenschonendes und rohstoffeffizientes Wirtschaften fällt auf, dass Nachfrageseite (Produzenten) und Angebotsseite (Minenbetreiber) in Deutschland oft zu wenig miteinander kommunizieren. Hier würden aus Sicht der Autoren strategische Partnerschaften im Sinne gezielt zusammengestellter Kooperationen entlang der Wertschöpfungskette helfen, besonders empfindliche Rohstoffe und Industriebereiche zu identifizieren und Ungleichgewichte im Markt zu verhindern.

Bei der nachhaltigen, zukunftsfähigen Landwirtschaft sind die Akteure einerseits das BMELV mit der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) und dem Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI), andererseits das BMU mit dem Umweltbundesamt (UBA) und das BMBF. Wegen unterschiedlicher Zuständigkeiten gibt aus Sicht der Themenkoordinatoren weiße Flecken auf der Forschungslandkarte, beispielsweise im Bereich der Frage, ob Biomasse stofflich oder energetisch genutzt werden sollte. In diesem Sinne empfiehlt auch der vor kurzem gegründete BioÖkonomieRat[15] eine Neuordnung der Forschungsförderung im Bereich Bioökonomie. Dies könnte für die Schließung von Forschungslücken hilfreich sein.

In den drei genannten Zukunftsthemen Ressourcenschonendes und rohstoffeffizientes Wirtschaften, Nachhaltige, zukunftsfähige Landwirtschaft sowie Unterdrückung der Schallbildung an der Quelle müssen, so die hier gezogene Schlussfolgerung, die relevanten (neuen) Forschungsfragen im Detail noch herausgearbeitet werden. Hierzu sind nach der Beurteilung durch die Bearbeiter im Foresight-Prozess Studien unter Rückgriff auf schon vorhandene erste Aktivitäten und Arbeitskreise notwendig. Beim Lärmschutz sollte der Stellenwert und die Bedeutung sichtbarer gemacht werden. Dies erscheint durch verschiedene

15 http://www.biooekonomierat.de/

innovationspolitische Maßnahmen möglich, die von »Awareness«-Kampagnen bis hin zu Diffusionsanreizen reichen.

6.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick

Die folgende Tabelle 6.3 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Zukunftsthemen im BMBF-Foresight-Prozess. **Themen nach 1. Recherche** sind die Themen aus den Prozessen der Fachreferate (sofern sie nicht aussortiert wurden, weil sie bereits auf der Forschungsagenda stehen) und aus der ersten Literaturanalyse. **Themen nach 1. Workshop** sind diejenigen Themen, die nach dem 1. Workshop besonders verfolgt werden sollten. **Themen Online-Befragung** sind in die Online-Befragung eingegangen, bedeuteten also eine weitere Zusammenfassung der Zwischenergebnisse, die in der Befragung bewertet wurden. Und die **Themen nach Kriterienfilter** sind bereits »Zukunftsthemen«, die in der letzten Phase des Prozesses untersucht wurden. Sie sind in der Regel sehr ähnlich den am Ende des BMBF-Foresight-Prozesses vorgeschlagenen Zukunftsthemen (siehe erste Tabelle dieses Kapitels). Durch letzte Recherchen und Experteninterviews sind jedoch noch einige Zukunftsthemen modifiziert worden.

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Materialeffizienz und Ressourcenschonung	**Kernbereich**	**Ressourcen schonendes rohstoffeffizientes Wirtschaften**	Modellierung von Umwelt-Phänomenen
Recycling	Materialeffizienz und Ressourcenschonung	Vollautomatische Hausmülltrennung	Antworten auf klimabedingte Naturkatastrophen
Abfallvermeidung/ -entsorgung	Umweltfreundliche Produkte und Dienstleistungen	Hochwertiges Baustoffrecycling	Monitoring von Umweltzuständen
Materialeffiziente Produktionstechniken	sozio-ökonomische Erfolgsfaktoren für Technikdiffusion	Trennverfahren für Stoffverbünde	Folgenforschung der Biomassenutzung
Bionischer Leichtbau	globale und regionale Governance-Strukturen	Sekundärrohstoffe in Primärstoffqualität	Landfills Mining
Materialeffiziente Produkte	Konsumentenverhalten	Landfills Mining	Naturnahe Gewässerstrukturen
Miniaturisierung durch Mikro- und Nanotechniken	Integrales Design	**Hochwertige Nutzung veredelter nachwachsender Rohstoffe**	Antworten auf die veränderte Wasserverfügbarkeit
Biomassenutzung	Umweltschutzziele	Biokraftstoffe der nächsten Generation	Elimination der Einträge anthropogener Spurenstoffe
Umweltfreundliche Produkte	Umweltbildung/Information	Biokunststoffe der nächsten Generation	Bedarfsgerechte Düngung und Pflanzenschutz
Nachhaltige Produkt- und Nutzungskonzepte	Umweltfolgen- und Umweltrisikoforschung: Anpassung an Klimawandel, Risikoforschung und Mangement, Umwelt-Performance-Indikatoren (und Messung), Gefährdungsmonitoring neuer (unerwarteter) Stoffe, nachhaltige landwirtschaftliche Produktion, Modellierung und Vorausschau im Umweltschutz	Mikrobielle Raffination von Energie- und Chemie-Rohstoffen	Sekundärrohstoffe in Primärstoffqualität
Neue Nutzungsformen, wie Contracting, Sharing, Pooling und Leasing etc.	**Schnittstellen**	Regenerative Wasserstofferzeugung	Schallarme Bauteilegestaltung
	Nano-Nachhaltigkeit (Toxikologie)	**Produkte der Zukunft**	
	Life Cycle Assessment	Lebenszyklusorientierte Produktentwicklung	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
	Trinkwasserbereitstellung	Ressourceneffizienzorientierte Oberflächen-funktionalisierung	
	katalytische Zersetzung toxischer Stoffe	Leichtbau-Konstruktionen	
	Steigerung Wasser- und Ressourceneffizienz Landwirtschaft & Aquakulturen	Green IT	
Lärmschutz	Abmilderung der Folgen des Klimawandels durch pflanzliche Produktionssysteme	**Lärmbekämpfung und Luftreinhaltung**	Artenerhaltende Kultivierung von Böden
Entstehung von Schall	Materialeffizienz und Ressourcenschonung	Adaptronik in der Schallbekämpfung	
Schallausbreitung		Akustische Schalllöschung	**Ressourcen schonendes rohstoffeffizi-entes Wirtschaften (nach PK2.0)**
Aktive Dämpfung und Löschung an der Quelle		Schallarme Bauteilegestaltung	
Schallschutz		Feinstaubabscheider für Kleinfeuerungen	
Luftreinhaltung		Lösemittelfreie dauerhafte Lacke	
Sommerliche Ozonperioden		**Bodenschutz und Erhalt der Biodiversität**	
Feinstaubbelastung		Precision Farming	
Stationäre Emissionsquellen in Gebäuden		Artenerhaltende Kultivierung von Böden	
Altlasten und Bodenschutz		Folgenforschung der Biomassenutzung	
Beseitigung von Altlasten		Bodensanierung durch Bioremediation	
In-situ Sanierungstechnologien		**Modelle, Bewertungs- und Beobach-tungsmethoden**	
Vermeidung von Schadstoffeinträgen in Böden und Gewässer durch die Landwirt-schaft		Betriebliche Methoden zur Technologiebe-wertung	
Rückgewinnung von Wertstoffen aus De-ponien		Bewertung von Umwelt-Dienstleistungen	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Gewässerschutz		Modellierung von Umwelt-Phänomenen	
Belastungen von Abwasser, Gewässern und Trinkwasser mit anthropogenen Spurenstoffen		Monitoring von Umweltzuständen	
Dezentrale Wasserver- und Abwasserentsorgungssysteme		Modelle zur Stoffbewertung	
Nachhaltiges Management von Wasserressourcen		**Eco-effiziente Produktion**	
Produktionsintegrierte Umwelttechnik (Produktions- und Fertigungstechnik)		Innovative ressourceneffiziente Verfahren	
Materialeffizienz		Betriebsinterne Kreislaufführung	
Bionik		Modellierung und Simulation von Produktion	
Nutzung nachwachsender Rohstoffe		Modularisierung und Standardisierung	
Integrierte Produktpolitik		Mess-, Steuer-, Regeltechnik	
Klimaschutz		**Technologien zur Anpassung an den Klimawandel**	
		Leistungsfähige Klimamodelle	
		Antworten auf die veränderte Wasserverfügbarkeit	

Tabelle 6.3: Entstehung der Zukunftsthemen Umwelt und nachhaltige Entwicklung – Zwischenstände

6.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern

Klimabezogene Forschung beschränkt sich im Zukunftsfeld Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung auf die Anpassung an den Klimawandel (Adaptation). Die Bekämpfung der Treibhausgasemissionen (Mitigation) ist Gegenstand des Zukunftsfeldes Energiebereitstellung und -nutzung. Bezüge und Synergien bestehen auch zu den Zukunftsfeldern Wasser-Infrastrukturen, Dienstleistungen und neue Wertschöpfungsformen, Lebenswissenschaften und Biotechnologie, Zukunftsfähige Lebensräume und ProduzierenKonsumieren2.0.

Tabelle 6.4 stellt exemplarisch wesentliche Querbezüge zu Zukunftsthemen anderer Zukunftsfelder zusammen.

Energiebereitstellung und -nutzung
Wasserstoff und Brennstoffzellen
Regenerative Energien
Energieeffiziente Anwendungstechniken
Industrielle Produktionssysteme
Energie- und Ressourceneffizienz in der industriellen Produktion
Fügen, Verbinden und Aufbauen nach dem Vorbild der Natur (Bionik)
Lebenswissenschaften und Biotechnologie
Optimierung der Material-, Wassernutzungs- und Energieeffizienz von Bioraffinerien
Digitale Bioraffinerie
Optionen zur Lösung von Biomasse- und Land-Nutzungskonflikten
Züchtung dürretoleranter Nutzpflanzen
Ermittlung standortspezifischer, synergistischer Kombinationen von agronomischen Maßnahmen und dürretoleranten Pflanzen für den Anbau
Biofuels der zweiten Generation und Technologien zu ihrer Verbrennung
Materialien und Werkstoffe
Selbstheilende Materialien für höhere Lebensdauer und Zuverlässigkeit
Recycling von komplexen Materialsystemen und -verbünden
Zukunftsfähige Lebensräume
Siedlungsformen der Zukunft
Versorgung in neuen Siedlungsstrukturen
Governance in der Stadt der Zukunft
Nanotechnologie
Umweltauswirkungen von Nanomaterialien und -systemen
ProduzierenKonsumieren2.0
Integrierte Entwicklungspfade
Methoden zur Erforschung integrierter Entwicklungspfade
Services Science
Neue Organisations- und Geschäftsmodelle (nutzen statt besitzen)
Wasser-Infrastrukturen
Nutzung der im Abwasser enthaltenen Ressourcen
Adaption der Wasser-Infrastruktur

Tabelle 6.4: Ausgewählte Querbezüge zu anderen Forschungsfeldern, -gebieten und -aufgaben

Die Entwicklung von Modellen zur Beschreibung von Phänomen und Systemen sollte aus Sicht der Autoren als Querschnittsthema gefördert werden, da hier in vielen Bereichen ähnliche Methoden zur Anwendung kommen und es eine Problemschnittmenge gibt, in der beispielweise die Frage des Verhältnisses von Modellaufwand zur Aussagesicherheit anzusiedeln ist. Erfolgversprechend wären hier Verbundprojekte mit Softwareherstellern und Anwendern aus möglichst unterschiedlichen Bereichen. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt das Zukunftsfeld neuen Zuschnitts »Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation«.

Themenkoordination:
Dr. Frank Marscheider-Weidemann, ISI
(frank.marscheider-weidemann@isi.fraunhofer.de) und
Nico Pastewski, IAO (nico.pastewski@iao.fraunhofer.de)

7 Industrielle Produktionssysteme

Die Forschung im Zukunftsfeld »Industrielle Produktionssysteme« hat ihren traditionellen Schwerpunkt in der Bereitstellung neuer Produktionstechnologien und -techniken sowie deren Integration in die technischen (Teil-)Systeme der industriellen Fertigung. Heute sind jedoch Komplexitätsprobleme des Gesamtsystems Produktion, erweitert um vor- und nachgelagerte Funktionen, von gleichrangiger Bedeutung und werden auch zukünftig wichtige Bestandteile des Forschungsfelds sein. Die klassische Unterteilung in spannende, ur- und umformende Verfahren, Automatisierungstechnik und Produktionssteuerung ist heute nur noch eingeschränkt anwendbar, da innovative Produktionssysteme integrierte, ganzheitliche Ansätze und eine übergeordnete Zielsetzung verfolgen.

7.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Industrielle Produktionssysteme

Energieverbrauchsoptimierte und energieautarke Produktionsstätten
Bewertungsverfahren wie z. B. Life-Cycle-Analysen
Dezentrale Versorgung von Produktionsstätten
Energieoptimierte Prozesssteuerung
Substitution von Hochtemperaturprozessen
Produktionstechnologien für neue Oberflächen
Funktionsintegration in Oberflächen und aktive Steuerung (Smart Surfaces)
Energiegewinnung über Oberflächen
Energieverlustreduzierung über Oberflächen
Plasmaprozesse bei Atmosphärendruck
Flexible Maschinen, Produktionsprozesse und Wertschöpfungsnetze
Managementkonzepte zur Steuerung globaler bzw. regionaler Produktionsnetze
Intelligente Sensor-Aktor-Systeme
Selbstständige Interaktion der Maschinen mit der Umwelt, ohne systemhierarchisch höhere Systeme
Selbstregelnde In-situ-Prozesssteuerung
Automatisierte zerstörungsfreie Prüfung in Echtzeit (ohne Verzögerung) im Produktionsprozess
Paradigmenwechsel zur 100% i. O. Produktion
Schnittstelle zur digitalen Produktion und flexiblen Maschinen und Wertschöpfungsketten
Ausdehnung und Kopplung der Simulation auf alle Bereiche der industriellen Produktion
Enabler für die Flexibilisierung von Maschinen und Wertschöpfungsprozessen
Überwindung der Architektur, Netzwerk- und Dimensionsgrenzen
Komplexitätsbeherrschung
Know-how-Schutz und Informationssicherheit
Weiter steigende Bedeutung durch die Digitalisierung der Produktion
Schutz geschäftsrelevanter Daten über Fertigungsprozesse und -technologien, Produkte sowie Transaktionsdaten
Kommunikations- und Speichertechnologien

Laserstrahlbasierte, generative Verfahren für unterschiedliche Materialien
Kundenindividuelle Fertigung
Anpassung der Wertschöpfungsketten
Verwendung spezifischer Materialien (z. B. faserverstärkte Polyamide oder Metallpulver)
Mensch-Fabrik-Interaktion
Nahtlose, intuitive Interaktion zwischen Menschen und den technischen Elementen des Produktionssystems
Diversity gerechte Schnittstellen
Integration von Erkenntnissen aus der Psychologie und den Kommunikationswissenschaften
Interface- und Sensortechnologie

Tabelle 7.1: Identifizierte Zukunftsthemen Industrielle Produktionssysteme im Überblick

Tabelle 7.1: Identifizierte Zukunftsthemen Industrielle Produktionssysteme im Überblick zeigt einen Überblick über die Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Industrielle Produktionssysteme[16]. Die dort genannten Zukunftsthemen sind die folgenden.

Energieverbrauchsoptimierte und energieautarke Produktionsstätten sind ein sehr wichtiges Forschungsziel, das auch als eine Rahmenanforderung gesehen werden kann und nicht nur als separates Forschungsthema. Als wichtige Voraussetzung, und daher etwas zeitnäher, sind entsprechende Bewertungsverfahren zu betrachten – ggf. auch um weitere Aspekte der Nachhaltigkeit ergänzt (z. B. Wassereffizienz).

Produktionstechnologien für neue Oberflächen: Die zunehmende Funktionsintegration in die Oberfläche ist bereits heute eine wichtige Entwicklung, die in Zukunft noch weiter an Bedeutung gewinnen wird. Bei der Erzeugung von »Smart Surfaces« geht es jedoch auch um die aktive Steuerung dieser Funktion. Ein wichtiger Treiber der Entwicklung kann dabei auch Energie- und Ressourceneffizienz sein, bei der nicht nur Energieverluste (z. B. Tribologie, Wärmedämmung, Schwingungsdämpfung) sondern auch die Energiegewinnung über die Oberfläche eine Rolle spielen werden (z. B. Solaranwendungen).

Flexible Maschinen, Produktionsprozesse und Wertschöpfungsnetze werden in Verbindung mit Managementkonzepten zur Steuerung globaler bzw. regionaler Produktionsnetze ein wichtiger Wettbewerbsfaktor sein. Ziel ist dabei die selbstständige Interaktion der Maschinen mit der Umwelt, ohne systemhierarchisch höhere Systeme in Anspruch zu nehmen.

Selbstregelnde In-situ-Prozesssteuerung ist ein ausnehmend wichtiges Zukunftsthema an der Schnittstelle zwischen zerstörungsfreien Analyseverfahren,

16 Die dunkelgrau unterlegten Felder sind die Zukunftsthemen, die hellgrau hinterlegten einzelne, besonders wichtige Forschungsaufgaben.

digitaler Produktion und flexiblen Maschinen und Wertschöpfungsketten, auch wenn eine 100 i. O.-Produktion eventuell nicht ökonomisch sinnvoll erreicht werden kann.

Die **Ausdehnung und Kopplung der Simulation auf alle Bereiche der industriellen Produktion** ist ein entscheidender Enabler für zahlreiche Entwicklungen, wie z. B. die Flexibilisierung von Maschinen und Wertschöpfungsprozessen oder die Steigerung der Ressourceneffizienz. Das gesamte Potenzial der Simulation lässt sich jedoch erst ausschöpfen, wenn Architektur-, Netzwerk- und Dimensionsgrenzen überwunden werden und es zur Integration der einzelnen Teilsysteme sowie zur damit verbundenen Komplexitätsbeherrschung kommt.

Know-how-Schutz und Informationssicherheit spielen bereits heute eine große Rolle und werden im Zuge der Digitalisierung der Produktion noch an Bedeutung hinzugewinnen, da mit dieser Digitalisierung ein gestiegener Bedarf nach Informationssicherheit zum Schutz geschäftsrelevanter Daten über Fertigungsprozesse und -technologien, Produkte sowie Transaktionsdaten einhergeht.

Laserstrahlbasierte, generative Verfahren für unterschiedliche Materialien können eine entscheidende Voraussetzung für die kundenindividuelle Fertigung sein. Der Laser ist dabei als ein universelles Werkzeug mit erheblichem Zukunftspotenzial anzusehen.

Mensch-Fabrik-Interaktion ist vor allem angesichts der alternden Belegschaft in Europa ein wichtiges Forschungsthema. Dabei geht es nicht nur um die physische Entlastung – z. B. durch Roboter –, sondern auch um psychologische Aspekte. Entscheidend wird hier neben technologischen Fortschritten in der Interface- und Sensortechnologie die Integration von Erkenntnissen aus der Psychologie und den Kommunikationswissenschaften sein.

7.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Industrielle Produktionsprozesse

Start des Prozesses

Ausgehend von einer Recherche der thematischen Schwerpunkte aller deutschen Lehrstühle im Bereich Produktionstechnik und einer Literaturanalyse zu Technologie- und Vorausschaustudien zur Produktion im In- und Ausland, wurde eine erste Mindmap mit möglichen Zukunftsthemen generiert und im Workshop im Herbst 2007 mit relevanten Vertretern aus Industrie und Forschung diskutiert.

Dank der umfangreichen Vorausschau-Aktivitäten auf dem Gebiet der Produktion in Deutschland (z. B. Untersuchung zur Aktualisierung der Forschungsfelder für das Rahmenkonzept »Forschung für die Produktion von morgen«) und auf EU-Ebene (z. B. Manufacturing Visions und Manufuture-EU, Strategic Research Agenda) der letzten Jahre, konnten zahlreiche Überblicksstudien genutzt werden. Die sich daraus ergebende Strukturierung wurde weitgehend bis zum Ende des Projekts beibehalten. Veränderungen ergaben sich lediglich auf der Ebene der Einzelthemen. So wurden u. a. neue Themen aufgenommen oder andere Themen als umfangreiche aktuelle Forschungsthemen nicht weiter vertieft.

Zerstörungsfreie Analyseverfahren
Integrierte und selbstoptimierende Prüfverfahren (Röntgen, T-Hz, Infrarot, Schall, MRT)
Wandlungsfähige und adaptive Produktionssysteme
Plug & Produce (als Agentensysteme, spontane Vernetzung)
Mobile Produktion
Maschinen/Systeme mit inhärenter Intelligenz (selbstoptimierend, selbstlernend)
Sensorintegration in Handhabungssysteme
Digitale Prozesskette
Generative und Rapid Produktionsverfahren
Weiterentwicklung geeigneter Verfahrenstechnologien (Druckverfahren)
Reverse Engineering / Digital shape sampling and processing (Laser-Sintern)
Consumer-Centric Production
Miniaturisierung in der Produktionstechnik
Maschinenkonzepte (Mikro-Montage Systeme, Hoch integrierte Fertigungssysteme »Fabrik in der Maschine«)
»Miniaturisierte« Fertigungsverfahren
Produktionstechnik für neue, hybride Werkstoffe
Bionische Aufrüstung von Werkstoffen und Maschinen (z. B. Lotuseffekt)
(Weiter-)Entwicklung geeigneter Fertigungsverfahren
Produktionstechnik für neue Oberflächen
Nanostrukturierte Oberflächen (Maschinenkonzepte, Fertigungsverfahren)
Systematische Entwicklung Funktionaler Oberflächen (Surface Engineering): Barrierefunktionen, Grenzflächenwechselwirkungen, elektrische Funktionen, Optische Funktionen
Neue Aktoren
Lasertechnik (Faser-Laser, Femtosekunden-Laser)
Unkonventionelle Wirkprinzipien (Piezoelektrische Aktoren, Formgedächtnislegierungen)
Unkonventionelle Aktor-Aktor und Aktor-Sensor Kombinationen
Energie- und Ressourceneffizienz in der industriellen Produktion
Nachwachsende Rohstoffe in der Produktion
Energieeffizienz in der Fertigung
Produktionsintegrierter Umweltschutz (Life-Cycle Konzept)
Digitale Fabrik
Digitale Prozesskette
Digital/ Virtual Engineering
Simulation in Planung/ Steuerung
Komplexitätsbeherrschung in Echtzeit durch geeignete Software(architekturen)

Mensch-Fabrik-Interaktion
Mensch-Roboter Kooperation
Assistenzsysteme
Künstliche Intelligenz: Autonome Systeme, in verteilten Systemen, in spontan vernetzten Systemen
Produktionstechnik für kopiersichere Produkte
Software/ Hardware Kombinationen: Embedded Systems, ASIC Designs, Kryptographie
Markierung und Identifizierung: Holographie, RFID, Chemische Marker
Geschäftsmodelle: Produkt/ Dienstleistungskombination, Destandardisierungs- und Technologiediffe-renzierungsstrategien
Nutzen- und Serviceorientierte Produktionssysteme
Betreiber Modelle
Fern-Update/ Upgrade/Konfiguration

Tabelle 7.2: Themen Industrielle Produktionssysteme im ersten Foresight-Workshop 2007

Zerstörungsfreie Analyseverfahren

Anhand der »Zerstörungsfreien Analyseverfahren« kann der Auswahlprozess illustriert werden. Zunächst wurde das gesamte Feld der Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt und die Potenziale für Deutschland wurden skizziert.

Unter dem etablierten Zukunftsfeld wurden alle Technologien und Verfahren verstanden, welche die Oberfläche oder die inneren Strukturen eines Körpers darstellen oder auf andere Weise Rückschlüsse auf ihren Zustand erlauben. Die bildgebenden Verfahren nutzen dazu i.d.R. akustische/ schall-basierte Methoden oder (im zunehmenden Maße) auch solche, die auf elektromagnetischer Strahlung unterschiedlichster Frequenzbereiche basieren.

Zerstörungsfreie Analyseverfahren werden bereits heute mannigfach industriell genutzt. Das gilt vor allen Dingen für die Bildverarbeitungsverfahren. Allerdings werden jene, die auf elektromagnetischen Wellen basieren, bisher nur sehr punktuell genutzt, und man kann noch nicht von einer 100 Prozent-Prüfung oder -Analyse sprechen. Bisher stand die Werkstoffprüfung, z. B. bei Gussverfahren oder bei Verbindungstechniken wie dem Schweißen im Mittelpunkt des Interesses. Das langfristige Ziel in der industriellen Anwendung ist eine 100 Prozent i. O. Produktion auf Basis einer »In-situ-Prozesssteuerung«. Dies bedeutet z. B., dass der Prüfkopf in die Fertigungsmaschine integriert wird und der Fertigungsprozess auf dieser Basis nachgeregelt wird. Die Stichprobenprüfung kann so entfallen, der Produktionsprozess wird verkürzt und die Ausschussproduktion kann reduziert werden. Für die Nachregelung sind intelligente Prüfverfahren anzustreben.

Dieses langfristige Ziel wird voraussichtlich auch in 15 Jahren noch ein Forschungsthema sein. Dabei geht es einerseits um die Entwicklung neuer Analysetechnologien und andererseits um die Integration dieser Verfahren in den industriellen Prozess. Dies kann z. B. eine Integration in Bearbeitungszentren be-

deuten. Zukünftig ist auch mit einer stärkeren Kombination der unterschiedlichen Verfahren der Strahlendiagnose zu rechnen (Ultraschall plus Röntgenstrahlen etc.). Bisher hat man überwiegend »Digital shape sampling and processing« durchgeführt, also nur die Oberfläche in 3D erfasst und die Daten weiterverarbeitet. Die Überprüfung im Inneren war auf Schichtanalysen und Materialanalysen fokussiert. Eine 3D-Erfassung der inneren Strukturen gewinnt erst jetzt an Bedeutung. Wenn eine vollständige Erfassung und Weiterverarbeitung von CAD-Daten möglich wird, könnten Losgröße 1 und kundenindividuelle Produkte gefördert werden. Allerdings könnten sich dabei auch neue Problematiken beim Schutz des geistigen Eigentums ergeben.

Diese Analyseverfahren sind insbesondere für eine hochautomatisierte Produktion geeignet und daher für Deutschland von entscheidender Bedeutung. Wenn eine Integration in den Fertigungsprozess gelingen soll, müssen diese Technologien vom Maschinenbau aufgegriffen werden. Dies könnte einen Wettbewerbsvorteil für den deutschen Maschinenbau bedeuten.

Außer Deutschland sind auf diesem Gebiet die USA, Kanada und Großbritannien sehr aktiv. Maßgeblich beteiligt ist neben der aktuellen Bildverarbeitungsbranche auch die Medizintechnik. In Deutschland ist das Fraunhofer IZFP mit seinen Niederlassungen in Dresden und Saarbrücken führend. In Großbritannien wird vom British Institut für NDT (BINDT) ein führendes Journal herausgegeben.

Diese Technologien sind eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung von adaptiven Maschinen und Systemen, die »intelligent« und selbstlernend aufgebaut werden sollen. Von den bildgebenden Verfahren wird auch die Maschine-Maschine-Interaktion beeinflusst, zudem können Produktionstechniken für miniaturisierte Produkte unterstützt werden. Die hybriden Produkte (Dienstleistungen) können von Analysetechniken, z. B. bei Inspektionen, umfangreich profitieren. Zudem lassen diese Techniken eine ortsunabhängige Diagnose zu.

Unterthemen:

- Integration in Fertigungsprozesse (z. B. in Bearbeitungszentren), Zeithorizont 10 bis 15 Jahre
- Neue Kombination der heute eingesetzten Strahlendiagnoseverfahren, Zeithorizont 10 bis 15 Jahre
- 100 Prozent i. O. Produktion durch selbstregelnde in-situ-Prozesssteuerung, Zeithorizont 10 bis 15 Jahre
- »Digital structure sampling and processing«, Zeithorizont 10 bis 15 Jahre

Die ursprünglich vier Unterthemen wurden während des Diskussionsprozesses zunächst um zwei weitere Unterthemen – »Lebensdauerüberprüfung« und »In-line-Biosensorik« – ergänzt, anschließend wurden aufgrund der Einschätzung der Potenziale für Deutschland und der Zeithorizonte drei Unterthemen für die Online-Befragung ausgewählt. Diese Auswahl wurde mit Experten des Projektträgers Fertigungstechnologie in Karlsruhe, mit Mitarbeitern des VDMA und mit Vertretern der deutschen Plattform von Manufuture-EU abgestimmt. Die Gespräche mit internationalen Experten deuteten darauf hin, dass Wirtschaftlichkeitsaspekte nicht vernachlässigt werden dürfen und die Gefahr besteht, ein »Over-Engineering« zu betreiben.

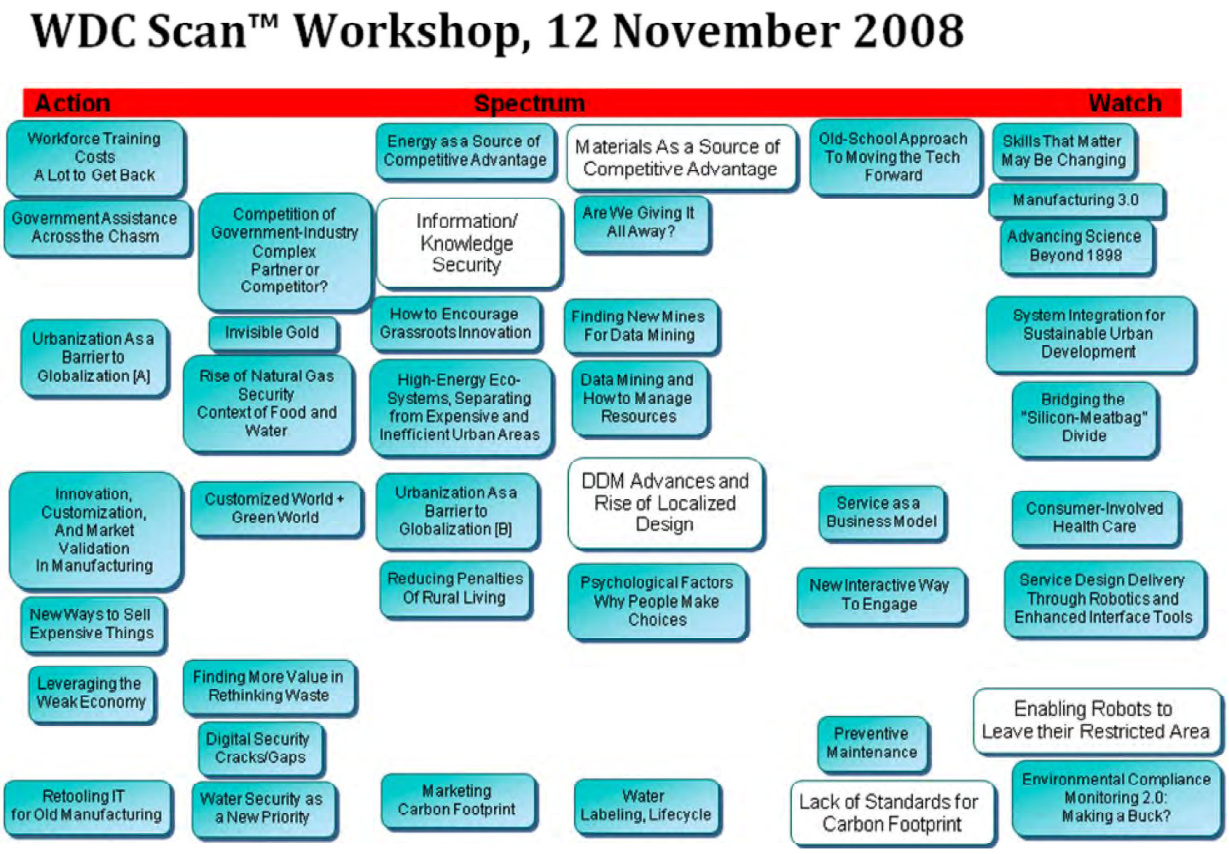

Abbildung 5: Ergebnisse des SCAN-Workshops in den USA

In der Online-Befragung wurde die »100 Prozent i. O. Produktion durch selbstregelnde In-situ-Prozesssteuerung« als eines der wichtigsten Unterthemen eingestuft. 62 Prozent der Teilnehmerinnen und Teilnehmer bewerteten das Thema mit »sehr wichtig«, sodass es als ein Zukunftsthema identifiziert wurde. Insgesamt waren die Gespräche mit den internationalen Experten und die Teilnahme an einem internationalen Workshop von SRI Business Intelligence (siehe

Abbildung 5) zum Thema »Signals of Change in Manufacturing« in den USA wichtige Schritte der Auswahl innerhalb des BMBF-Foresight-Prozesses. Themen, die in ihrer Relevanz durch den internationalen Workshop bestätigt wurden, waren u. a.: »Produktionstechnik für den Einsatz neuer Werkstoffe, Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbünde«, »Informationssicherheit«, aber auch die Potenziale, die sich bei einer lokalen, individualisierten Produktion ergeben können, sowie die dominante Relevanz der Nachhaltigkeit für die Produktion der Zukunft.

Laser-Fertigung (Photonics)

Laser-Fertigung (Photonics) als Technologiebereich beschäftigt sich mit dem Generieren, Kontrollieren und Detektieren von Photonen (Lichtteilchen). Speziell im industriellen Bereich wird »Licht« immer mehr zu einem universellen Werkzeug: Es schneidet, bohrt und schweißt unterschiedlichste Materialien, speichert Daten auf CDs, transportiert Informationen um die Welt oder misst Schadstoffe.

Den Grundstein für die leuchtende Zukunft der Photonik legen u. a. Hochleistungs-LEDs, die dank miniaturisierter optischer Systeme immer lichtstärker werden, so dass sie konventionelle Lichtquellen ersetzen können. Organische Leuchtdioden wiederum ersetzen zunehmend klassische LEDs in ihren angestammten Anwendungsgebieten wie Displays. Laser und andere neue Strahlenquellen wie Terahertz- und EUV-Strahlung sichern Anwendungen in der Sicherheits- und Medizintechnik sowie in der Chip-Fertigung und führen zu weiteren Prozessinnovationen in der industriellen Fertigung.

Gerade im Bereich der Lasertechnik, die schon seit fast 50 Jahren vom Wirkungsprinzip her bekannt ist, sind nach Meinung von Experten heute gerade 50 Prozent der industriellen Anwendungsmöglichkeiten erschlossen. Die Forschungsschwerpunkte sind hier sehr vielfältig und beinhalten u. a. die Applikation des Lasers als Universalwerkzeug in der konventionellen industriellen Fertigung (z. B. lasergestützte Massivumform- und Abtragungsprozesse oder Laser-Schneide/ Schweiß-Werkzeuge) oder auch im Bereich neuartiger, generativer Verfahren wie dem »Selektiven Laser Melting«. Daneben gilt es, neuartige Lasersysteme, wie z. B. den Faserlaser, stabiler und vor allem leistungsfähiger hinsichtlich der Energiezufuhr und -menge zu gestalten. Die für die Strahlformung notwendigen Mikrooptiken sind zu entwickeln und zu fertigen, um der Lasertechnik neue Anwendungsmöglichkeiten zu eröffnen. So kann ein Femtosekunden-Laser sowohl als nanomedizinisches Werkzeug in der Gentechnik eingesetzt werden, als auch als ein effektives Werkzeug in der 3D-Mikrostrukturierung von Werkstoffen, mit dem nicht nur die Form der Oberflächen gestaltet werden kann, sondern auch deren physikalische Eigenschaften manipuliert werden können.

Die optischen Technologien (siehe das entsprechende Zukunftsfeld) sind einer der wachstumsstärksten Technologiebereiche in der deutschen Industrie. Die Unternehmen sind weitgehend mittelständisch geprägt und haben mit einem Weltmarktanteil von etwa 25 Prozent eine Spitzenposition inne. Gerade die vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten der Photonik haben diese zu einer der wichtigsten Querschnittstechnologien werden lassen, die Grundlage des Wachstums in anderen Zukunftsmärkten wie der Nano- und Biotechnologie, Medizintechnik sowie im IKT-Bereich ist. Aus der Literatur zur Laser-Fertigung, u. a. einer umfangreichen Vorausschau-Studie aus Großbritannien, dem »UK Foresight Report: Manufacturing with Light«, wurden sieben Unterthemen ausgewählt, die in den Diskussionsprozess eingingen.

- Dreidimensionale Mikrostrukturierung
- Physikalische Mikrostrukturierung (»Laser-Chemie«)
- Komponenten für Laserbearbeitungsmaschinen
- Ergänzung durch weitere unkonventionelle Aktorsysteme (z. B. Vibration, Ultraschall)
- Faserlaser
- Nano-/Femtosekunden-Laser
- »Two-Photon-Laser micromachining«

Die Themen wurden u. a. mit Vertretern des Projektträgers Fertigungstechnologie Karlsruhe und dem VDMA diskutiert. Dabei wurde zunächst die »Integration der Laser-Fertigung in die Fertigungsprozessketten« neu aufgenommen. Bei dem anschließenden Auswahlverfahren erfolgte eine Reduzierung auf vier Themen. Die Themen »Two-Photon-Laser micromachining« und Nanosekunden-Laser wurden als zu langfristig eingestuft, Faserlaser wurden als die relevanteste Komponente für Laserbearbeitungsmaschinen identifiziert. Daher wurden diese beiden Unterthemen miteinander kombiniert. In der Online-Befragung wurden die Unterthemen der Laser-Fertigung überwiegend als wichtig bzw. sehr wichtig beurteilt. Es kristallisierte sich jedoch kein einzelnes Thema als ausgesprochenes Zukunftsthema heraus. Vielmehr zeigte sich bei einem internationalen Vergleich, dass eine Fokussierung auf Laserverfahren als Substitutionstechnologie heutiger Abtragungsverfahren dazu führen kann, dass seine Potenziale in anderen Anwendungsbereichen (s. o.) nicht vollständig ausgeschöpft werden. Aufgrund der sehr vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten und -potenziale wurde das Thema einerseits als Spezialthema in Verbindung mit generativen Produktionsverfahren und andererseits als allgemeines Zukunftsthema aufgenommen.

Produktionstechnik für neue Oberflächen

Unter »Produktionstechnik für neue Oberflächen« werden alle Technologien und Verfahren verstanden, mit denen die Eigenschaften von Werkstoffoberflächen gezielt manipuliert werden können, um bestimmte Funktionen zu ermöglichen. Forschungsthemen sind teilweise auch unter dem Begriff der »lokalen Funktionalisierung oder Modifikation« zu finden, da eine Unterscheidung in Oberfläche und Volumen nicht mehr in jedem Fall möglich ist, wenn z. B. mehrere Schichten übereinander aufgetragen werden oder ein Gradientenwerkstoff vorliegt und der Übergang zwischen Volumen-Material und Oberfläche fließend ist.

Bereits heute wird Oberflächentechnik umfangreich in der Industrie eingesetzt. Dennoch sind in den nächsten Jahren durch den Einsatz neuer Werkstoffe, die gestiegenen Ansprüche an die Funktionalität der Oberflächen und neue Erkenntnisse aus der interdisziplinären Zusammenarbeit im Bereich der »Surface Sciences« große Umbrüche zu erwarten. Zielsetzung wird es sein, die Oberflächen nicht nur in einem ergänzenden Schritt zu optimieren, sondern diese Optimierung in den Herstellungsprozess zu integrieren.

Die Studie »Produktionstechnik zur Erzeugung funktionaler Oberflächen« (2008) gibt einen guten Überblick über Status und Perspektiven. In der dortigen Befragung beurteilten Experten sowohl den Reifegrad, als auch das technologische Potenzial zahlreicher Technologien. Als ein wichtiges Forschungsfeld wurde die Optimierung zahlreicher Verfahren für den zuverlässigen und kostengünstigen Einsatz in Großserien-Prozessen angesehen. Ein niedriger Reifegrad und ein hohes technologisches Potenzial wurden insbesondere bei den folgenden Technologien identifiziert:

- Atmosphärendruck-Plasmaspritzen
- Atmosphärendruck-Plasmaverfahren zur Mikro- und Nanostrukturierung
- Atmosphärendruck-Chemical-Vapor-Deposition (CVD)
- Nano-Imprint
- Selbstheilung bei Korrosionsschutz-Schichten
- Sensorische Schichten
- Stromerzeugung (DS-Photovoltaik)
- »Multiskalensimulation«

Medizintechnik, optische Industrie und Automobilindustrie sind mit unterschiedlichen Zielen die wichtigsten Anwender von Oberflächentechnik. Diese Branchen können und sollten zu den künftigen Vorreitern in diesem Bereich

zählen. Gelingt dabei eine enge Kopplung grundlagenorientierter Wissenschaft mit der industriellen Praxis kann sich, so die Einschätzung der Beteiligten Expertinnen und Experten, daraus ein wichtiger Wettbewerbsvorteil für die deutsche Industrie (insbesondere den Maschinenbau) ergeben.

Um Überschneidungen mit der bereits erwähnten Befragung zu vermeiden, wurden nur die Plasmaprozesse bei Atmosphärendruck in die – auch im Rahmen dieses Projektes durchgeführte – Online-Befragung aufgenommen. Die Multi-Skalen-Simulation wurde dem Themengebiet »Digitale Produktion« zugeordnet. Die »Sensorischen Schichten« wurden durch das breitere und damit auch weiter in der Zukunft liegende Thema »Smart Surfaces« ersetzt. Dieses wurde in der Befragung sowie in den Expertengesprächen als besonders wichtiges Zukunftsthema hervorgehoben.

Flexible Maschinen, Produktionsprozesse und Wertschöpfungsnetze

Die ursprünglich getrennten Themengebiete »globale, wandlungsfähige und adaptive Produktionssysteme« und »adaptive Maschinen und Systeme« wurden zusammengefasst, da sich während der Diskussion mit den externen Panel-Experten zeigte, dass beide Themen eng miteinander verwoben sind.

Die industrielle Produktion muss der Herausforderung der Globalisierung begegnen, indem sie eine kontinuierliche Anpassung ihrer Produkte, Prozesse und Organisation leistet. Während der Fokus der Produktionsforschung bisher auf der Flexibilisierung der Produktionssysteme im Sinne ihrer einzelnen Elemente wie z. B. der Entwicklung entsprechend flexibler Maschinen und Prozessketten lag (BMBF 2009), so ist dieser Ansatz in der Zukunft zu erweitern. Adaptive, mit inhärenter Intelligenz ausgestattete Maschinen und Systeme werden die Kernelemente zukünftiger Produktionssysteme bilden. Roboter und Automation sind ein Forschungsschwerpunkt in diesem Bereich.

Im Mittelpunkt der zukünftigen Forschungsanstrengungen wird nach Einschätzung der Experten die Mechatronik stehen, verstanden als die Verschmelzung des Maschinenbaus mit der Informations- und Kommunikationstechnik. Besonderes Augenmerk wird auf die Ausstattung von Maschinen mit inhärenter Intelligenz, welche sie zum Selbstlernen und zur Selbstoptimierung befähigt, gerichtet werden. Ziel muss es sein, so die hier vertretene Auffassung, adaptive Maschinen bereitzustellen, welche den Anforderungen einer wandlungsfähigen Produktion gerecht werden.

Eine enge Kooperation mit anderen industriellen wie auch allgemeinen Forschungsthemen ist notwendig. Eine wandlungsfähige Produktion integriert nicht nur Elemente aus den Themen »Digitale Fabrik«, »Adaptive Maschinen/Systeme« sowie »Mensch-Fabrik-Interaktion« zu einem flexiblen Produktions-

system, sondern ist auch und vor allem auf Erkenntnisse aus den Bereichen der System-/ Komplexitätsforschung angewiesen.

Fortschritte und Umsetzungserfolge im Bereich der wandlungsfähigen Produktionssysteme sind eine notwendige Voraussetzung für die Zukunftsfähigkeit des deutschen verarbeitenden Gewerbes. Sie ermöglicht nicht nur eine kostengünstigere Produktion oder neue und qualitativ hochwertige Produkte, sondern erlaubt vor allem eine schnelle Reaktion auf Kundenbedürfnisse. Sie ist, nach Meinung der Themenkoordinatoren, somit unumgänglich für die notwendige Verkürzung der Innovationszyklen und bietet damit auch Low-Tech-Unternehmen, die heute immer noch fast 50 Prozent der industriellen Wertschöpfung leisten, neben weiteren Kostenreduktionen zusätzliche Chancen zur wettbewerblichen Differenzierung.

Als potenzielle Zukunftsthemen wurden auch Plug&Produce-fähige Maschinen/ Systeme, der Einsatz autarker Agentensysteme in der industriellen Fertigung, die Entwicklung von selbstoptimierenden bzw. -lernenden Maschinen und Technologien für eine integrierte Prozess- und Produktüberwachung sowie mobile Produktionsanlagen identifiziert. In der Befragung wurden sie mit ähnlicher Relevanz bewertet. Ebenso wurde bei den internationalen Gesprächen betont, dass nicht die Weiterentwicklung einzelner Technologien Erfolg versprechend ist, sondern dass es vielmehr darum gehen muss, das Management der globalen Wertschöpfungsnetze zu optimieren.

Digitale Fabrik

»Digitale Fabrik« ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und 3D-Visualisierung – die mittels einem durchgängigen Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt. Die Digitale Fabrik wird zukünftig die gesamte Prozesskette in einer digitalen Repräsentation abbilden und darüber hinaus durch ein wissensbasiertes Produzieren Wissen zwischen kooperierenden Unternehmen verfügbar machen.

Insbesondere die ingenieurwissenschaftliche Ausdehnung mit der Übertragung der Simulation auf alle Bereiche der industriellen Produktion (Werkstoffe, Fertigungsverfahren, Produktdesign, Material- und Informationsflüsse) dürfte sich, so ein Ergebnis des Prozesses, als wichtige Befähiger-Technologie zur Beherrschung komplexer und wandlungsfähiger Produktionssysteme und deren Umwelt erweisen. In Zukunft werden durch neue Simulationsumgebungen realitätsnah komplexe heterogene Systeme berechnet und Skalengrenzen überwunden. Die Simulation wird zur Entwicklung von Werkstoffen, zur Planung

deren Verarbeitung und zum Design von Bauteilen eingesetzt. Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit des Systemkonzepts können im Vorfeld experimentell überprüft werden. Mithilfe der Simulation ist es möglich, eine größere Vielfalt an Planungsvarianten zu entwerfen. Das modellhafte Durchspielen zukünftiger Ereignisse bedeutet für die Planung mehr Transparenz und Qualität und leistet somit einen Beitrag zur Komplexitätsreduktion in heutigen Entscheidungssituationen.

Forschungsbedarf besteht aus Sicht der Autoren im digitalen/ virtuellen Engineering u. a. im Bereich Simulation zur Absicherung der Planung und Software-Architekturen zur Handhabung extrem heterogener und komplexer Daten-/ Informationsstrukturen, Digitales und Virtuelles Engineering, durchgängige digitale Planungskette mit Absicherung durch Simulation in allen Planungsbereichen und in der parametrisierten Fabrikplanung.

Während des gesamten Auswahlprozesses wurden die zu Beginn definierten Unterthemen Ausdehnung und Kopplung der Simulation auf alle Bereiche der industriellen Produktion, Überwindung von Architektur-, Netzwerk und Dimensionsgrenzen sowie Echtzeit (verzögerungsfreie Integration in den Produktionsprozess mit Rückkopplung) nur geringfügig angepasst.

An der Schnittstelle zwischen »Digitaler Produktion« und »Know-how-Schutz für Produkt- und Produktionstechnik« wurde die »Informationssicherheit« nach Gesprächen mit mehreren Vertretern des VDMA ergänzt. Dieses Thema wurde von 60 Prozent der Teilnehmer als »sehr wichtig« beurteilt und auch beim o. g. internationalen Workshop diskutiert. Die Diskussion umfasste dabei nicht nur die Informationssicherheit, sondern auch die langfristige Entwicklung im Bereich der »Intellectual Property Rights« und die neuen Möglichkeiten des »Data-Mining«. Dieses aktuelle Thema ist daher ein Zukunftsthema – genauso wie die »Ausdehnung und Kopplung der Simulation auf alle Bereiche der industriellen Produktion«, was von mehr als der Hälfte der Experten als »sehr wichtig« bewertet wurde.

Energie- und Ressourceneffizienz in der industriellen Produktion

Dem Zukunftsthema »Energie- und Ressourceneffizienz« werden alle Technologien zugeordnet, die den ökologisch und ökonomisch effizienten Umgang mit Energie und anderen Ressourcen in der industriellen Produktion und Produktgestaltung zulassen. Voraussetzung hierfür ist ein ganzheitliches, den gesamten Lebenszyklus des Produktes umfassendes (Prozess-)Verständnis. Fortschritte in diesem Bereich sind nicht nur gesellschaftlich und politisch wünschenswert, sondern haben für die Unternehmen auch einen Selbstzweck: Speziell in Branchen mit hohem primärem Energie- und Ressourcenverbrauch – aber nicht nur hier – können durch eine effizientere Nutzung erhebliche Kos-

tenvorteile entstehen und somit die Wettbewerbsposition verbessert werden. Darüber hinaus eröffnet eine »umweltfreundlichere« Produktion gerade in entwickelten Industrieländern weitere wirksame Differenzierungs- bzw. Marktpotenziale im internationalen Wettbewerb.

Schwerpunkte werden neben der integrierten Energie- und Ressourceneffizienz in der Produktion durch die Vermeidung von Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen die Schließung der Lücke in der Kreislaufwirtschaft, insbesondere für neue Werkstoffe (z. B. durch Demontagetechnologien und -automatisierung), und die Nutzbarmachung der technischen Fortschritte in der Nano, -Bio- und Umwelttechnologie sein. Eine Substitution petrochemisch basierter Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe durch biomassebasierte Stoffe ist zu erwarten.

Neben der energieeffizienten Produktion wird langfristig aufgrund der weltweit spürbaren Verknappung von Trinkwasser mit einer wachsenden Bedeutung einer effizienten Wassernutzung gerechnet. Dies wird sich insbesondere auf jene Teilbereiche der Produktion auswirken, die einen hohen Wasserverbrauch haben oder hohe Anforderungen an die Wasserqualität stellen. Flexible, global einsatzfähige Produktionssysteme werden nach Einschätzung der Experten daher verstärkt auch eine wasseroptimierte Komponente enthalten müssen.

Des Weiteren gilt es, der angestrebten breitflächigen Einführung von »biologischen« Rohstoffen bzw. daraus synthetisierten Produkten mit entsprechend angepassten Produktionsverfahren und -technologien Rechnung zu tragen bzw. auch Fortschritte aus verwandten Forschungsbereichen wie der Biotechnologie, Nanotechnologie und dem Umweltschutz in Anwendungen im industriellen Maßstab zu überführen.

Umweltschutz bzw. das dafür notwendige produktionstechnische Know-how bietet der deutschen Volkswirtschaft hervorragende Wachstumsaussichten: Deutschland ist heute auf diesem Gebiet international führend und hat die Chance, Maßstäbe zu setzen. Die »Umwelttechnologie« beschäftigt heute schon etwa 1,5 Mio. Menschen direkt und sichert mit ihren Fortschritten die Wettbewerbsfähigkeit der gesamten Industrie (siehe auch Zukunftsfeld Umwelt und nachhaltige Entwicklung).

Online-Befragung

Aus der Vielzahl der Themen im Zukunftsfeld »Industrielle Produktionsprozesse« wurden insgesamt zehn Zukunftsthemen herausgearbeitet. Themen wie die »Vermeidung von Schmierstoffen und Restmengen« wurden dabei nicht weiter verfolgt, weil sie hinsichtlich des Zeithorizonts als zu kurzfristig eingeschätzt wurden. Insgesamt wurde versucht, mit den vier ausgewählten Themen (fett-

gedruckt) in der Online-Befragung die gesamte Spannbreite des Zukunftsfeldes abzudecken (siehe Tabelle 7.3).

- Niedertemperaturprozesse für Füge-, Härte- und Umformverfahren
- **Energieverbrauchsoptimierte und energieautarke Produktion**
- **Wassereffiziente und wasserautarke Produktion**
- **Integrierte Bewertungsmethoden für Energieeffizienz und Life-Cycle-Analysen**
- Vermeidung von Schmierstoffen und Restmengen
- Emissionsfreie Fabrik
- Lärmfreie Produktion
- **Ver-/ Bearbeitung biotechnologisch hergestellter Rohstoffe**
- Ressourcenautarke Fabrik (Klimatisierung, Wassereffizienz, Energieeffizienz)

Die höchste Relevanz-Bewertung aller Unterthemen aus dem Zukunftsfeld industrielle Produktionssysteme erhielt das Thema »Energieverbrauchsoptimierte und energieautarke Produktionsstätten«. Die Fokussierung auf Energieaspekte fällt dabei im deutschen Kontext besonders deutlich aus. Internationale Experten bewerteten das Thema Nachhaltigkeit ebenfalls mit der höchsten Relevanz und sahen auch in der aktuellen Wirtschaftskrise keinen Anlass für eine Veränderung der Bedeutung. In den Gesprächen wurde jedoch klar, dass die Fokussierung auf Energieaspekte auf längere Sicht nicht ausreicht. Vor diesem Hintergrund wurden nicht nur »Energieverbrauchsoptimierte und energieautarke Produktionsstätten« als Zukunftsthema identifiziert, sondern zusätzlich weitere Aspekte der Ressourceneffizienz in der industriellen Produktion betont.

7.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick

Die folgende Tabelle 7.3 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Zukunftsthemen im BMBF-Foresight-Prozess. **Themen nach 1. Recherche** sind die Themen aus den Prozessen der Fachreferate (sofern sie nicht aussortiert wurden, weil sie bereits auf der Forschungsagenda stehen) und aus der ersten Literaturanalyse. **Themen nach 1. Workshop** sind diejenigen Themen, die nach dem 1. Workshop besonders verfolgt werden sollten). Die Tabelle 7.2 im vorangegangenen Abschnitt ist der auf dem Workshop bearbeitete Stand und damit zwischen den Themen nach erster Recherche und den Themen nach dem ersten Workshop anzusiedeln. **Themen Online-Befragung** sind in die Online-Befragung eingegangen, bedeuteten also eine weitere Zusammenfassung der Zwischenergebnisse, die in der Befragung bewertet wurden. Und die **Themen nach Kriterienfilter** sind bereits »Zukunftsthemen«, die in der letzten Phase des Prozesses untersucht wurden. Sie sind in der Regel sehr ähnlich den am En-

de des BMBF-Foresight-Prozesses vorgeschlagenen Zukunftsthemen (siehe erste Tabelle dieses Kapitels). Durch letzte Recherchen und Experteninterviews sind jedoch noch einige Zukunftsthemen modifiziert worden.

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Miniaturisierung in der Produktionstechnik	**Kernbereich**	**Miniaturisierung in der Produktionstechnik**	Intelligente Oberflächen
Maschinenkonzepte (Mikro-Montage Systeme, hoch integrierte Fertigungssysteme »Fabrik in der Maschine«)	Ressourcenschonende und energieeffiziente Fabrik	Mikromontage	Produktionstechnik für neue Werkstoffe
»Miniaturisierte« Fertigungsverfahren	Kopierschutz	Mikromaschinen	Fügen, Verbinden und Aufbauen nach dem Vorbild der Natur
Zerstörungsfreie Analyseverfahren	Kosten bei Fertigungs- und Montageverfahren, Wirtschaftlichkeitsmodelle	Mikroreaktoren	In-situ Prozesssteuerung
Integrierte und selbstoptimierende Prüfverfahren	Logistikgerechte Konstruktion und Entwicklung	Miniaturisierte Fertigungsinseln	Know-How Schutz für Produkt und Produktionstechnik
Röntgen	Logistik & Automatisierung	**Laserfertigung (Photonics)**	Lebenszyklusorientierte Produktentwicklung
T-Hz	Integrierte Fabrikplanung	Faserlaser in der industriellen Fertigung	Integration Surface-Sciences und Produktionsforschung
Infrarot	Multifunktionelle Planungs- und Steuerungsverfahren	Femtosekunden-Laser als industrielles Werkzeug	
Schall	Integrierte Sensorik	3-D Mikrostrukturierung	**Mensch-Fabrik-Interaktion (zu Mensch Technik Kooperationen)**
MRT	One piece flow für adaptive Fertigung	Physikalische Mikrostrukturierung	
Generative und Rapid Produktionsverfahren	Radikal neue Fabrik(gebäude) der Zukunft	**Generative Verfahren in industriellen Fertigungsprozessketten**	**Energieverbrauchsoptimierte und energieautarke Produktionsstätten**
Weiterentwicklung geeigneter Verfahrenstechnologien (Druckverfahren, Laser Sintern)	**Schnittstellen**	Generative, laserstrahlbasierte Verfahren für unterschiedliche Materialien	
Reverse Engineering/ Digital shape sampling and processing	Systemzuverlässigkeit und Sensitivitätsanalyse in der Auslegung	Fügen, Verbinden und Aufbauen nach dem Vorbild der Natur	**Laserbasierte und generative Produktionsverfahren/ -konzepte (zu PK2.0)**
Consumer-Centric production	Produktionstechnik für hybride Werkstoffe	Kombination und Integration generativer Verfahren in industrielle Fertigungsprozesse	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Neue Aktoren	Production2Nano	Regulierung, Standardisierung und Qualitätssicherung für generative Prozesse	**Innovative, ressourceneffiziente Verfahren (zu PK2.0)**
Lasertechnik (Faser-Laser, Femtosekunden-Laser)	Produktintegrierter Umweltschutz	**Flexible Maschinen, Produktionsprozesse und Wertschöpfungsnetze**	
Unkonventionelle Wirkprinzipien (Piezoelektrische Aktoren, Formgedächtnislegierungen)	Dienstleistungsfabriken	Intelligente Sensor-Aktorsysteme	**Flexible Produktion (zu PK2.0)**
Unkonventionelle Aktor-Aktor und Aktor-Sensor-Kombination	Produkt-Dienstleistungs-Datenmanagement	Maschinen mit inhärenter Intelligenz, selbstoptimierende Prozesse (Agentensysteme)	
Produktionstechnik für neue, hybride Werkstoffe	Kundenintegration in die Produktion	Mobile Produktion	
Bionische Aufrüstung von Werkstoffen und Maschinen (z. B. Lotuseffekt)	biochemische Aktoren	**Produktionstechnik für den Einsatz neuer Werkstoffe, Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbünde**	
(Weiter-)Entwicklung geeigneter Fertigungsverfahren	Intelligente Ortung, vernetzte globale Produktionssysteme, Produktpiraterie	Integration von Verbundwerkstoffen und Werkstoffverbünden in die Kreislaufwirtschaft	
Wandlungsfähige und adaptive Produktionssysteme		Automatisierte Herstellungsverfahren für langfaserverstärkte Verbundwerkstoffe	
Plug & Produce (als Agentensysteme, spontane Vernetzung)		Strukturintegierte Sensorik und Adaptronik im Inneren des Produkts	
Mobile Produktion		Herstellungsverfahren für gradierte Bauteile	
Maschinen/ Systeme mit inhärenter Intelligenz (selbstoptimierend, selbstlernend)		Handhabung von Nanomaterialien in industriellen Prozessen	
Sensorintegration in Handhabungssysteme			
Digitale Prozesskette		**Produktionstechnik für neue Oberflächen**	
Produktionstechnik für neue Oberflächen		Erzeugung von »Smart Surfaces«	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Nanostrukturierte Oberflächen (Maschinenkonzepte, Fertigungsverfahren)		Plasmaprozesse bei Atmosphärendruck	
Systematische Entwicklung funktionaler Oberflächen (Surface Engineering) (Barrierefunktionen, Grenzflächenwechselwirkungen, elektrische Funktionen, optische Funktionen)		Integration von Surface Sciences und Maschinenbau bzw. Produktionsforschung	
Digitale Fabrik		**Digitale Produktion**	
Digitale Prozesskette		Ausdehnung und Kopplung der Simulation auf alle Bereiche der industriellen Produktion und stetiger Optimierungsschleifen	
Digital/ Virtual Engineering/ Simulation in Planung/ Steuerung		Überwindung von Architektur-, Netzwerk und Dimensions-Grenzen	
Komplexitätsbeherrschung in Echtzeit durch geeignete Software(architekturen)		Echtzeit (verzögerungsfreie Integration in den Produktionsprozess mit Rückkopplung)	
Mensch-Fabrik-Interaktion		**Mensch-Fabrik-Interaktion**	
Mensch-Roboter-Kooperation		Diversity gerechte Schnittstelle zwischen Mensch und einzelner Maschine bzw. dem gesamten Produktionssystem.	
Assistenzsysteme		Maschinen- und Organisationskonzepte für eine alternde Belegschaft	
Künstliche Intelligenz (Autonome Systeme, in verteilten Systemen, in spontan vernetzten Systemen)			

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Produktionstechnik für kopiersichere Produkte		**Know-how-Schutz für Produkt-und Produktionstechnik**	
Software/ Hardware Kombinationen (Embedded Systems, ASIC Designs, Kryptographie)		Einschränkung der Kopierbarkeit durch Hard-/ Software Kombinationen	
Markierung und Identifizierung (Holographie, RFID)		Produkterkennung und -authentifizierung für »Abhörsichere«-Produktionsprozesse	
Geschäftsmodelle (Chemische Marker, Produkt/ Dienstleistungskombination, Destandardisierungs- und Technologiedifferenzierungsstrategien)		Schwer kopierbare Kombinationen von Produktionsprozessen, Geschäftsmodellen und Managementkonzeptionen	
Nutzen- und Serviceorientierte Produktionssysteme		Informationssicherheit	
Betreibermodelle			
Fern-Update/ Upgrade/ Konfiguration			
Energie- und Ressourceneffizienz in der industriellen Produktion			
Nachwachsende Rohstoffe in der Produktion			
Energieeffizienz in der Fertigung			
Produktionsintegrierter Umweltschutz (Life-Cycle-Konzept)			

Tabelle 7.3: Entstehung der Zukunftsthemen Industrielle Produktionssysteme – Zwischenstände

7.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern

Wie anfangs erwähnt, wird sich der Schwerpunkt in der Produktionsforschung von den klassischen, auf Technologieentwicklung fokussierten Disziplinen wegbewegen und sich zunehmend interdisziplinär ausrichten müssen. Damit wird die Vernetzung mit anderen Forschungsfeldern immer wichtiger. Aus einer technologischen Perspektive betrachtet, sind es vor allem die Forschungsfelder **Informations- und Kommunikationstechnologien, Nano-** und **Biotechnologie** sowie **Materialien,** die essenzielle Impulsgeber aller oben beschriebenen Technologieschwerpunkte darstellen.

Die Herausforderung wird in erster Linie in ihrer ganzheitlichen Integration bzw. Applikation in der industriellen Fertigung liegen. Vor dem Hintergrund der verschwimmenden Systemgrenzen – sei es auf Wertschöpfungsebene oder auf der Ebene nanoskaliger Oberflächenstrukturen – wird die industrielle Produktion vor die schwierige Aufgabe gestellt, die sich vervielfachende Systemkomplexität nicht nur technisch, sondern auch wirtschaftlich und im Sinne der Nachhaltigkeit zu beherrschen. Damit wird aus Sicht der Bearbeiter im Foresight-Prozess auch die **System- und Komplexitätsforschung** zu einem wichtigen Querschnittsthema werden.

Themenkoordination:
Elna Schirrmeister, ISI (elna.schirrmeister@isi.fraunhofer.de) und
Dr. Peter Ohlhausen, IAO (peter.ohlhausen@iao.fraunhofer.de)

8 Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT)

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 die klassische Telekommunikation, die Datenverarbeitung und die digitalen Medien (Konvergenz). Grob lässt sich die IKT in die drei Teilbereiche Hardware, Software und Kommunikations-/ Übertragungstechnik einteilen.

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 nahezu alle Bereiche unseres täglichen Lebens Einzug gehalten hat.

8.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Informations- und Kommunikationstechnologie

Alternative Computer-Architekturen und Hardware-Technologien
Quanteninformationstechnik und biomolekulare Informationstechnik
Selbstorganisierende und rekonfigurierbare Architekturen
Bottom-up-Nanoelektronik (vgl. hierzu das Zukunftsfeld »Nanotechnologie«)
Systeme und Verfahren der Simulation
Hochleistungshardware für Simulationszwecke
Mathematische und Programmierverfahren
Vertieftes Wissen über die zu simulierenden Systeme (z. B. Systembiologie)
Wissensbasierte Systeme
Affective Computing
Kollektive bzw. verteilte künstliche Intelligenz
Multiagentensysteme
Energieversorgung für mobile Endgeräte
(vgl. hierzu das Zukunftsfeld neuen Zuschnitts »Mikro-Energie aus der Umgebung«).

Tabelle 8.1: Identifizierte Zukunftsthemen Informations- und Kommunikationstechnologie im Überblick

Die IKT-Branche ist so schnelllebig wie kaum eine andere. Die Produktlebenszyklen, in denen Speicherchips, Bildschirme und Mobiltelefone, Übertragungstechniken, Roboter oder Software von leistungsfähigeren Nachfolgern abgelöst werden, verkürzen sich seit Jahren. Langfristige Zukunftsthemen sind die in

Tabelle 8.1: Identifizierte Zukunftsthemen Informations- und Kommunikationstechnologie im Überblick genannten.[17]

Zu den IKT-Anwendungsbereichen, die in den kommenden 15 bis 20 Jahren die größten Herausforderungen und Chancen bieten, gehören:

- Mobilität und Verkehr: Verkehrstelematische Systeme zur Erfassung und Steuerung von verkehrsträgerübergreifendem Verkehr sowie Anwendungen im Fahrzeug (z. B. zur Erhöhung der Verkehrssicherheit).
- Digitale Medien, Kultur und Unterhaltung: Der Kultur- und Medienbereich erfährt momentan eine grundlegende Transformation. Die Konvergenz der Übertragungswege und Darstellungsmedien sowie die Prozesse zur Erzeugung und Verbreitung von Inhalten haben ihren Ausgangspunkt im zunehmenden Einsatz von IKT und der Digitalisierung der Wertschöpfungsketten (Letan et al. 2007).
- Gesundheit: Die IKT für Anwendungen im Gesundheitsbereich ist einer der langfristig wichtigsten Einsatzbereiche. Hierzu gehören diagnostische Verfahren (z. B. bildgebende Verfahren), Verfahren zur Behandlung (z. B. »computer-aided surgery«, Implantate als Organersatz) und in der Pflege, z. B. Pflegeroboter (Picot et al. 2007; Butter et al. 2008).

Folgende Trends sind in der IKT zu beobachten und zu berücksichtigen: (1) Die weitere Steigerung der Leistungsfähigkeit und Sicherheit von Informations- und Kommunikationssystemen, (2) die Entwicklung von »intelligenten« Verfahren zur Auswertung großer Datenbestände für unterschiedliche Anwendungsfelder, (3) der Übergang von stationärer zu mobiler IKT-Nutzung sowie (4) die Verbesserung der Nutzbarkeit hochkomplexer IKT-Systeme.

Trotz der gezielten Förderstrategie der Bundesregierung hat sich an der Schwäche des deutschen Innovationssystems im IKT-Bereich im Vergleich zu den führenden Ländern (insbesondere USA, Japan und asiatische Tigerstaaten) in den letzten Jahren kaum etwas geändert (EFI 2009; Häring et al. 2007).

Für die Informations- und Kommunikationstechnologie wurden die in der Tabelle oben aufgelisteten Zukunftsthemen identifiziert.

[17] Die dunkelgrau unterlegten Felder sind die Zukunftsthemen, die hellgrau hinterlegten einzelne, besonders wichtige Forschungsaufgaben.

8.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Informations- und Kommunikationstechnologie

Start des Prozesses

Grundlage für die Identifikation der Zukunftsthemen waren die Ergebnisse aus der Analyse zahlreicher Foresight-Studien im IKT-Bereich, des IKT-2020-Programms des BMBF sowie Gespräche mit wichtigen Experten aus der Forschung und Forschungsförderung. Als Start für den Foresight-Prozess wurden aus dem breiten Themengebiet die folgenden acht besonders relevanten Bereiche als Ausgangspunkt gewählt:

Systemischer Entwurf komplexer Software: Informationstechnische Gesamtsysteme integrieren Soft- und Hardwarekomponenten. Die Verfügbarkeit leistungsfähiger Netze initiiert einen Trend zu verteilten Systemen: Millionen von Computern weltweit rechnen gemeinsam an ein und derselben Lösung. »**Grid Computing«**[18] und **serviceorientierte Architekturen** bündeln und integrieren verteilte Ressourcen (Computer, Software, Datenspeicher, Maschinen), um komplexe Aufgaben zu bearbeiten.

In konvergierenden Kommunikations- und Dienste-Infrastrukturen werden fehlertolerante Lösungen, Softwarequalität, Robustheit und Zuverlässigkeit eine zunehmende Bedeutung für Software-Anwendungen gewinnen. Entwicklungsmethoden und -werkzeuge werden erforderlich, die eine automatisierte Entwicklung und das Testen von Software, Anwendungen und Diensten zulassen. »**Autonomic Computing«** ermöglicht die Schaffung von Systemen, die sich selbst konfigurieren, optimieren und reparieren können.

Umfassende Sicherheit von IKT-Systemen: Die Abwicklung von Geschäftsprozessen über Netzwerke setzt eine hohe Informationssicherheit voraus. Daten dürfen nur von autorisierten Benutzern gelesen bzw. modifiziert werden (Vertraulichkeit) und nicht unbemerkt verändert werden (Integrität). Änderungen und ihre Urheber müssen rechtsverbindlich erkennbar sein. Der Einsatz modernster 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.

[18] Als gemeinsame Initiative mit der deutschen Wissenschaft und Wirtschaft fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) den Aufbau des D-Grids: http.//www.d-grid.de.

Ubiquitäre Kommunikationssysteme: Neue Technologien machen Informationen und mobile Dienste immer und überall verfügbar. Neue Technologien werden zu **ubiquitären Kommunikationssystemen** zusammenwachsen: Kommunikation »anytime«, »anywhere« über viele alternative Kanäle (synchron und asynchron), mobil, personalisiert und multimedial. »Unified-Messaging«-Lösungen waren dabei nur der Einstieg in eine Entwicklung, die mit dem Web 2.0 noch lange nicht am Ende angelangt zu sein scheint. Der Mensch als kommunizierende Entität rückt in den Mittelpunkt des Interesses.

Ein seit wenigen Jahren verfolgter Ansatz für ubiquitäre Kommunikationssysteme ist die **optische Freiraumkommunikation** (»visible light communications«, VLC), die mit sichtbarem Licht arbeitet. Dabei werden LEDs mit sichtbarer modulierter Emission als Sender verwendet. So könnten beispielsweise LED-Ampeln (als Elemente einer neuen Generation in der Verkehrstelematik) Autos und Fußgänger mit Verkehrsinformationen oder beliebigen anderen Informationen versorgen. Im Vergleich zur Funktechnik soll VLC auch bedenkenlos etwa im Gesundheitsbereich eingesetzt werden können – und ist nicht durch die Begrenzung auf ein bestimmtes Spektrum reglementiert (Peter et al. 2008; O'Brien et al. 2008).[19]

Semantische Technologien: Die täglich in Unternehmen, Forschungseinrichtungen, Behörden oder im World Wide Web entstehenden Datenmengen liegen oft unstrukturiert vor, in verschiedenen Formaten und heterogenen Datenbanken.

»Knowledge-Mining«-Ansätze unterstützen die Suche nach und Extraktion von implizit vorhandenem Wissen in umfangreichen Datenbeständen. Unternehmen gewinnen so einen wichtigen Wettbewerbsvorsprung – Investitionen in »Business Intelligence«, die sich langfristig auszahlen.

Semantische Technologien werden hier neue Wege gehen, Wissen strukturiert zu beschreiben und so für Mensch und Maschine nutzbar zu machen. Automatisierte Verfahren zur Indexierung von Informationen und Erzeugung von Metadaten werden die Entwicklung einer neuen Generation von Suchmaschinen und digitalen Assistenten ermöglichen (John 2006).

Neue Formen der Mensch-Computer-Interaktion: Die wachsende Leistungsfähigkeit von IKT-Systemen wird zunehmend die Entwicklung interaktiver Systeme ermöglichen und die Mensch-Computer-Interaktion weiter differenzieren.

19 Vgl. auch das von japanischen Unternehmen gegründete »Visible Light Communications Consortium« (http://www.vlcc.net/).

Diese **interaktiven Systeme** werden immer stärker auf den Anwender und seine Aufgaben zugeschnitten und sich dem aktuellen Kontext gemäß intelligent an die Bedürfnisse des Anwenders anpassen können. Hardwareseitig spiegelt sich die Mensch-Computer-Interaktion in der Entwicklung leistungsfähiger Endgeräte wider. Kleiner, leichter, leistungsfähiger und komfortabler sollen die Maschinen werden. »Wearable Computers«, »Hands-free Computer Interfaces« und zahlreiche Fortschritte in der Display-Technologie (holografische 3D-Displays, Flexible Displays, Ambient Displays usw.) tragen diesen Forderungen bereits ansatzweise Rechnung.

Neue Hardware-Technologien: Die Miniaturisierung bei der herkömmlichen planaren **Siliziumhalbleiter-Technik** als Basistechnologie wird innerhalb der nächsten 20 Jahre an grundlegende physikalische Grenzen gelangen (ITRS 2008). Die Nanotechnologie – neue Materialien, Strukturen und physikalisch (Quanteneffekte) alternative elektronische Bauelemente – hat das Potenzial, eine weitere Miniaturisierung und Leistungssteigerung der Hardware zu ermöglichen.

Bei der organischen Elektronik/ Polymerelektronik werden 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 zulassen. Anwendungen in der ubiquitären Elektronik (Einbettung in Produktverpackungen, »Wegwerfelektronik«) oder in Verbindung mit organischen Displays (OLEDS) für flexible Endgeräte und elektronisches Papier werden möglich (Nathan et al. 2005; Kirchmeyer 2006; De Silva et al. 2007).[20]

Die Energieversorgung elektronischer Systeme stellt eine wesentliche Bedingung für die Nutzung mobiler IT-Anwendungen dar. **Energy Harvesting** erlaubt, auf den Einsatz von Batterien zu verzichten, indem Strom aus Quellen wie Umgebungstemperatur, Vibrationen oder Luftströmungen erzeugt und in Kleinstakkumulatoren gespeichert wird. Dazu sollen (1) der piezoelektrische Effekt (Druck bzw. Vibrationen), (2) der thermoelektrische Effekt (Temperaturunterschiede), (3) die photovoltaische Energiewandlung auf Basis von verschiedenen Solarzellen-Prinzipien sowie ggf. elektroaktive Polymere (EAP), auch als Aktoren und Sensoren für die Erzeugung von Strom, genutzt werden (Kornbluh 2004; Mitcheson et al. 2004; Paradiso et al. 2005).[21] Siehe hierzu auch das Zu-

20 Deutschland gehört in der FuE der sich im Labor-/Pilotstadium befindenden Polymer-Elektronik aufgrund der frühzeitig erfolgten thematischen Schwerpunktsetzung in der Forschungsförderung des BMBF zu den führenden Ländern. http://www.pt-it.pt-dlr.de/de/1118.php

21 Aktivitäten in diesem Bereich werden momentan vom BMBF im Rahmen des MST-Programms (Themen: Energieautarke Mikrosysteme, Mikrobrennstoffzelle) gefördert. http://www.mstonline.de/foerderung/innovaber/mobil

kunftsfeld neuen Zuschnitts Zukunftsfähige Energielösungen im Bericht »Der BMBF-Foresight-Prozess – Zukunftsfelder neuen Zuschnitts«, Beispiel Mikro-Energie aus der Umgebung.

Alternative Computer-Architekturen: Alternative Computer-Architekturen versuchen, die durch Hauptspeicher und Bussystem begrenzte Leistungsfähigkeit eines Computersystems zu überwinden. Dazu werden auch Ansätze untersucht, die **nicht** auf Elektronik als Basistechnologie basieren (Silberglitt et al. 2006).

Eine vielversprechende Alternative scheinen die erst seit wenigen Jahren erforschten **Quanteninformationstechniken** zu sein, bei denen die Gesetze der Quantenmechanik für die Durchführung von Berechnungen (Quantencomputer) bzw. zur Absicherung von Kommunikation (Quantenkryptografie) genutzt werden (BMBF et al. 2005; Shannon 2006; Bacon et al. 2007).[22]

Als **biomolekulare** bzw. **DNA-Computer** werden Computer bezeichnet, die auf Verwendung der DNA als Speicher- und Verarbeitungsmedium beruhen. Das Ziel der derzeitigen, sich noch in der Grundlagenphase befindenden Forschung ist es, ein Hybridsystem zu schaffen, bei dem DNA-Technologie mit herkömmlicher Elektronik gekoppelt werden soll. DNA-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 (Jonoska 2004; Ezziane 2006; Reif et al. 2007).

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. Durch gezieltes Zusammenschalten von Ressourcen, die sich auch physisch an ganz unterschiedlichen Orten befinden, präsentiert sich ein System dem Anwender als virtuelle Einheit, die mehr leistet als ein isolierter Supercomputer. In Zukunft wird dies auch 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. Das Resultat sind so genannte **Tera-Architekturen-Systeme**, deren Kapazität alles bisher Bekannte übertrifft.[23]

22 Das BMBF fördert Arbeiten zu diesem Thema bereits im Rahmen des Programms »nanoQUIT«: http://www.nanoquit.de/.

23 Weitere Ansätze für neue Computer-Architekturen werden in der Fachgemeinde diskutiert. Zu diesen Ansätzen gehören u. a. Optical, Chemical und Neuro Computing (Abdeldayem/Frazier 2007; Aono et al. 2007; Stadler 2007).

Intelligente Systeme und Umgebungen: In der Forschung werden IKT-Systeme erprobt, die sich in Alltagsgegenstände und die Umgebung des Menschen integrieren lassen. Eine Vision beschreibt eine Welt voller unsichtbarer Computersysteme, die mit Sensoren ihre Umgebung laufend erfassen und die aktuelle Situation interpretieren. Dann kooperieren sie miteinander und greifen mittels Aktoren steuernd in die Realität ein. Damit steht eine den Menschen unterstützende unauffällige Hintergrundassistenz zur Verfügung (Aarts et al. 2005). Für die Realisierung dieser Vision sind Fortschritte in praktisch allen Teilbereichen der IKT notwendig. Insbesondere bedarf es weiterer (Grundlagen-) Forschung in folgenden Subgebieten:

Sensornetze bestehen aus einer Vielzahl an winzigen, drahtlos kommunizierenden Computern, die in einem sich selbst organisierenden Ad-hoc-Netz zusammenarbeiten, um ihre Umgebung mittels Sensoren zu überwachen. Die anvisierte Größe zukünftiger Sensorknoten machte die Idee unter dem Schlagwort »Smart Dust« oder »Smart Grain« (»intelligente Körner« bzw. »intelligenter Staub«) bekannt (Warneke et al. 2001). Das Potenzial der Sensornetze besteht im Ersatz kostspieliger Sensoranordnungen im Fahrzeugbau, in der Warenverwaltung in Lagerhäusern und zur Überwachung von Umweltparametern (z. B. Schadstoffe, Waldbrände). Sensornetze sind momentan noch im Entwicklungsstadium (Chong et al. 2003).

Proaktive kontextsensitive Systeme sind mobile Anwendungen und intelligente Umgebungen ohne Nutzerinteraktion, die auf relevante Ereignisse in der natürlichen Umgebung reagieren sollen bzw. diese zur weiteren Bearbeitung nutzen. Kontextmodelle, in denen die Informationen über Personen, Orte und Objekte integriert gesammelt und ausgewertet werden, dienen als Bindeglied zwischen dem IT-System und der realen Umgebung. Künftig werden, so die Erwartung, auch Vitalwerte von Personen (physiologische, aber auch emotionale Zustände) in solchen Systemen genutzt. Die Herausforderung besteht in der Entwicklung geeigneter Verfahren, um die für die jeweilige Anwendung relevanten Kontextinformationen zu bestimmen oder um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Komplexere kontextabhängige Systeme sind bereits Gegenstand der Grundlagenforschung und -entwicklung (Linnhoff-Popien et al. 2007).[24]

Experten-Workshop

Die aufgeführten Themen wurden als Einstiegsthemen für den nationalen Workshop 2007 genutzt. Der Workshop hatte das Ziel, die Vollständigkeit der

24 Die Bundesregierung hat sich – in etwas anderer Ausrichtung – unter dem Schlagwort »Internet der Dinge« des Themas angenommen. Insbesondere fördert das BMWi in seinem Programm »Next Generation Media« die Entwicklung von prototypischen Anwendungen. http://www.nextgenerationmedia.de/

Themen zu prüfen sowie die Relevanz für den BMBF-Foresight-Prozess zu bewerten. Wie in den anderen Zukunftsfeldern wurde auch hier mit Mindmap und Matrix gearbeitet.

Dabei kristallisierten sich folgende Ansätze als weiter zu verfolgen heraus: Bei den Grundlagenthemen wurden vor allem die **Mensch-Computer-Interaktion**, insbesondere adaptive und selbstkonfigurierende interaktive Systeme, sowie Verfahren und Techniken zur **Verbesserung der Energieeffizienz** als besonders relevant diskutiert. Als noch wichtiger wurden allerdings Forschungsfragen bewertet, die eine bessere Integration von IKT in unterschiedliche Anwendungskontexte adressieren. Hierzu gehören Fragen der **Modellierung von Unternehmensprozessen durch Software sowie Anwendungsarchitekturen**, die beispielsweise die Nutzung sozialer Intelligenz für die Lösung komplexer Aufgaben ermöglicht. Zwischen diesen beiden Themenblöcken steht die Frage, mit welchen Verfahren und Werkzeugen typische hochkomplexe Software sicher und effizient erstellt werden kann (Softwareengineering der nächsten Generation, Link zu Prozessorientierung, Metadesign, Verfahren zur Qualitätsmessung und Softwarewartung).

Zusätzlich wurde das Data Lifecycle Management (gezieltes, rechtskonformes »Vergessen« von Daten und Langzeitarchivierung) von den Workshop-Teilnehmern diskutiert. Darüber hinaus wurden interessante Ansatzpunkte für die Interaktion mit den Kognitionswissenschaften gesehen, dazu gehören konzeptionelle Themen (von der Organisation des Nervensystems für die Architektur von IKT lernen) über Fragen der künstlichen Intelligenz (Erkennung von Nutzerintentionen, Erstellung von Präferenzprofilen) bis hin zur umstrittenen Frage der Hirn-Computer-Schnittstelle.

Der Stellenwert der Informations- und Kommunikationstechnik als Querschnittstechnik bzw. als »enabler« für andere Wissenschafts- und Technikbereiche wurde anhand der hohen Bedeutung von Schnittstellenthemen deutlich. Hierzu gehört zunächst die wichtige Funktion, die IKT bereits seit Jahren in der Industrie und bestimmten Dienstleistungsbranchen (z. B. Banken) wahrnimmt. Dies wird auch in den kommenden 10 bis 20 Jahren nach Einschätzung der Workshopteilnehmer so bleiben. Hier ergeben sich wichtige Forschungsfragen rund um die Themenkomplexe »Smart Factory« bzw. vernetztes Engineering. Die Einschätzung wurde geteilt, dass die Produktionstechnik und die »Services Science« wichtige Konzepte aus der IKT aufgreifen und umsetzen sollten (wissensbasiert, adaptiv). Dazu gehört die Modellierung von Prozessen inklusive integrierter Vorausschau und Bewertungsverfahren, wie z. B. die selbstorganisierte Rekonfigurierbarkeit von Systemen.

Darüber hinaus kann IKT zur Energieeffizienz beitragen. Dabei geht es einerseits um das Energiemanagement von IKT-Systemen, z. B. Verfahren zur geziel-

ten Abschaltung von Systemelementen, energieeffiziente Algorithmen, d. h. solche, die möglichst wenig Rechenleistung benötigen, aber auch um energiesparende Hardware. Gleichzeitig gibt es Potenziale der IKT zur Optimierung der Energieeffizienz in anderen Systemen (eEnergy, Lastmanagement in Energie-Grids, virtuelle Kraftwerke etc.).

Schließlich zeigte sich, dass wichtige Schnittstellen zur Nanotechnologie in Form neuer Hardwaretechnologien (Nanoelektronik) bzw. neuer Rechnerarchitekturen (Quanteninformationstechnik) existieren.

Unter den Anwenderbranchen, die in den nächsten Jahren spezifische Forschungsfragen an die IKT stellen wird, wurde vor allem der Gesundheitsbereich (z. B. Mensch-Computer-Interaktion, Monitoring/ Expertensysteme in Diagnostik und Therapie) identifiziert.

Neue Technologien
Mikroenergiequellen für mobile Anwendungen (Brennstoffzellen, Energieeffizienz, Thermoelektrizität, »Energy harvesting«)
Nano-Technologie
Polymerelektronik
Miniaturisierung
Daten/ Information/ Wissen
Digital Archives
Knowledge mining
E-Science
Semantische Technologien (Semantische und audiovisuelle Ontologien, Automatische Indexierung und Erzeugng von Metadaten aus Multimediainhalten, Multimedia-Suchmaschinen (für herkömmliche und P2P Netze))
Integration heterogener Datenbestände
Mensch Computer Interaktion
Hands-free Computer Interfaces
Displays: 3-D, holografische Displays, Flexible Displays, Ambient Displays
Automatische Übersetzung: Text, Sprache in Echtzeit
Computerlinguistik
Intelligente Nutzerumgebung: Kontextsensitv, Adaptiv, fehlertolerant
Intelligente devices
Sensornetze, Pervasive Sensors, Smart Dust, Smart Grain
Proaktive kontextsensitive Systeme
Implants for Tracking and Identification
Robotik (Human Interactive Robots, Multipurpose Robots)
Intelligente Textilien
Wearable Computer
Seamless Networks
Übertragungstechnik
Seamless Networks
Unlimited Bandwith

Advanced Optical Networks
Wireless networks
Alternative Computer-Architekturen
Quanten-Informationstechnik (Quantencomputing, Quantenkryptografie)
Defect- and fault-tolerant architectures
Biomolecular (DNA) Computing
Molecular computing
Optical Computing
Neurocomputing
Bioinformatik
GridComputing
Verteilte Architekturen
Selbstorganisation
Kollektive Intelligenz (Kognition, Kooperation, Koordination)
Medizinische Anwendungen
Computer-Aided Surgery
Intelligent Artificial Limbs
Chip Implant for brains
Herausforderungen 2020
Digitale Medien
Produktion
E-Business
Kultur und Unterhaltung
Verkehr und Mobilität
E-Government
Medizin und Life Sciences
Kommunikation
Zugang zu Wissen
Dienstleistungen
Software
Robuste Systeme (Autonomic Computing - Selbst-Konfiguration, -Optimierung, -Heilung)
(Automatisierte) Entwicklung von Software, Anwendungen und Diensten (Werkzeuge, Methoden)
SW-Architektur (konvergierte Kommunikations- und Diensteinfrastruktur, verteilte serviceorientierte Architekturen)
Betriebssysteme
Simulation, virtuelle Realitäten
Qualität
Entwicklungsprozesse
Sicherheit
Biometrie
Datenschutz
Kryptografie
Persönlichkeitsschutz / Anonymisierungstools
Kommunikationssysteme
kollaboratives Arbeiten

Tabelle 8.2: Themen Informations- und Kommunikationstechnik im ersten Foresight-Workshop 2007

Bibliometrie

Ergänzt wurde der Prozess zur Identifikation und Bewertung von Zukunftsthemen von einer Publikationsanalyse, in deren Rahmen relevante Einträge im Science Citation Index (Klassifikation »Computer Science, Theory & Methods«) untersucht wurden. Diese Analyse deckt Themen wie experimentelle Methoden, Datenverarbeitung und Programmiermethoden ab – z. B. paralleles Computing, verteiltes Rechnen, logische und objektorientierte Programmierung und Hochleistungsrechner. Obwohl eine Auswahl von vier viel zitierten Aufsätzen die inhaltliche Breite des Zukunftsfelds IKT nicht abdecken kann, bestätigten die ermittelten Publikationen die Relevanz einiger Zukunftsthemen. Hierzu gehören: (1) Verteilte Systeme bzw. Grid Computing (Foster et al. 2001), (2) Sensornetzwerke (Ye et al. 2004) und (3) Quanteninformationstechnik (Latorre et al. 2004).

Monitoring-Panel

Im Rahmen der ersten Welle des internationalen Monitorings konnte im Zuge der Interviews mit den Panellisten die Einteilung und Sichtweise des Zukunftsfeldes der Informations- und Kommunikationstechnik, so wie sie in der Mindmap abgebildet waren, weitgehend bestätigt werden. Darüber hinaus wurden neue Themen zusätzlich in den Auswahlprozess aufgenommen. Im Folgenden werden die von den Panellisten angesprochenen Themen sowie ihre Bewertung wiedergegeben.

Aufgrund der steigenden Energiekosten und wegen des Klimawandels wird umweltfreundlicher und energieeffizienter IKT (»Green Computing«) ein hoher Stellenwert für die Forschung und Entwicklung in den nächsten 5 Jahren eingeräumt. Dabei soll die Energieeffizienz von Computersystemen durch verschiedene technische Maßnahmen (energiesparende Hardware, effizientere Algorithmen und Architekturen, neue Materialien) erhöht werden. Auch das so- genannte »Cloud Computing« (eine Weiterentwicklung des »Grid Computing«) soll dazu beitragen, den Energiebedarf durch IKT zu verringern, z. B. um die Auslastung von IKT-Systemen zu verbessern (vgl. Stobbe et al. 2009).

Ein großer Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten wird seitens der Panellisten in den nächsten Jahren bei der IT-Sicherheit, den »foundations of trustworthy computing« gesehen. Dies umfasst die Entwicklung von IKT-Systemen mit dem Fokus auf Zuverlässigkeit, Sicherheit, Datenschutz und Benutzerfreundlichkeit. Diese Aktivitäten werden als wichtige Voraussetzung für die Weiterentwicklung und Verbreitung von »online social networks« betrachtet.

Eine weitere Herausforderung liegt darin, Verfahren und Werkzeuge zu entwerfen, mit denen möglichst fehlerfreie und sichere IT-Systeme entwickelt werden

können. Dies ist nur möglich, wenn Sicherheitsaspekte (im Sinne einer Sicherstellung der Systemverfügbarkeit, aber auch der Sicherheit vor beabsichtigten Angriffen) von Beginn an bei der Entwicklung eines Systems mit berücksichtigt, entwickelt und integriert werden, so die Einschätzung der Befragten. Dies bedeutet vor allem bei Altsystemen[25] und dezentralen sowie spontan vernetzten Systemen eine Herausforderung, deren Strukturen nicht a priori bekannt sind.

Die Panel-Teilnehmerinnen und -Teilnehmer erklärten, dass in Zukunft das Thema Datenlebenszyklusmanagement deutlich an Bedeutung zunehmen werde. Das dauerhafte und revisionssichere Speichern und Löschen von Daten wird als besondere technisch-organisatorische Herausforderung angesehen. Dazu werden neue Speicherverfahren und -materialien benötigt, z. B. holografische Speicher. Zusätzlich erwarten sie, dass die Schlüsselverwaltung, insbesondere Konzepte zur Schlüsselrückgewinnung, sehr viel wichtiger werden.

Ein großer Forschungsbedarf wird bei wissensbasierten Systemen festgestellt, vor allem für Anwendungen in der Medizin und Bioinformatik.

Sicherheit (Vertrauenswürdigkeit von Daten und Informationen), Verknüpfung der sozialen und künstlichen Intelligenz, mobiles und vernetztes Leben und Lernen sowie Befähigung der heute noch nicht mit Digitaltechnik vertrauten Personen kennzeichnen ebenfalls die zukünftige Entwicklung auf dem IKT Gebiet.

Die Relevanz digitaler Lernspiele (so genannte ernsthafte Spiele bzw. »serious gaming«) wird als stark zunehmend bewertet, weil damit im Bildungs- und Ausbildungssystem oder in informellen Umgebungen die Wissensvermittlung interessanter und damit effektiver gestaltet werden kann. Dadurch ergeben sich Forschungsfragen sowohl für den IKT-Kernbereich (leistungsfähige Hardware, Softwareentwicklungswerkzeuge, Simulationsverfahren) als auch für angrenzende Gebiete wie die Psychologie oder die Lernforschung.

Auch das Expertenpanel betonte die hohe Relevanz alternativer Hardware-Architekturen. Vor allem werden neue Materialien zur weiteren Steigerung der Rechnerleistung als notwendig erachtet, um die Limitierungen der CMOS-Technologie zu überwinden (»beyond CMOS«). Als Erfolg versprechende Ansätze wurden Kohlenstoffnanoröhren und halbleitende Nanodrähte, Spintronik sowie Molekularelektronik genannt.

25 Als »Alt-« oder »Legacy Systeme« werden in der Wirtschaftsinformatik etablierte, historisch gewachsene Anwendungen im Bereich Unternehmenssoftware bezeichnet. Es handelt sich meist um großrechnerbasierte Individualentwicklungen, die oft von unzureichender Dokumentation, veralteten Betriebs- und Entwicklungsumgebungen, zahlreichen Schnittstellen und hoher Komplexität geprägt sind.

Im Rahmen der zweiten Welle des Monitorings wurde bestätigt, dass die bis dahin identifizierten Forschungsthemen ihre Einstufung als relevant behalten werden. Die Bedeutung von Software, Mensch-Computer-Interaktion und Energie wurde noch einmal betont. Im Bereich Energie sollen demnach Konzepte zum Energiemanagement und zur Steigerung der Energieeffizienz von und durch IKT entwickelt werden. Sie sollen dazu dienen, den Einsatz moderner Technologie zur Energiegewinnung und Energieverteilung zu unterstützen und zugleich die Energieeffizienz von IKT-Systemen zu steigern. Eine mögliche Lösung verspricht der Einsatz von Wasser- statt Luftkühlungen für Hochleistungsrechner. In diesem Zusammenhang wurde vorgeschlagen, Konzepte für die Nutzung der Abwärme zu entwickeln und zu implementieren.

Erheblicher Forschungsbedarf wurde im Rahmen der international geführten Interviews bei der Softwaretechnik gesehen. Software übernimmt in immer mehr Anwendungen Funktionen, die bislang als Hardware realisiert waren, und erlaubt so eine dynamische Weiterentwicklung technischer Systeme. Zum einen wurde konstatiert, dass die Softwaretechnik bislang vielfach nicht mit den Fortschritten bei der Hardware Schritt halten kann. Zum anderen ist für viele Anwendungen spezielles Fachwissen aus verschiedenen Disziplinen notwendig, das für die Berücksichtigung systemischer Zusammenhänge, in denen Software entwickelt und eingesetzt werden, erforderlich ist. Darüber hinaus werden künftig neue mathematische Verfahren und Programmiermethoden für die Modellierung von Software eine entscheidende Rolle spielen, primär bei rechenintensiven Anwendungen, etwa in der Systembiologie oder bei der Simulation komplexer Systeme.

Das Thema Mensch-Computer-Interaktion erfordert schließlich nach Einschätzung der Panellistinnen und Panellisten die Entwicklung und Umsetzung neuer Konzepte im Bereich Sensorik, Aktorik und künstliche Intelligenz, damit bei wachsender Komplexität der Anwendungen und sinkenden physischen Dimensionen eine effiziente IKT-Nutzung möglich bleibt. Anwendungen, die mit dem stark umstrittenen Begriff des »enhancement« verbunden werden, erfordern neue Mensch-Technik-Schnittstellen und Interaktionsformen. Aber auch Anwendungen im Bereich des Verkehrs oder der Medizin verlangen neue MCI-Lösungen (»hands-free interaction«) (Fejtová et al. 2009).

Online-Befragung

Aus den Startthemen sowie den Ergänzungen aus der ersten Welle des internationalen Monitorings wurden die folgenden zwölf Themen mit Unterthemen abgeleitet, um sie in der nationalen Online-Befragung hinsichtlich Relevanz, Bedeutung und Forschungsintensität bewerten zu lassen. In der Online-Befragung wurden aufgrund der Vorrecherchen die folgenden Zukunftsthemen mit

ihren jeweiligen Forschungsfragen (insgesamt 48) zur Diskussion gestellt (siehe Tabelle 8.3).

Alle betrachteten IKT-Themengebiete wurden von den Expertinnen und Experten als wichtig bis sehr wichtig eingestuft. Dabei wurden in erster Linie aktuell diskutierte Themen wie Sicherheit oder Energieeffizienz als besonders relevant erachtet. Allerdings wurden die in diesen Gebieten wichtigen Forschungsfragen als eher kurzfristig relevant eingeschätzt. Dies deutet aus Sicht der Themenkoordinatoren darauf hin, dass die Experten bei »Modethemen« die Relevanz über- und die Probleme unterschätzen könnten. Auffällig ist weiterhin: Das Thema Energieautarkie von IKT-Systemen wurde gegen den Trend als weniger wichtig bewertet – möglicherweise, weil dieses Teilgebiet keinen unmittelbaren Bezug zu den großen Herausforderungen wie Klimawandel aufweist. Beim Themengebiet IT-Sicherheit erwarten die Experten und Expertinnen, dass es auch in zehn Jahren und darüber hinaus ein wichtiges Forschungsthema bleiben wird. Offenbar wird Sicherheit langfristig als eine zentrale Voraussetzung erachtet, an der kontinuierlich gearbeitet werden muss.

Auch Themengebiete außerhalb des engen disziplinären Rahmens (Prozessüberwachung und -management im Gesundheitswesen) wurden als weniger wichtig erachtet. Dabei wird häufig darauf hingewiesen, die eigentlichen Forschungsfragen seien hier bereits gelöst und müssten »nur noch in die praktische Anwendung« überführt werden. Genau dies wird in der Regel von Experten und Expertinnen aus den Anwendungsgebieten als Forderung an die Forschung formuliert. Offenbar erhalten die Schnittstellen der IKT mit den Anwendungsbranchen noch nicht die nötige interdisziplinäre Aufmerksamkeit.

Ein besonders hoher Nutzen für die Lebensqualität wird von neuen Entwicklungen in der Mensch-Computer-Interaktion und IKT-Anwendungen im Gesundheitswesen erwartet. Als wichtige Impulsgeber für andere Bereiche von Wissenschaft und Technik gelten neue Hardware-Technologien und alternative Computer-Architekturen.

Nur bei sehr wenigen Themen erwarten die Experten und Expertinnen den Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten später als in fünf Jahren. Dies hat seine Ursache in der hohen Entwicklungsdynamik der IKT-Branche. Entwicklungszyklen von Software liegen bei etwa einem Jahr, jene der Hardware bei etwa eineinhalb Jahren. Die wenigsten Forschungsakteure planen über einen Zeithorizont von fünf Jahren hinaus. Langfristig werden die Perspektiven für noch sehr stark in der Grundlagenforschung befindliche Themen bzw. solche mit erheblichen Umsetzungsproblemen bewertet. Dazu gehören die Quanteninformationsverarbeitung, selbstorganisierende Hard- und Software, Hardwaretechnologie jenseits von Silizium (siehe auch Nanotechnologie) und Fragen der künstlichen Intelligenz.

Neben dem frühen Entwicklungsstadium werden weitere Gründe für die Langfristigkeit bestimmter Forschungsthemen angeführt. Beispielsweise beklagen die Expertinnen und Experten im Rahmen der Online-Befragung bei der Quanteninformationsverarbeitung, der Energiegewinnung aus der Umgebung (»energy harvesting«) und bei Sensornetzen die unzureichende Forschungsinfrastruktur in Deutschland. Bei interdisziplinären Themen wie Selbstorganisation von Hard- und Software, biomolekularen Ansätzen der Informationsverarbeitung, Nanotechnologie und künstliche Intelligenz gilt aus Expertensicht die Ausbildung, die zu wenige und nur unzureichend interdisziplinär qualifizierte Arbeitskräfte hervorbringt, als auffallendes Hemmnis. Für einige Forschungsthemen aus dem Bereich künstliche Intelligenz wie »Affective Computing«, verteilte oder Multiagentensysteme werden eine unzureichende Akzeptanz bzw. gesellschaftliche Bedenken als Hindernisse genannt. Bei fast allen »späten Forschungsthemen« (vor allem aber beim »energy harvesting«) wird das Fehlen von Promotoren als Problem beklagt.

Bei den Themen, deren höchste Forschungsintensität sehr früh angesetzt wurde, handelt es sich um solche, die in jüngster Vergangenheit sehr populär waren und sich mittlerweile als »Modethemen« herausstellten. Dazu gehören Themen aus dem Umfeld des Web 2.0 wie beispielsweise Ontologien (Netzwerke von Informationen mit logischen Relationen) und Folksonomien (gemeinschaftlich indexierte Sammlungen von Schlagwörtern) sowie so genannte Web-Services, die direkte Interaktion mit anderen Software-Agenten unter Verwendung XML-basierter Nachrichten ermöglichen, und Service-orientierte Architekturen (SOA).

Bei Themen aus dem Gebiet Energieeffizienz kommt zum Tragen, dass sie wegen der momentan beginnenden Förderung durch die Bundesregierung und die Europäische Kommission erheblich an Forschungsdynamik gewinnen. Dies gilt selbst dann, wenn die Einschätzung, die wichtigsten Forschungsfragen und Probleme könnten innerhalb von zwei bis fünf Jahren gelöst sein, zu optimistisch sein sollte. Der Begriff des »Grid Computing«, also die gemeinsame, koordinierte Nutzung von Rechenressourcen, wird momentan durch andere Begriffe wie »Cloud Computing« abgelöst, auch wenn sich dahinter durchaus ähnliche Konzepte verbergen. Diese Themen sollten, so die Schlussfolgerung der Themenkoordinatoren, nochmals gründlich daraufhin untersucht werden, ob sich dahinter langfristige Forschungsfragen verbergen, die jenseits von Begriffsmoden weiterverfolgt werden sollten.

Das Monitoring und die Online-Befragung haben nochmals die Bedeutung einer Reihe von Forschungsgebieten unterstrichen (Energieeffizienz, IT-Sicherheit, Mensch-Maschine-Interaktion und Softwaretechnik), die bereits mehr oder weniger lange auf der Agenda von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik stehen. Deshalb wurde im Rahmen des Foresight-Prozesses darauf verzichtet, sie ver-

tieft weiter zu verfolgen, auch wenn in den kommenden Jahren noch erheblicher Forschungsbedarf besteht.

Auswahl Zukunftsthemen

Die meisten der Zukunftsthemen mit langfristiger Perspektive befassen sich mit der Fortentwicklung der Informations- und Kommunikations-Basistechnologie.

Im Gebiet alternative Computer-Architekturen wurden vor allem Ansätze der Quanteninformationstechnik und der selbstorganisierenden rekonfigurierbaren Architekturen, so genannte »Growable Electronics«, als höchst aussichtsreich bewertet. Darüber hinaus sind vor allem Aspekte der Bottom-up-Nanoelektronik von großer Bedeutung. Zusammengenommen spiegeln diese drei Zukunftsthemen die Einschätzung wider, dass die konventionelle Elektronik und verbreitete Computer-Architekturen innerhalb weniger Jahre an physikalische bzw. Komplexitätsgrenzen stoßen werden, die radikal neue Ansätze notwendig machen. Es ist allerdings klar, dass dieser Technologiewechsel durchaus disruptiven Charakter haben kann, weil eine Kompatibilität mit bestehenden Systemen und Produktionsverfahren nicht von vornherein gegeben ist, sondern erst geschaffen werden muss.

Jenseits der Debatte über den Energieverbrauch von IKT wird die Energieversorgung von mobilen Endgeräten und Anwendungen als ein wichtiger Engpassfaktor betrachtet. Aus diesem Grund bewerten die Experten und Expertinnen Ansätze zur Gewinnung von Energie aus der Umgebung (»energy harvesting«) als lohnenswertes langfristiges Forschungs- und Entwicklungsthema. Wegen der großen Bedeutung wurde das Thema »Mikro-Energie aus der Umgebung« innerhalb des eigenständigen Zukunftsfeldes »Energielösungen« weiter bearbeitet.

Sensornetze (oder auch »Smart Dust«) werden von den Expertinnen und Experten als zentrales Element bei der weiter zunehmenden »Mobilisierung« von IKT verstanden und deswegen als wichtiges Forschungsgebiet bewertet.

An vielen Stellen im Prozess wurde deutlich, dass in Zukunft Simulationen eingesetzt werden müssen, um schon im Vorfeld der Entwicklung Erkenntnisse über das Verhalten von technischen Systemen zu gewinnen – und zwar nicht nur im Bereich der IKT. Dazu sind neben Wissen über die zu simulierenden Systeme auch neue mathematische und Programmierverfahren für die Modellierung notwendig. Besonders deutlich ist dies bei der Simulation komplexer biologischer Systeme (so genannter Systembiologie) geworden. Schließlich ist die Entwicklung einer neuen Generation von Hochleistungscomputern (sei es durch Parallelisierung von Millionen von Prozessoren oder unter Nutzung nicht-konventioneller Architekturen) Voraussetzung für eine ausreichend detaillierte

Simulation (siehe auch Zukunftsfeld neuen Zuschnitts Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation im Bericht »Zukunftsfelder neuen Zuschnitts«).

Über die sechs genannten Zukunftsthemen hinaus gibt es weitere Forschungsthemen mit Langzeitperspektive, die von den Expertinnen und Experten allerdings aus unterschiedlichen Gründen als weniger relevant bewertet wurden. Dazu zählen die Polymerelektronik, kollektive bzw. verteilte künstliche Intelligenz, Multiagentensysteme, »Affective Computing« sowie biomolekulare Informationsverarbeitung.

8.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick

Die folgende Tabelle 8.3 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Zukunftsthemen im BMBF-Foresight-Prozess. **Themen nach 1. Recherche** sind die Themen aus den Prozessen der Fachreferate (sofern sie nicht aussortiert wurden, weil sie bereits auf der Forschungsagenda stehen) und aus der ersten Literaturanalyse. **Themen nach 1. Workshop** sind diejenigen Themen, die nach dem 1. Workshop besonders verfolgt werden sollten. **Themen Online-Befragung** sind in die Online-Befragung eingegangen, bedeuteten also eine weitere Zusammenfassung der Zwischenergebnisse, die in der Befragung bewertet wurden. Und die **Themen nach Kriterienfilter** sind bereits »Zukunftsthemen«, die in der letzten Phase des Prozesses untersucht wurden. Sie sind in der Regel sehr ähnlich den am Ende des BMBF-Foresight-Prozesses vorgeschlagenen Zukunftsthemen (siehe erste Tabelle dieses Kapitels). Durch letzte Recherchen und Experteninterviews sind jedoch noch einige Zukunftsthemen modifiziert worden.

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Neue Technologien	**Kernbereich**	**Alternative Computer-Architekturen**	Selbstorganisierende Computer Architekturen (Growable electronics)
Mikroenergiequellen für mobile Anwendungen (Brennstoffzellen, Energieeffizienz, Thermoelektrizität, »Energy harvesting«)	Social Computing	Quantencomputer: Extreme Verkürzung der Rechenzeiten dank Quantenparallelismus	Bottom-up Nanoelektronik (Beyond CMOS)
Nano-Technologie	Data Lifecycle Management	Quantenkryptografie einsatzfähig machen	
Polymerelektronik	Software Engineering der nächsten Generation	Biomolekulare Informationsverarbeitung	**Sicherheit/ Vertrauenswürdigkeit von IKT Systemen (in MTK)**
Miniaturisierung	Metadesign	Selbstorganisierende rekonfigurierbare Architekturen (growable electronics)	
Mensch Computer Interaktion	Qualitätsmessung	**Mensch-Computer-Interaktion**	**Internet der Dinge (in MTK)**
Hands-free Computer Interfaces	Softwarewartung	Situations-, kontext- und nutzeradaptive Interfaces	Quanteninformationstechnik
Displays (3-D, holografische Displays, flexible Displays, ambient Displays)	Adaptive selbstkonfigurierende Systeme	Affective Computing	Sensornetze/ Smart Dust
Automatische Übersetzung (Text, Sprache in Echtzeit)	Mensch-Maschine-Interaktion (Usability Engineering, Schnittstellen für immersive Erfahrungen, Visual Analytics)	Wearable computers	
Computerlinguistik	**Schnittstellen**	Hands-free computer interfaces	**Energie aus der Umgebung: in Mikroenergie aus der Umgebung gewinnen)**
Intelligente Nutzerumgebung (Kontextsensitv, adaptiv, fehlertolerant)	Quanteninformationsverarbeitung	Usability Engineering	
Intelligente devices	Kopplung von Lebewesen und IT (Nervenzellchip, Neuroprothesen)	Visual Analytics	
Sensornetze, Pervasive Sensors, Smart Dust, Smart Grain	Intelligente Abstimmung von Verbrauch und Erzeugung im Energiebereich, Energieeffizienz	**Energieeffiziente IKT**	
Proaktive kontextsensitive Systeme	Erkennen von Traits	Energieeffiziente Kühlkonzepte für Rechenzentren	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Implants for Tracking and Identification	Body Area Networks	Energieoptimierungen der Prozessor- und Software-Architekturen	
Robotik (Human Interactive Robots, Multi-purpose Robots)	P2P	Berücksichtigung des Energieverbrauchs durch Modellbildung in der Entwicklungs-phase	
Intelligente Textilien	Location based/ context sensitive Services	Energieoptimierung für Serversysteme	
Wearable Computer	Digitalisierung & Geschäftsmodelle	**Energieautarkie von IKT-Systemen**	
Seamless Networks	IKT zur Energieoptimierung technischer Systeme	Energiegewinnung aus der Umgebung	
Übertragungstechnik		Praxistaugliche Mikro-Brennstoffzellen	
Seamless Networks		**Energieeffizienz durch IKT-Einsatz**	
Unlimited Bandwith		Energieeffizienter Betrieb von technischen Systemen durch Nutzung von IKT	
Advanced Optical Networks		IKT ermöglicht den Aufbau dezentral orga-nisierter Energieversorgungssysteme hoher Effizienz	
Wireless networks		Energieeinsparung durch Kooperationssys-teme	
Anwendungsarchitekturen		**Neue Hardware-Technologien**	
Intelligente Wissensinfrastruktur		Bottom-Up Nanoelektronik - Beyond CMOS	
SOA (Serviceorientierte Architekturen)		Optoelektronik	
Webservices		Polymerelektronik	
Medizinische Anwendungen		**Prozessüberwachung und -management im Gesundheitswesen**	
Computer-Aided Surgery		Verbesserung oder Sicherstellung von Funk-tionen im Krankenhaus durch IKT-Einsatz	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Intelligent Artificial Limbs		Verbesserung oder Sicherstellung der Hygiene im Krankenhaus durch IKT-Einsatz	
Chip Implant for brains		Verbesserung oder Sicherstellung des Zugangs im Krankenhaus durch IKT-Einsatz	
Software		Verbesserung der Hersteller-Kunden-Beziehung im Gesundheitssektor durch IKT-Einsatz	
Robuste Systeme (Autonomic Computing – Selbstkonfiguration, -optimierung, -heilung)		**Softwaretechnik/ Software Engineering**	
(Automatisierte) Entwicklung von Software, Anwendungen und Diensten		Metadesign	
SW-Architektur (konvergierte Kommunikations- und Diensteinfrastruktur, verteilte serviceorientierte Architekturen)		Komponentenbasierte Softwareentwicklung	
Betriebssysteme		Automatische Entwicklung von Software, Anwendung und Diensten (Generative Programmierung)	
Simulation, virtuelle Realitäten		**Sicherheit und Vertrauenswürdigkeit von IKT-Systemen**	
Qualität		Sicherheit und Vertrauen in unsicheren Umgebungen	
Entwicklungsprozesse		Verfahren und Kriterien für die Bewertung von Vertrauen.	
Sicherheit		Neue Konzepte für Datenschutz in digitalen Umgebungen	
Biometrie		**Verteilte Systeme**	
Datenschutz		Grid Computing	
Kryptografie		Sensornetze/ Smart Dust	
Persönlichkeitsschutz/ Anonymisierungstools		Ad-hoc-Netze	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Kommunikationssysteme		**Wissensbasierte Systeme und künstliche Intelligenz, Wissensmanagement**	
Kollaboratives Arbeiten		Integration heterogener Datenbestände	
Daten/ Information/ Wissen		Standardisierung von Wissensbasen für spezifische Anwendungsfelder (z. B. in der medizinischen Diagnoseunterstützung)	
Digital Archives		Knowledge mining/ Wissensmanagement	
Knowledge mining		Ontologien	
E-Science		Folksonomien	
Semantische Technologien (Semantische und audiovisuelle Ontologien, automatische Indexierung und Erzeugung von Metadaten aus Multimediainhalten, Multimedia-Suchmaschinen für herkömmliche und P2P Netze)		Semantische Technologien	
Integration heterogener Datenbestände		Extraktion von Metadaten aus Audio- und Videodaten	
		Meta-Suchmaschine	
		Kollektive Intelligenz/ Verteilte künstliche Intelligenz	
		Agententechnik	
		Multiagentensysteme	

Tabelle 8.3: Entstehung der Zukunftsthemen Informations- und Kommunikationstechnologie – Zwischenstände

8.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern

Als Querschnittstechnologie hat die Informations- und Kommunikationstechnologie viele Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern. Bei der Hardware als physischer Basis der IKT werden die wichtigsten Impulse aus der Nanotechnologie und der Werkstoffforschung kommen.

Kognitionsforschung und Psychologie liefern wichtige Grundlagen für die weitere Entwicklung der Mensch-Computer-Interaktion. Das Verständnis menschlicher Informationsverarbeitung wird für die Wissensrepräsentation und -verarbeitung immer wichtiger.

Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodelle hängen in den meisten Wirtschaftsbranchen mittlerweile von einer effizienten informationstechnischen Unterstützung ab. Auch wenn die meisten Expertinnen und Experten dies nicht als Forschungsthema für die Informatik bzw. Informationstechnik auffassen, besteht erheblicher Forschungsbedarf zu der Frage, wie IKT künftig in betriebliche Abläufe integriert werden sollte, um – wie im Fall von neuen Dienstleistungen – zu einer Quelle der Wertschöpfung zu werden.

Themenkoordination:
Dr. Michael Friedewald, ISI (michael.friedewald@isi.fraunhofer.de) und
Theodor Malcotsis, IAO, (theodor.malcotsis@iao.fraunhofer.de)

9 Lebenswissenschaften und Biotechnologie

Lebenswissenschaften und Biotechnologie erforschen lebende Organismen (Mikroorganismen und Zellkulturen, Pflanzen, Tiere, Mensch) und ihre Bestandteile (Enzyme und andere Proteine, DNA, RNA, Metabolite, Regulationsnetzwerke) und nutzen ihre Leistungen für technische Zwecke, d. h. für Forschungsmethoden, Verfahren, Produkte und Dienstleistungen. Die Hauptanwendungsbereiche liegen in Forschung und Entwicklung, Medizin und Gesundheit, Landwirtschaft, Lebensmittel und Ernährung, industrieller Produktion, Umweltschutz, Analytik und Bioenergieproduktion. Hierbei leisten Gentechnik, Molekularbiologie, Bioinformatik, Systembiologie und Ingenieurwissenschaften wesentliche Beiträge.

9.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Lebenswissenschaften und Biotechnologie

Biomassebasierte, nachhaltige biotechnische Produktion
Biotechnologie für Energie- und Materialeffizienz über den gesamten Produktlebenszyklus
Biologische Produktionsplattformen
Bioraffinerien der zweiten Generation - Optimierung und Steuerung durch Simulation (»Digitale Bioraffinerie«) - Einbindung in globale Wertschöpfungsketten - Lösung von Land- und Biomasse-Nutzungskonflikten
Neue biologische Prinzipien mit Querschnittscharakter
Vielfalt biologischer Funktionen als biotechnologische Ressource
RNA-Technologien
Epigenetik und Epigenomik
Entwicklungsbiologie und Alternsprozesse
Molekulare biologische Produktion
Miniaturisierung der industriellen Produktion mit Hilfe von Molekular-, System und Synthetischer Biologie sowie Nanobiotechnologie
Entwicklung miniaturisierter Produktionstechnologien und -verfahren
Energieversorgung der miniaturisierten Produktion mit neuen Systemen, die die Umgebungsenergie nutzen

Tabelle 9.1: Identifizierte Zukunftsthemen Lebenswissenschaften und Biotechnologie im Überblick

Neben der kontinuierlichen Weiterentwicklung in den oben genannten Hauptanwendungsbereichen durch Fortschreibung der aktuellen Forschungs- und Förderschwerpunkte wurden im Foresight-Prozess Zukunftsthemen identifiziert. Im Zukunftsfeld Lebenswissenschaften und Biotechnologie wurden diese noch einmal nach ihrem Querschnittscharakter neu zusammengesetzt (Cluster). Diese

Cluster bilden noch kein Zukunftsfeld neuen Zuschnitts, sind aber umfassender als einzelne Zukunftsthemen. Tabelle 9.1 zeigt einen Überblick über die Cluster und Zukunftsthemen.[26]

Die drei Zukunftscluster sind:

- Neue biologische Prinzipien mit Querschnittscharakter
- Biomassebasierte, nachhaltige biotechnische Produktion
- Molekulare biologische Produktion

Diese Zukunftscluster werden in den folgenden Abschnitten näher charakterisiert. In Abschnitt 9.2 wird ihre Genese im Verlauf des Foresight-Prozesses erläutert.

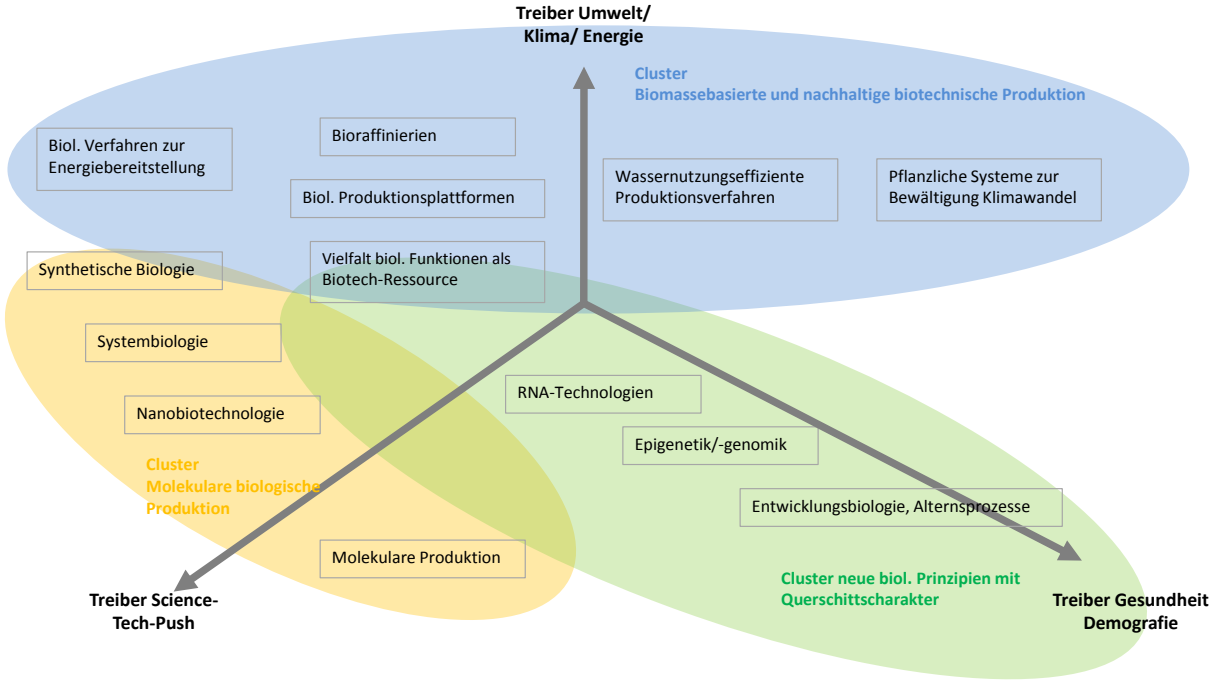

Abbildung 6: Zukunftscluster im Feld Lebenswissenschaften und Biotechnologie

26 Dunkelgrau hinterlegt sind in der Tabelle die Zukunftscluster, hellgrau hinterlegt sind die Zukunftsthemen.

Zukunftscluster »Neue biologische Prinzipien mit Querschnittscharakter«

Das Cluster »Neue biologische Prinzipien mit Querschnittscharakter« umfasst Zukunftsthemen von ausgesprochenem Querschnittscharakter, die vor allem wichtige Erkenntnisse für Wissenschaft und Technologie erwarten lassen und als Impulsgeber für andere Forschungsgebiete dienen werden. Die Zukunftsthemen sind:

- Vielfalt biologischer Funktionen als biotechnologische Ressource
- RNA-Technologien
- Epigenetik und Epigenomik
- Entwicklungsbiologie und Alternsprozesse

Eine breite Nutzung der Erkenntnisse in diesen grundlagenorientierten Forschungsgebieten für neue Produkte, Verfahren und Dienstleistungen wird in etwa 10 bis 15 Jahren erwartet. Maßnahmen zur Ausschöpfung dieses Potenzials liegen aus Sicht der Autoren vor allem im Aufbau kritischer Masse an Forschungskapazitäten und Forschungsinfrastruktur sowie in spezifisch qualifiziertem Personal sowie dem Transfer der Erkenntnisse in Anwendungen.

Zukunftscluster »Biomassebasierte und nachhaltige biotechnische Produktion«

Getrieben durch Klimawandel und die Verknappung fossiler Rohstoffe ergibt sich einerseits die Notwendigkeit zur **Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz in der industriellen Produktion über den gesamten Produktlebenszyklus**. Dies wird im Zukunftsfeld »Industrielle Produktionsprozesse« als wichtigste langfristige Aufgabe mit der größten Bedeutung für die wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands eingeschätzt. Weil biokatalytische Verfahren unter milden Reaktionsbedingungen mit hoher Selektivität und Spezifität arbeiten, leisten sie wesentliche Beiträge zur Optimierung konventioneller Produktionsverfahren im Hinblick auf Energie- und Ressourceneffizienz. Andererseits muss parallel dazu Biomasse als regenerativer industrieller Rohstoff auf breiter Basis erschlossen werden, um zunehmend fossile Rohstoffe zu substituieren. 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.

Durch Weiterentwicklung der etablierten **biologischen Produktionsplattformen, unter anderem unter Rückgriff auf die Diversität biologischer Funktionen** als biotechnische Ressource, werden zum einen verstärkt biotechnische Prozessschritte und Prozesse in industrielle Produktionsverfahren inte-

griert, um die Energie- und Ressourceneffizienz zu erhöhen. Zudem wird Biomasse ressourcenschonend, auch unter ungünstigen klimatischen Bedingungen und in maßgeschneiderter Form für industrielle Produktionsverfahren bereitgestellt und in **Bioraffinerien** zu einer Vielzahl von Produkten (z. B. Chemikalien, Werkstoffe, Gebrauchsgüter, flüssige, feste und gasförmige Bioenergieträger und -kraftstoffe der zweiten Generation auf der Basis von Holz und Abfällen) umgewandelt. Dabei kommt **pflanzlichen Produktionssystemen** sowohl für die Bereitstellung der Biomasse, bei der Herstellung von Produkten sowie bei der Kontrolle von Prozessemissionen (CO_2, Methan) eine zentrale Rolle zu.

Zukunftscluster Molekulare biotechnische Produktion

Getrieben durch neue wissenschaftlich-technische Erkenntnisse und Methoden auf den Gebieten der Nutzung der Diversität biologischer Funktionen als Ressource, der angewandten Systembiologie, der synthetischen Biologie und der Nanobiotechnologie und durch Trends zur Miniaturisierung der industriellen Produktion werden neuartige Produktionsformen entwickelt, die auf einer Miniaturisierung der Produktionsmittel selbst beruhen und eine industrielle Fertigung komplexer Architekturen unter Nutzung der Selbstorganisation und Selbstanordnung biobasierter Komponenten sowie den Aufbau der Produkte und Materialien aus einzelnen Molekülen ermöglichen.

9.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen

Start des Prozesses

Bei der Erarbeitung der Zukunftsthemen wurde von vornherein keine vollständige Abdeckung des Zukunftsfeldes »Lebenswissenschaften und Biotechnologie« angestrebt. Vielmehr wurde davon ausgegangen, dass die aktuellen Forschungs- und Förderschwerpunkte kontinuierlich fortgeschrieben und weiterentwickelt werden. Das Hauptaugenmerk lag daher auf Zukunftsthemen, die sich heute erst in einem frühen Stadium der Forschung und Entwicklung befinden, für die Zukunft aber ein großes Potenzial erwarten lassen, bzw. solche Forschungsgebiete, die bereits heute von großer Bedeutung sind, für die sich jedoch Veränderungen abzeichnen und die gerade deswegen einer zukunftsorientierten Überprüfung unterzogen werden sollten.

Auf der Basis der Kenntnis des Zukunftsfeldes, der Analyse einschlägiger Fachliteratur, aktueller Foresight-Studien und Technologiestudien wurden zunächst die acht Zukunftsthemen erarbeitet und auf dem Foresight-Workshop 2007 mit ausgewählten Expertinnen und Experten diskutiert, modifiziert und bewertet (siehe Tabelle 9.3).

Alle im Zukunftsthemenpapier vorgeschlagenen Zukunftsthemen wurden von den Experten als relevant und weiterverfolgenswert bewertet. In manchen Fällen wurden Hinweise auf besonders lohnende Vertiefungen bzw. Schwerpunktsetzungen innerhalb der Zukunftsthemen gegeben, die unten näher ausgeführt werden. Eine Übersicht bietet die folgende Tabelle.

Biologische Produktionsplattformen
Neue Plattformen
Optimierung, Ausweitung Produktspektrum
Integration Bioproduktion und klassische industrielle Produktion
Wissensbasis für Regulation (Zulassung, Sicherheit, etc.)
Bioraffinerien 2. Generation
Bioraffineriekonzepte
Ausweitung Produktspektrum
Optimierte und neue Prozesse und -kombinationen
Wissensbasis für strategische Entscheidungen
Biodiversität als Biotech-Ressource
Anwendung neuer Technologien zur Erforschung der Biodiversität
Technische Nutzung der Funktionsvielfalt
Internationale Kooperation: Infrastrukturen, Ressourcenzentren
RNA-Technologien
Erforschung von RNA-Funktionen und Mechanismen, besonders ncRNAs
Entwicklung kommerzialisierbarer Anwendungen - Forschungstool - Analytik, Diagnostik - Targetidentifizierung, -validierung - Pharmazeutika
Epigenetik
Mensch statt Maus
Epigenetik -> Epigenomik
Entwicklung kommerzialisierbarer Anwendungen
Synergien zu Krebsforschung, Stammzellbiologie, Regenerativer Medizin, etc.
Entwicklungsbiologie und Alterungsprozesse
klinisch orientierte Grundlagenforschung - Entwicklungsbiologie adulter Organismen - Alterungsprozesse
Entwicklung kommerzialisierbarer Anwendungen
Synergien zu Stammzellbiologie, Regenerative Medizin, Altersforschung, Reproduktionstechnik
Angewandte Systembiologie
Anwendungsorientierte Forschung (Pharma-FuE, Industrielle Biotechnologie, Pflanzenzüchtung)
Kommerzialisierbare Dienstleistungen und Geräte
Synergien zu Synthetischer Biologie
Infrastrukturen
Synthetische Biologie
Nationale Scientific Community, Forschungsförderung und Infrastruktur etablieren
Lebewesen mit neuen Eigenschaften
Biomimetische Chemie
Minimalorganismus

Weitere Zukunftsthemen
Pflanzenbiotechnologie
Bioenergie
Bionik
Neuronale Netze
Aquakultur
Biomaterialien und -oberflächen

Tabelle 9.2:Themen Lebenswissenschaften und Biotechnologie im ersten Foresight-Workshop 2007

Neue Zukunftsthemen wurden a) innerhalb des Zukunftsfeldes Biotechnologie, b) an Schnittstellen zu den Zukunftsfeldern Gesundheit, Materialwissenschaften, Nanotechnologie, IKT, Kognitions- und Neurowissenschaften, Energie und Infrastrukturen (Wasser) vorgeschlagen. Letztere wurden im weiteren Prozessverlauf mit den jeweiligen Themenkoordinatoren und -koordinatorinnen inhaltlich diskutiert, präzisiert, ggf. in ihrem Zuschnitt verändert und in die Interviews mit den Monitoring-Expertinnen und -Experten integriert. Zudem wurde eine Zuordnung vorgenommen, in welchem Feld das jeweilige Zukunftsthema prioritär weiter untersucht werden sollte.

Für zentrale Themen wird dies unten näher erläutert. Die Auswertung der bibliometrischen Analyse bestätigte viele der identifizierten Themen, ergab jedoch keine Hinweise auf neue, d. h. auf andere Weise noch nicht identifizierte Zukunftsthemen.

Foresight-Workshop 2007

Ausgehend vom Themenstrang »Entwicklungsbiologie und Alternsprozesse« wurde auf dem Workshop die Demenzforschung und -behandlung von den Teilnehmern neu formuliert und als hoch relevant bewertet. Dem lag die Überlegung zugrunde, dass angesichts des demografischen Wandels und der ausgeprägten Altersabhängigkeit von Demenzerkrankungen die Zahl der dementen Menschen stark ansteigen wird. Die Biotechnologie kann Beiträge zur Erforschung der Ursachen und des Verlaufs von Demenzerkrankungen, zur Entwicklung von Diagnoseverfahren sowie zu präventiven Interventionen und medikamentösen Behandlungen leisten. Damit fasst dieses Thema Aspekte aus verschiedenen, vom Projektteam vorgeschlagenen Zukunftsthemen problem- und bedarfsorientiert zusammen. Dies sind insbesondere »Entwicklungsbiologie und Alterungsprozesse« sowie im Zukunftsfeld Gesundheitsforschung »Neue Krankheiten«, »Molekulare Analytik und Diagnostik«, »Neue Therapieprinzipien«, »Enhancement« und im Zukunftsfeld Kognitions- und Neurowissenschaften die Themen »Forschung und Behandlung von Erkrankungen des Gehirns und Nervensystems«, »Neuro-Enhancement« sowie »Lernen bei Demenz/ Lernen im hohen Alter«. In Abstimmung mit den Zukunftsfeldern Gesundheitsforschung, Neurowissenschaften und Lernforschung wurde beschlossen, trotz der hohen Relevanz das Thema »Demenzforschung und -behandlung« nicht

weiter in diesem Zuschnitt zu untersuchen, da es bereits in der Gesundheitsroadmap des BMBF abgedeckt wurde und zudem durch die BMBF-Leuchtturmprojekte »Demenz« sowie die Gründung des Nationalen Demenz-Forschungszentrums bearbeitet wird. Vielmehr flossen die beiden Themen »Demenz« und »Entwicklungsbiologie und Alternsprozesse« in das Zukunftsfeld neuen Zuschnitts »Das Altern entschlüsseln« ein.

Da im Zukunftsfeld »Lebenswissenschaften und Biotechnologie« sehr viele Zukunftsthemen identifiziert wurden, die miteinander in Verbindung stehen, wurde herausgearbeitet, inwieweit sich die Perspektiven verändern. Daraus ergaben sich drei neue Zukunftscluster, die mehrere einzelne Zukunftsthemen umfassen.

Erarbeitung der Zukunftsthemen im Zukunftscluster »Neue biologische Prinzipien mit Querschnittscharakter«

Die vier Zukunftsthemen »Vielfalt biologischer Funktionen als biotechnologische Ressource«, »RNA-Technologien«, »Epigenetik und Epigenomik« sowie »Entwicklungsbiologie und Alternsprozesse« des Zukunftsclusters »Neue biologische Prinzipien mit Querschnittscharakter« waren durch die Analyse von Fachzeitschriften und Technologiestudien identifiziert worden. Da sie sowohl im Berlin-Workshop, als auch in den Monitoring-Interviews in ihrer Relevanz und ihrem inhaltlichen Zuschnitt bestätigt worden waren, wurden sie in weitgehend unveränderter Form in die Online-Befragung übernommen. Dabei wurde das Zukunftsthema RNA-Technologien wegen seiner zurzeit hohen Relevanz für medizinische Anwendungen in der Online-Befragung dem Zukunftsfeld Gesundheitsforschung zugeordnet. Da die hohe Relevanz und das Potenzial als Impulsgeber für weitere Felder für alle vier Zukunftsthemen auch in der Online-Befragung bestätigt wurden, bilden sie zusammen das Zukunftsfeld »Neue biologische Prinzipien mit Querschnittscharakter«.

Die folgenden Zukunftsthemen wurden zum Zukunftscluster »Neue biologische Prinzipien mit Querschnittscharakter« zusammengefasst:

Vielfalt biologischer Funktionen als biotechnologische Ressource: Die Gesamtheit der von Lebewesen und Organismengemeinschaften bereitgestellten biologischen Funktionen ist bislang nur unvollständig bekannt. Zugleich werden aber neuartige Methoden breit verfügbar, die eine neue Qualität der Untersuchung und Charakterisierung der Biodiversität hinaus ermöglichen. Aufbauend auf der informationstechnischen Vernetzung der weltweit bestehenden Organismensammlungen und der konzeptionellen Weiterentwicklung der Klassifikation und Taxonomie liegen aus Sicht der Expertinnen und Experten Zukunftschancen in der vergleichenden 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 Organismenvielfalt (z. B. hocheffiziente DNA-Sequenzierverfahren, Transkriptom-, Proteom- und Metabolomanalyseverfahren, bildgebende Verfahren und molekulares Imaging) auf der Ebene von Lebensgemeinschaften, Arten und auf subzellulärer Ebene weit über »gängige« Modellorganismen hinaus eingesetzt werden, so die Schlussfolgerung auf dem Workshop. Werden so identifizierte Funktionen für die wissenschaftlich-technische Nutzung erschlossen, sind vielfältige Anwendungen - z. B. in der synthetischen Biologie und molekularen Produktion, der Optimierung biologischer Produktionsplattformen im Hinblick auf industrielle Produktionsprozesse - sowie neuartige Produkte und Prozesse und damit wesentliche Beiträge zur internationalen Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands in diesen Anwendungsfeldern der Biotechnologie möglich.

Insgesamt handelt es sich um eine sehr langfristige, ressourcenintensive Aufgabe, die Personal mit ausgesprochenem Spezial-Know-how erfordert und auf internationale Kooperation angewiesen ist. Hemmnisse liegen nach Einschätzung der im Prozess Beteiligten darin, dass das Thema in der hier formulierten spezifischen Ausrichtung als Ressource für die Biotechnologie bisher aus zwei Gründen »durchs Raster fällt«: Hinsichtlich des umfassenderen Zieles der nachhaltigen Sicherung der Biodiversität ist das Thema zu eng, da im Sinne dieses Zieles sinnvollerweise der Erhalt von Lebensräumen und Lebensgemeinschaften angestrebt wird. Im Hinblick auf biotechnische Nutzung werden Fördermittel wegen des Charakters der Langfristigkeit und der Ressourcenintensität eher in andere Forschungsaufgaben investiert.

RNA-Technologien: Wissenschaftliche Erkenntnisse des letzten Jahrzehnts zeigen, dass RNA-Moleküle in Organismen - unerwarteterweise - vielfältige strukturelle, katalytische und regulatorische Funktionen von zentraler biologischer Bedeutung ausüben. RNA-Technologien erschließen diese 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. In den RNA-Technologien gehört Deutschland zu den führenden Ländern. Diese Position gilt es zu erhalten und auszubauen.

Epigenetik und Epigenomik: Unter Epigenetik versteht man vererbbare Veränderungen der Genexpression ohne Veränderung der DNA-Sequenz (z. B. durch DNA-Methylierung, posttranslationale Histonmodifikation, Regulation

durch ncRNAs). Damit stellt die Epigenetik einen grundlegenden und neuartigen Mechanismus dar, wie Gene in Abhängigkeit von Umwelteinflüssen in ihrer Aktivität moduliert werden können. In den letzten Jahren hat sich das Feld von einer »Sammlung exotischer Fallbeispiele« zu einem kohärenten Forschungsfeld mit beträchtlichem wissenschaftlichem und wirtschaftlichem Potenzial entwickelt. Zur Ausschöpfung des Potenzials erscheint jedoch eine stärkere Vernetzung von Grundlagenforschung und klinischer bzw. pharmakologischer Kompetenz (translationale Forschung) erforderlich. Zurzeit werden die Aufklärung der 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 nach Meinung der Experten 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 der Prä- und Perinatalentwicklung) nutzen.

Entwicklungsbiologie und Alterungsprozesse: Die Entwicklungsbiologie untersucht Lebensprozesse und Mechanismen der ontogenetischen Entwicklung von Organismen, Organen, Geweben und Zellen. Ausgehend von der hervorragenden Positionierung Deutschlands in der entwicklungsbiologischen Grundlagenforschung weist dieses Zukunftsthema zwei Erweiterungen aus: zum einen die Übertragung der an Modellorganismen gewonnenen Erkenntnisse in die klinisch orientierte Forschung am Menschen, zum anderen die Erforschung der Veränderung von Lebensprozessen über die gesamte Lebensspanne hinweg. Um die Altersabhängigkeit der verschiedensten Lebensprozesse und die zugrunde liegenden Mechanismen bis auf molekulare Ebene aufzuklären, müssen Kohorten-Biobanken und -Datenbanken als Forschungsinfrastruktur aufgebaut werden. 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 Synergieeffekte 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. Die-

ses Zukunftsthema ist zugleich integraler Bestandteil des Zukunftsfelds neuen Zuschnitts »Das Altern entschlüsseln«.

Erarbeitung der Zukunftsthemen im Zukunftscluster »Biomassebasierte und nachhaltige biotechnische Produktion«

Ausgehend von den vom Projektteam vorgeschlagenen Zukunftsthemen Biologische Produktionsplattformen, Bioraffinerien der zweiten Generation und Biodiversität als Ressource für die Biotechnologie maßen die Expertinnen und Experten des Berlin-Workshops einer künftigen material- und energieeffizienten industriellen Produktion einen sehr hohen Stellenwert bei. Diese Einschätzung wurde im weiteren Prozessverlauf auch in den Zukunftsfeldern Energie und Industrielle Produktionsprozesse sowie in der Online-Befragung eindrücklich bestätigt. Der Biotechnologie wurde dabei erhebliches Problemlösungspotenzial zugewiesen.

Bei »Bioraffinerien der zweiten Generation« hoben die Teilnehmer des Berlin-Workshops vor allem die folgenden Aspekte hervor:

- Optimierung von Prozessen, neue Prozesse, Prozesskombinationen
- Ausweitung des Produktspektrums, insbesondere auf technisch wirklich nutzbare Produkte
- Schließen von Stoffkreisläufen (»ganze Pflanze verwerten«)
- Integration ressourcenschonender biotechnischer Prozesse in konventionelle Prozessabfolgen

Erst die Diskussion mit Experten aus dem Zukunftsfeld Industrielle Produktionsprozesse ergab, dass die dort höchst relevanten Trends der Digitalen Fabrik, d. h. die Produktionsoptimierung und -steuerung durch Simulation sowie das Management globaler Wertschöpfungsnetze, auch für Bioraffinerien in der Zukunft sehr wichtig werden dürften, sich bislang aber in den aktuell durchgeführten Forschungsarbeiten noch nicht widerspiegeln. Diese Aspekte wurden daher in die Themenbeschreibung aufgenommen und gingen in dieser Form in die Online-Befragung ein.

Von den Workshopteilnehmerinnen und -teilnehmern wurde das Thema »Pflanzliche Systeme zur Bewältigung der Herausforderungen des Klimawandels« neu formuliert, indem Aspekte aus den Zukunftsthemen »Biologische Produktionsplattformen«, »Bioraffinerien«, »Biomaterialien« und »Bioenergie« problem- und bedarfsorientiert zusammengefasst wurden. Unter der Herausforderung des Klimawandels wurde zum einen der Handlungsbedarf gesehen, Nutzpflanzen züchterisch so anzupassen, dass die Bereitstellung von Nahrung, Futter, Rohstoffen und Energie auch unter veränderten klimatischen Bedingun-

gen gewährleistet ist. Zum anderen sollen mithilfe von pflanzlichen Systemen Beiträge zur Minderung des anthropogenen Treibhauseffekts geleistet werden (z. B. stoffliche Nutzung, Energiewandlung und -speicherung, biotechnische CO_2- und CH_4-Minimierung, -Abscheidung, -Fixierung, -Verwertung und -Speicherung). Zudem besteht ein großes Vernetzungspotenzial zu weiteren Zukunftsthemen (v. a. »Bioraffinerien«, »Biomaterialien«, und »Biotechnologie zur Deckung und Senkung des Energiebedarfs«). Bei der energetischen Nutzung werden Zukunftsthemen primär jenseits der klassischen Biofuels gesehen, nämlich in der Optimierung von Fotosystemen für technische Zwecke (Fotosynthese, N_2 zu NH_4) und dem Entwickeln von »Superenergiepflanzen«. Da das BMBF genau diesen Themenkomplex jedoch im Rahmen der Hightech-Strategie mit dem Innovationsfeld Pflanze bereits aufgegriffen hat, wurde von einer Weiterverfolgung des Themas in diesem expliziten Zuschnitt auf pflanzliche Produktionsplattformen Abstand genommen.

Von den Experten und Expertinnen wurden zahlreiche Themengebiete neu vorgeschlagen, die sich unter der Überschrift »Biotechnologie zur Deckung und Senkung des Energieverbrauchs« subsummieren lassen. Hierzu zählen:

- Produktion von Bioenergieträgern und Biotreibstoffen
- Nutzung von Aquakulturen (z. B. Algen) in Salzwasser zur Bioenergieproduktion
- Nutzung natürlicher und artifizieller pflanzlicher Fotosysteme zur Energiewandlung
- Verfahren zur Speicherung und zum bedarfsgerechten Abrufen gespeicherter Bioenergie
- Bio-Brennstoffzellen
- Energiesparende biotechnische Produktionsverfahren
- Biotechnische CO_2 und CH_4-Abscheidung, Verwertung und -Speicherung

Ein Teil dieser Aspekte wurde auch im Kontext des Themas »Pflanzliche Systeme zur Bewältigung der Herausforderungen des Klimawandels« diskutiert. In Abstimmung mit dem Zukunftsfeld Energie wurde dafür Sorge getragen, dass diese Themen in angemessener Form im Zukunftsfeld Energie in die Online-Befragung eingingen. Als zentrales Ergebnis kann festgehalten werden, dass verschiedene technologische Optionen zur Bereitstellung und Nutzung von Energie - darunter auch biotechnische Ansätze - von den jeweiligen Fachcommunities eher isoliert betrachtet werden, eine systematische und vergleichende Bewertung und Integration jedoch verstärkt werden sollte. Dies trug zur Formulierung des Zukunftsfelds neuen Zuschnitts Energielösungen/ Energiekonzert bei.

Das Thema Erhöhung der Wassernutzungseffizienz wurde von den Teilnehmern des Berlin-Workshops neu vorgeschlagen und umfasste zunächst nur biotechnische Lösungsansätze, um mit klimatisch bedingter Wasserknappheit bzw. fluktuierendem Wasserangebot umzugehen. Beispiele sind

- speziell auf Dürreresistenz gezüchtete Nutzpflanzen,
- wassersparende Tier- und Pflanzenproduktionssysteme und
- Aquakulturen. Hier spielt auch die Vermeidung von Wasserverschmutzung eine wichtige Rolle.

Durch Auswertung von Fachliteratur sowie Abstimmung mit den Themenkoordinatoren des Zukunftsfelds Wasser-Infrastrukturen wurde deutlich, dass biotechnische mit organisatorischen und agronomischen Maßnahmen zusammenwirken müssen und jeweils standortspezifische Kombinationen ermittelt und genutzt werden müssen. Zudem wurde der Anwendungsbereich über die landwirtschaftliche Produktion hinaus auch auf biomassebasierte industrielle Produktionsverfahren ausgeweitet. In diesem thematischen Zuschnitt wurde das Zukunftsthema in die Online-Befragung eingespeist. Allerdings ist aufgrund der – im Vergleich zu anderen Themen – geringen Anzahl der Antwortenden sowie dem hohen Anteil der Antwortenden mit geringer bis keiner Fachkompetenz zu vermuten, dass durch das Design der Online-Befragung und insbesondere die Zuordnung zum Zukunftsfeld Lebenswissenschaften und Biotechnologie statt zum Zukunftsfeld Wasser-Infrastrukturen die eigentlichen Fachexperten hierzu nicht Stellung genommen haben.

Von den Teilnehmern des Berlin-Workshops wurde zudem auf die Bedeutung des Zukunftsthemas »Biomaterialien« hingewiesen. Es umfasst

- die Herstellung von Materialien aus Biomasse, d. h. die Substitution erdölbasierter Produkte,
- biotechnische Herstellverfahren bzw. Verfahrensschritte für Materialien,
- Materialien mit biologisch relevanten Eigenschaften (Biokompatibilität, biologische Abbau- bzw. Resorbierbarkeit, (Nicht-)Besiedelbarkeit durch Zellen und Mikroorganismen,
- Biomoleküle als funktionelle Bestandteile von Materialien.

Es wurden vielfältige Anwendungen benannt, insbesondere in der Medizin (z. B. Implantatmaterialien, Matrix für »Tissue Engineering«) und für umwelt- und klimafreundliche Produkte. Sehr kontrovers diskutiert wurden Bulk-Biomaterialien mit langer Lebensdauer für Infrastrukturen (»Holz-Autobahn«, »Rapsölasphalt«), doch konnte ihre Relevanz in den Monitoring-Interviews nicht bestätigt werden, sodass dieser Teilaspekt nicht weiterverfolgt wurde.

Nach Abstimmung mit dem Themenkoordinator wurden Biomaterialien[27] im Zukunftsfeld »Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren« untersucht und in der Online-Befragung sowohl von Experten und Expertinnen des Zukunftsfelds »Materialien«, als auch der Biotechnologie bewertet. Zudem wurden Materialaspekte im Zukunftsfeld »Biomassebasierte und nachhaltige biotechnische Produktion» und unter »Molekulare biotechnische Produktion« berücksichtigt.

Warum »Biomassebasierte und nachhaltige biotechnische Produktion« als gesondertes Zukunftscluster?

Durch Weiterentwicklung der etablierten biologischen Produktionsplattformen, z. B. unter Rückgriff auf die Diversität biologischer Funktionen als biotechnische Ressource, werden verstärkt biotechnische Prozessschritte und Prozesse in industrielle Produktionsverfahren integriert, um die Energie- und Ressourceneffizienz zu erhöhen. Zudem wird Biomasse ressourcenschonend, auch unter ungünstigen klimatischen Bedingungen und in maßgeschneiderter Form für industrielle Produktionsverfahren bereitgestellt und in Bioraffinerien zu einer Vielzahl von Produkten (z. B. Chemikalien, Werkstoffe, Gebrauchsgüter, flüssige, feste und gasförmige Bioenergieträger und -kraftstoffe der zweiten Generation auf der Basis von Holz und Abfällen) umgewandelt werden. Dabei kommt pflanzlichen Produktionssystemen sowohl für die Bereitstellung der Biomasse, bei der Herstellung von Produkten sowie bei der Kontrolle von Prozessemissionen (CO_2, Methan) eine zentrale Rolle zu.

Den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit entsprechend, werden von den Zukunftsthemen dieses Zukunftsfeldes vor allem Beiträge zur wirtschaftlichen Entwicklung Deutschlands sowie zur Verbesserung der Lebensqualität der Menschen erwartet. Die höchste Forschungsintensität wird in den kommenden zehn Jahren zu verzeichnen sein. In dieser Zeit müssen für Bioraffinerien und Biokraftstoffe der Nachweis der Wirtschaftlichkeit erbracht sowie tragfähige Lösungen für Biomasse- und Landnutzungskonflikte gefunden werden. Während für die Erschließung des Potenzials von Bioraffinerien insbesondere Maßnahmen zur Verbesserung von Forschungsinfrastrukturen, zur Qualifizierung von Personal und zur Vernetzung vorgeschlagen werden, fehlt es zur Realisierung von Biokraftstoffen der zweiten Generation noch an Promotoren sowie Akzeptanz und Risikobereitschaft in Unternehmen.

[27] Fokussiert wurde auf Forschung zu Materialien, die mit biologischen Systemen insbesondere dem menschlichen Körper in Wechselwirkung stehen wie etwa im Falle von Implantaten und Prothesen. Diese Forschung findet schwerpunktmäßig an materialwissenschaftlichen Forschungseinrichtungen statt. Die Verwendung lebendiger Zellen selbst wurde nicht thematisiert.

Forschungsaufgaben sind die Entwicklung von biomassebasierten bzw. biotechnischen, material-, wassernutzungs- und energieeffizienten Produktionsprozessen in geeigneten integrierten Anlagenkonzepten und ihre Optimierung und Steuerung durch Simulation (»Digitale Bioraffinerie«). Da sich Biomasseproduktion, -verarbeitung und auch die Herstellung von Endprodukten in globalen Wertschöpfungsketten vollziehen werden, wird das Management globaler Wertschöpfungsnetze eine der großen Herausforderungen der Zukunft werden. Essenzielle Voraussetzung sind Methoden zur Ermittlung und Bewertung von Biomasse- und Landnutzungskonflikten sowie deren Lösung (Lebens- und Futtermittel vs. Energie vs. stoffliche Nutzung; Landwirtschaft vs. Naturschutz).

Ein enger Bezug besteht zum Zukunftsfeld ProduzierenKonsumieren2.0: Die ganzheitliche Perspektive des systemischen Wandels hin zu ressourceneffizienten Wertschöpfungsformen ist geeignet, die genannten Einzelperspektiven der Forschung zur biotechnischen und biomassebasierten Produktion mit anderen Technologien zur Effizienzsteigerung und mit anderen Biomassenutzungsformen zu verbinden und auf diese Weise Effizienzsteigerungen in neuen Dimensionen zu ermöglichen.

Erarbeitung der Zukunftsthemen im Zukunftscluster »Molekulare biotechnische Produktion«

Zahlreiche der identifizierten und diskutierten Zukunftsthemen umfassten in ihrem ursprünglichen Zuschnitt sowohl eine »organismenbasierte« als auch eine »molekülorientierte« Ausrichtung der Forschung (z. B. Biomaterialien, Energiewandlungssysteme, Produktionsplattformen, synthetische Biologie, Diversität biologischer Funktionen als Ressource). Diese Beobachtung war mit dafür ausschlaggebend, in den Diskussionen mit anderen Themenkoordinatorinnen und Themenkoordinatoren, insbesondere aus den Zukunftsfeldern »Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren, »Nanotechnologie« und »Industrielle Produktionsprozesse« eine Bündelung der »molekular orientierten« Forschungsstränge zu prüfen und letztlich entsprechend zugeschnittene Themen in die Online-Befragung zu geben. Dort wurden sie von den Befragten als hoch relevant, vor allem im Hinblick auf den Erkenntnisgewinn für Wissenschaft und Technologie und als Impulsgeber für andere Forschungsgebiete, bewertet.

Eine weitere Bestätigung der hohen Relevanz dieses Zukunftsfeldes, aber auch der Validität der jeweiligen Suchprozesse, war die Identifizierung des Zukunftsthemas »Zellfreie biotechnische Produktion 2020+« in einem gesonderten Vorausschau-Prozess des BMBF. Dieses Zukunftsthema weist breite Überschneidungen mit dem Zukunftsthema »Molekulare biotechnische Produktion« auf. Spezifische Fragen zur zellfreien biotechnischen Produktion 2020+ wurden in die zweite Welle des internationalen Monitorings integriert und zudem wurde für Ende 2009 ein international besetztes Expertenhearing konzipiert und orga-

nisiert, in dem der Prozess der weiteren Erschließung des Zukunftsthemas erörtert und internationale Erfahrungen für die Gestaltung dieses Prozesses nutzbar gemacht werden.

Warum das Zukunftscluster »Molekulare biotechnische Produktion«?

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 die wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands unterstützen. Bis hieraus Forschungsergebnisse erwachsen, die für industriell einsetzbare Verfahren, Produkte und Dienstleistungen nutzbar sind, wird 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 3 bis 5 Jahre später angesetzt.

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.

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«. Letzteres sind Organismen, die auf genau jene Systemkomponenten reduziert sind, welche zur Erfüllung der Funktion unerlässlich sind, für die der jeweilige Organismus maßgeschneidert wurde. Besondere Herausforderungen der nächsten Jahre liegen, so die Schlussfolgerung der Themenkoordinatoren, in der kostengünstigen Synthese großer DNA-Moleküle und in der Bereitstellung standardisierter, vorgefertigter molekularer Bauteile (z. B. biomolekulare Schalter, Katalysatoren, Biomaterialien, Funktionsoberflächen, funktionale Moleküle, mit denen die Eigenschaften molekularer komplexer Strukturen gezielt beeinflussbar werden).

Für die industrielle Produktion außerhalb des Labors werden auch effiziente miniaturisierte Produktionsverfahren unter Nutzung der Selbstorganisation und

Selbstanordnung einschließlich der notwendigen Prozesstechnologie und Steuerung benötigt.

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 aus Sicht der Bearbeiter die technische Nutzung der Fotosynthese für die Energiegewinnung.

Zur Erschließung des Potenzials der molekularen Produktion wird nach Einschätzung des Projektteams der Aufbau einer kritischen Masse bei Forschungsinfrastrukturen und Personal, international abgestimmte Regelungen der geistigen Eigentumsrechte, aber auch die Unterstützung durch Promotoren als wesentlich angesehen. Für die industrielle Anwendung besteht die Herausforderung in der Vernetzung zwischen Forschung und Industrie, aber auch in einer entsprechend hohen Risikobereitschaft in den Unternehmen. Zugleich wird das noch sehr junge Feld der synthetischen Biologie von den Experten aber auch ambivalent bis skeptisch beurteilt. Die Skepsis bezieht 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 wird grundlegende Skepsis geäußert, ob die synthetische Biologie wirklich Lösungsoptionen für industrielle Anwendungen wird 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 liegen wird, wird es auf längere Sicht nur unter großer Unsicherheit beurteilt werden können, ob die in Aussicht gestellte Umsetzbarkeit in industrielle Anwendungen realisierbar sein wird.

9.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick

Die folgende Tabelle 9.3 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Zukunftsthemen im BMBF-Foresight-Prozess. **Themen nach 1. Recherche** sind die Themen aus den Prozessen der Fachreferate (sofern sie nicht aussortiert wurden, weil sie bereits auf der Forschungsagenda stehen) und aus der ersten Literaturanalyse. **Themen nach 1. Workshop** sind diejenigen Themen, die nach dem 1. Workshop besonders verfolgt werden sollten. Die Tabelle 9.2 im vorangegangenen Abschnitt ist der auf dem Workshop bearbeitete Stand und damit zwischen den Themen nach erster Recherche und den Themen nach dem

ersten Workshop anzusiedeln. **Themen Online-Befragung** sind in die Online-Befragung eingegangen, bedeuteten also eine weitere Zusammenfassung der Zwischenergebnisse, die in der Befragung bewertet wurden. Und die **Themen nach Kriterienfilter** sind bereits »Zukunftsthemen«, die in der letzten Phase des Prozesses untersucht wurden. Sie sind in der Regel sehr ähnlich den am Ende des BMBF-Foresight-Prozesses vorgeschlagenen Zukunftsthemen (siehe erste Tabelle dieses Kapitels). Durch letzte Recherchen und Experteninterviews sind jedoch noch einige Zukunftsthemen modifiziert worden.

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Biologische Produktionsplattformen	**Kernbereich**	**Molekulare Produktion**	Pflanzliche Systeme zur Bewältigung von Klimawandel
Neue Plattformen	Biologische Produktionsplattformen	Entwicklung industriell einsetzbarer miniaturisierter Produktionsplattformen	RNA-Technologien
Optimierung, Ausweitung Produktspektrum	Bioraffinerien der 2. Generation	Industrielle Herstellung molekularer Bauteile	Epigenetik und Epigenomik
Integration Bioproduktion und klassische industrielle Produktion	Biodiversität als Ressource für die Biotechnologie	Industrielle Herstellung molekular konstruierter Produkte	**Biologische Produktionsplattformen (PK2.0)**
Wissensbasis für Regulation (Zulassung, Sicherheit, etc.)	Pflanzliche Systeme zur Bewältigung der Herausforderungen des Klimawandels	Entwicklung industriell einsetzbarer Prozesstechnologien und Steuerung für die molekulare Produktion	Systembiologie
Bioraffinerien 2. Generation	Biotechnologie zur Deckung und Senkung des Energiebedarfs	**Bioraffinerien**	Artifizielle Fotosynthese, Photovoltaik nach biologischem Vorbild
Bioraffineriekonzepte	Erhöhung der Wassernutzungseffizienz	Entwicklung neuer Produktionsprozesse und Kombinationen von Produktionsprozessen	Molekulare biologische Produktion
Ausweitung Produktspektrum	Biotechnologie für Medikamente und Diagnostika	Optimierung der Material-, Wassernutzungs- und Energieeffizienz von Bioraffinerien	**Bioraffinerien 2. Generation (in PK2.0)**
Optimierte und neue Prozesse und -kombinationen	Demenzforschung und -behandlung	Digitale Bioraffinerie	
Wissensbasis für strategische Entscheidungen	Entwicklungsbiologie und Alterungsprozesse	Globale wandlungsfähige Bioraffinerieproduktion mit satellitengestützter Steuerung	**Entwicklungsbiologie und Alternsprozesse (in »Das Altern« entschlüsseln)**
Biodiversität als Biotech-Ressource	RNA-Technologien	Optionen zur Lösung von Biomasse- und Land-Nutzungskonflikten	
Anwendung neuer Technologien zur Erforschung der Biodiversität	Epigenetik und Epigenomik	**Vielfalt biologischer Funktionen als biotechnische Ressource**	
Technische Nutzung der Funktionsvielfalt	Synthetische Biologie	Erforschung der Funktionsvielfalt	
Internationale Kooperation: Infrastrukturen, Ressourcenzentren	Biomaterialien und -oberflächen Angewandte Systembiologie	Einsatz fortgeschrittener Methoden zur funktionellen Analyse	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Synthetische Biologie		Anwendungsbezogene Nutzung der Erkenntnisse	
Nationale Scientific Community, Forschungsförderung und Infrastruktur etablieren	**Schnittstellen**	Vernetzte Datenbanken, Algorithmen	
Lebewesen mit neuen Eigenschaften	Nano-Biotechnologie	Ressourcenzentren: Organismensammlungen und Biobanken	
Biomimetische Chemie	Grenzflächen biologisch-technischer Systeme	**Biotechnologie zur Bereitstellung von Energie**	
Minimalorganismus	Personalisierte Medizin	Biofuels der 2. Generation und Technologien zu ihrer Verbrennung	
Epigenetik	Multiparameteranalytik	Biotechnische Energiewandlungssysteme für die autonome Energieversorgung von miniaturisierten Geräten	
Mensch statt Maus	Neue biochemische Aktoren im Produktionsprozess	Entwicklung technisch einsetzbarer artifizieller Fotosynthesesysteme	
Epigenetik -> Epigenomik	Biomaterialien für Infrastrukturen	**Epigenetik**	
Entwicklung kommerzialisierbarer Anwendungen	Produktion, Umwandlung und Speicherung von biologischen Energieträgern (gentechnische entwickelte Energiepflanzen als nur eine Option)	Aufklärung der Funktion und Mechanismen epigenetischer Veränderungen beim Menschen	
Synergien zu Krebsforschung, Stammzellbiologie, Regenerativer Medizin, etc.	Bewältigung von Demenzerkrankungen	Entwicklung von Forschungswerkzeugen zur Identifizierung und Charakterisierung epigenetischer und epigenomischer Veränderungen	
RNA-Technologien		Entwicklung von Methoden zur gezielten Veränderung epigenetischer Markierungen in Modellorganismen	
Erforschung von RNA-Funktionen und Mechanismen, besonders ncRNAs		Entwicklung und Validierung klinisch nutzbare Diagnose- und Risikoermittlungsverfahren für verschiedene Krankheiten	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Entwicklung kommerzialisierbarer Anwendungen (Forschungstool, Analytik, Diagnostik, Target-identifizierung, -validierung, Pharmazeutika)		Target für neue Therapeutika	
Entwicklungsbiologie und Alterungsprozesse		Beitrag zur Entwicklung neuer Therapieprinzipien	
klinisch orientierte Grundlagenforschung (Entwicklungsbiologie adulter Organismen, Alterungsprozesse)		**Entwicklungsbiologie und Alterungsprozesse**	
Entwicklung kommerzialisierbarer Anwendungen		Erforschung verschiedenster Lebensprozesse im Lebenszeitverlauf	
Synergien zu Stammzellbiologie, Regenerative Medizin, Altersforschung, Reproduktionstechnik		Aufklärung der Mechanismen altersabhängiger Lebensprozesse bis auf molekulare Ebene	
Angewandte Systembiologie		Aufbau von Kohorten-Biobanken und -Datenbanken als Forschungsinfrastruktur	
Anwendungsorientierte Forschung (Pharma-FuE, Industrielle Biotechnologie, Pflanzenzüchtung)		Anwendungsorientierte Forschung am Menschen	
Kommerzialisierbare Dienstleistungen und Geräte		Entwicklung von Interventionen zur Beeinflussung von altersabhängigen Prozessen	
Synergien zu Synthetischer Biologie		**Erhöhung der Wassernutzungseffizienz in Produktionsverfahren**	
Infrastrukturen		Flächendeckende Implementierung standortangepasster wassersparender Bewirtschaftungsformen	
Synthetische Biologie		Züchtung dürretoleranter Nutzpflanzen	
Herstellung und Nutzung neuer Lebewesen mit neuen Eigenschaften durch Integration künstlicher Systeme		Ausrichtung der Pflanzenzüchtung auf die standortabhängigen Ansatzpunkte mit höchster Kosteneffizienz	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Herstellung und Nutzung von Minimalorganismen		Ermittlung standortspezifischer, synergistischer Kombinationen von agronomischen Maßnahmen und dürretoleranten Pflanzen für den Anbau	
Kostengünstige Synthese großer DNA-Moleküle		**Nanobiotechnologie**	
Verfügbarmachung standardisierter vorgefertigter Bauteile		Bio2Nano - synthetische Biologie für die Nanotechnologie	
Artifizielle Produktionssysteme für verschiedene Produkte und Anwendungen		Nano2Bio - Einsatz nanotechnologischer Verfahren und Komponenten in der Biotechnologie	
Technische Nutzung molekular konstruierter Fotosynthesesysteme		Nanomaterialien und -systeme für die medizinische Diagnostik und das Imaging (diagnostische Nanomedizin)	
Weitere Zukunftsthemen		Nanomaterialien und -systeme für therapeutische Verfahren (Wirkstofftransport, Therapie) und medizinische Behandlung (Implantate, Biomaterialien), therapeutische Nanomedizin	
Pflanzenbiotechnologie			
Bioenergie			
Bionik			
Neuronale Netze			
Aquakultur			
Biomaterialien und -oberflächen			

Tabelle 9.3: Entstehung der Zukunftsthemen Lebenswissenschaft und Biotechnologie – Zwischenstände

9.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern

Lebenswissenschaften und Biotechnologie sind per se Querschnittsthemen, die Impulse aus anderen Forschungsgebieten benötigen, umgekehrt anderen Disziplinen Impulse geben oder sogar mit anderen Feldern verschmelzen. Querbezüge der drei Zukunftsfelder finden sich vor allem zur Gesundheitsforschung, zu industriellen Produktionsprozessen, zu Materialien, Werkstoffen und ihren Herstellungsverfahren und zur Nanotechnologie.

Weitere relevante Themen im Zukunftsfeld Lebenswissenschaften und Biotechnologie, die aus systematischen und untersuchungspraktischen Gründen jedoch anderen Zukunftsfeldern zugeordnet wurden und dort näher erläutert werden, sind biotechnische Entwicklungen im Anwendungsbereich Medizin/ Pharma/ Gesundheit, insbesondere Molekulare Analytik und Diagnostik, RNA-Technologien, Gentherapie, Regenerative Medizin (Zukunftsfeld Gesundheitsforschung), Biotechnisches Enhancement (Zukunftsfeld neuen Zuschnitts Mensch-Technik-Kooperationen), Materialwissenschaftliche Aspekte von Biomaterialien (Zukunftsfeld Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren, sowie bioanaloge Informationsverarbeitung (Zukunftsfeld Neurowissenschaften und Lernforschung) und biobasierte Hardwarearchitekturen (Zukunftsfeld Informations- und Kommunikationstechnologie). Im Verlauf des BMBF-Foresight-Prozesses wurde aus dem Zukunftsfeld Lebenswissenschaften und Biotechnologie wesentlich zu den Zukunftsfeldern neuen Zuschnitts Das Altern entschlüsseln, Handlungsfeld Energiekonzert, sowie ProduzierenKonsumieren2.0 beigetragen.

Themenkoordination:
Dr. Bärbel Hüsing, ISI (baerbel.huesing@isi.fraunhofer.de)

10 Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren

10.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld »Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren«

Konventionelle Materialien
Anorganische Materialien: Keramische Beschichtungen, ultrahochfeste Stähle, Nichteisenmetalle für Leichtbau und Hochtemperaturanwendungen (Legierungen & Schäume)
Organische Materialien: Funktionelle Polymere, leitfähige Polymere ultrahochfeste Stähle

Komplexe Verbundwerkstoffe
Verbindungstechnologien
Recycling von Verbundwerkstoffen
Test- und Simulationsverfahren bzgl. des Material- und Strukturverhaltens

Neue Werkstoffklassen
Smart Materials: - Selbstheilende Materialien[28] - Sensorische und katalytische Beschichtungen, piezoelektrische Materialien, - Metamaterialien - Skalierung der Laborprozesse

Materialien für spezifische Anwendungsfelder
Anwendungen »Energie«: - Materialien für Energiespeicher - Hochwarmfeste Materialien - Beschichtungsmaterialien für die Gewinnung von Solarenergie
Anwendungen »Gesundheit«: - Biokompatible langzeitstabile Materialsysteme - Bioaktive (nicht lebendige) Materialsysteme - Biodegenerative Materialien

Prozesse
Verbindungstechnologie für unterschiedliche Werkstoffe
Skalierung der Laborprozesse für Smart Materials im Industriemaßstab
Prozessverhalten (»Wie kann ich eine gleichbleibende Prozessqualität sicherstellen«)

Tabelle 10.1: Identifizierte Zukunftsthemen Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren im Überblick

[28] Materialien, die in der Lage sind, verletzte Bereiche eines Systems (z. B. Risse in Oberflächen) zu regenerieren und damit die Funktionalität zu erhalten

Innerhalb der **konventionellen Materialien** kristallisierten sich vor allem **Verbundwerkstoffe** als relevantes Zukunftsthema heraus, die weiter unten detaillierter diskutiert werden. Daneben werden Materialien unter extremen Bedingungen (z. B. keramische Beschichtungen für Hochtemperatur-Anwendungen, Beschichtungen als Korrosionsschutz, wechselbelastungsstabile Materialien etc.) als relevantes Zukunftsthema angesehen (siehe Tabelle 10.1)[29].

Bei der Polymertechnik wurden insbesondere **funktionelle und leitfähige Polymere** als relevante Zukunftsthemen identifiziert. Diese werden unter der Bezeichnung »Smart Materials« beschrieben.

Entwicklungen innerhalb der **Verbundwerkstoffe** sind bei den konventionellen Materialien jene mit der größten Relevanz für die Zukunft. Hierbei sind neben der Entwicklung neuer Verbundsysteme die Simulation der Eigenschaften, die Herstellung, die Reparatur und das Recycling wichtige Themen.

Im Bereich der neuen Werkstoffklassen wurden vor allem selbstheilende Materialien[30], sensorische und katalytische Beschichtungen, piezoelektrische Materialien sowie Metamaterialien als Zukunftsthemen klassifiziert. Zusätzlich ist die großskalige Herstellung dieser Materialien als Zukunftsthema ausgewiesen.

Bei den Materialien für spezifische Anwendungsfelder wurden vor allem Energie (hauptsächlich Materialien für Energiespeicher), Gesundheit (biokompatible langzeitstabile Materialsysteme und bioaktive und biodegenerative Materialien) sowie naturfaserverstärkte Kunststoffe als relevante Zukunftsthemen erachtet.

10.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen

Start des Prozesses

Zu Beginn der feldspezifischen Suchphase nach zukünftigen Schwerpunkten in Forschung und Technologie, wurde eine klassische Themenfeldstrukturierung nach Werkstoffklassen (Polymerwerkstoffe, Metalle, Keramikwerkstoffe etc.) erarbeitet. Aufgrund der Situation eines in den vergangenen Jahren zunehmenden Wettbewerbs zwischen einzelnen Werkstoffen in unterschiedlichen Anwendungsfeldern sowie der Bedeutung von Querschnittsthemen, (z. B. Verbundwerkstoffe, Modellierung, z. T. Prozesstechnologien) wurde eine Neustrukturierung vorgenommen. Diese umfasst folgende Gebiete:

29 Die dunkelgrau unterlegten Felder sind die Zukunftsthemen, die hellgrau hinterlegten einzelne, besonders wichtige Forschungsaufgaben.

30 Materialien, die in der Lage sind, verletzte Bereiche eines Systems (z. B. Risse in Oberflächen) zu regenerieren und damit die Funktionalität zu erhalten.

- Konventionelle Materialien
- Komplexe Verbundwerkstoffe
- Neue Werkstoffklassen
- Materialien für spezifische Anwendungsfelder
- Prozesse

Die identifizierten Zukunftsthemen wurden später anhand dieser Einteilung strukturiert.

Den Ausgangspunkt der Suche nach Zukunftsthemen bildeten nationale und internationale Recherchen in Sekundärquellen, bei denen primär auf bereits vorhandene Technologie-»Roadmaps« zurückgegriffen wurde. Erstes Ziel war es, das sehr breite Zukunftsfeld zu strukturieren.

Nachwachsende Rohstoffe
Naturfasern (kostengünstige, industrielle Herstellung von Naturfasern, Naturfasern im Aussenbereich)
Grundstoffe für Lebensmittel
Alternative Grundstoffe (Biotechnologieprodukte, Wood-Plastic-Composites)
Polymere
Biomaterialien (materialwissenschaftliche Forschung an hochfesten biokompatiblen und bioaktiven Polymeren)
Leitfähige Polymere (leitfähige Polymere auf Basis von Nanopartikeln, Polymer-LEDs, industrielle kostengünstige Herstellung leitfähiger druckbarer Polymere)
Faserverstärkte Polymere
Glas
Photonische Komponenten
Bio-Werkstoffe (Glas als Replacement-Material, Arrays auf Basis von Glas (Detektion von Biomolekülen), bioaktive Gläser, Glas als Wirkstoffdepot)
Neue Herstellungstechnologien (neue energieeffiziente, C02-neutrale Schmelzprozesse, großvolumige kontrollierbare Schmelzprozesse)
Modellierung & Simulation
Neue skalenübergreifende Modelle & Simulationen von Werkstoffen (neue Softwarelösungen für das Durchführen der Simulationen, skalenübergreifende Simulation der Interaktion von Werkstoffen)
Skalenübergreifendes Modellieren und Simulieren von Prozessen (Modellieren von Herstellprozessen (z. B. Guss) und Optimierung der Prozesse, Modellieren von Bearbeitungsprozessen (z. B. Umformen))
Zusammenfügen verteilter Datenbestände
Analytik & Charakterisierung
3D-Analyse von Nanostrukturen (Nanoidentierung)
Erheben neuer Material- und Werkstoffdaten
Validieren von Materialdaten (z. B. Langzeitstabilität, Belastungsfähigkeit)
Messen & Prüfen
weitere Automatisierung der Verfahren (hohe Portabilität der Prüfgeräte)
simultanes zerstörungsfreies Prüfen von Struktur, chemischen und mechanischen Eigenschaften
Prüfen komplexer Materialstrukturen und Verbünde (neue zerstörungsfreie Prüfverfahren für Biomaterialien, ZF-Prüfen von Verbindungen zwischen unterschiedlichen Materialien, Prüfen unterschiedlicher Werkstoffe mit gleichen Verfahren)

Nichteisenmetalle
Neue Leichtbaulegierungen (Leichtbaulegierungen Alumnium, Leichtbaulegierungen Titan, Leichtbaulegierungen Magnesium, Verarbeitungstechnologien Leichbaulegierungen)
Metallschäume
Energieeffiziente, CO_2 neutrale Herstellprozesse
Kenngrößenbestimmung
Eisenmetalle
Neue hochfeste Stähle (TWIP-Stähle, Zwei-/ Mehrphasenstähle, Hochmanganhaltige Stähle, faserverstärkte Stähle, Bor-legierte Stähle)
Neue ultraleichte Stähle
Flexible Produktionsprozesse
Energieeffiziente, CO_2 neutrale Herstellprozesse
Verbundwerkstoffe
Faserverstärkte Leichtbauwerkstoffe (biobasierte Faserverbundwerkstoffe, industrielle, automatisierte Herstellung faserverstärkter Kunststoffe)
Bio-Verbundwerkstoffe (bioabbaubare Faserverbundwerkstoffe, rezyklierbare Verbundsysteme)
Metallische Verbünde
Nanokomposite
Chemische Verfahren für das Herstellen von Verbünden
Verbindungstechnologien für unterschiedliche Werkstoffe (neue Verfahren für das Verbinden von Glas mit anderen Werkstoffen, neue Verfahren für das Verbinden von Glas mit Glas)
Smart Materials
Aktorische Materialien
Bionische Konzepte in Materialien (z. B. für künstliche Muskeln, Nerven)
selbstheilende Materialien[31]
Kostengünstige industrielle Herstellungsverfahren
Keramiken
Hochtemperaturwerkstoffe
Biomaterialien (resorbierbare Keramiken)
Herstellung komplexer Strukturen mit hoher Zuverlässigkeit

Tabelle 10.2:Themen Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren im ersten Foresight-Workshop 2007

Foresight-Workshop 2007

Diese ersten Ergebnisse wurden schriftlich zusammengefasst und gingen in den ersten Experten-Workshop im November 2007 ein. Auf diesem nationalen Workshop wurde das Themenspektrum einerseits vertieft (siehe Tabelle 10.2) und andererseits eine Matrix erstellt, um die Verknüpfungen mit anderen Zukunftsfeldern herzustellen. Der Auftrag lautete dann, die als wichtig angesehenen Themen weiter zu verfolgen und mit zusätzlichen Recherchen anzureichern. Die erste Strukturierung wurde im Zuge des Foresight-Prozesses noch mehrmals angepasst. Basierend auf der ersten ermittelten Struktur wurden Ex-

31 Materialien, die in der Lage sind, verletzte Bereiche eines Systems (z. B. Risse in Oberflächen) zu regenerieren und damit die Funktionalität zu erhalten.

pertinnen und Experten identifiziert und kontaktiert. Weitere relevante Themen wurden anhand einer bibliometrischen Analyse identifiziert.

Durch die internationalen Interviews im Monitoring-Panel erhärteten sich viele der auf dem Workshop erarbeiteten Keimzellen der Themen zu tatsächlich relevanten Zukunftsthemen. In einer Online-Befragung (siehe Tabelle 10.3) wurden die bis zum August 2008 identifizierten Themen anhand eines Kriteriensatzes bewertet. Im Feld »Materialien« nahmen insgesamt ca. 250 Personen teil. Die Zukunftsthemen wurden durch die Ergebnisse der Online-Befragung ergänzt und in einer zweiten Interview-Welle mit den Monitoring-Panellistinnen und Panellisten diskutiert.

Abschließend wurden zusätzlich weitere Experten und Expertinnen kontaktiert (vor allem für die Themen Verbundwerkstoffe, Materialsimulation, »Smart Materials« und biokompatible Materialien), um die Ergebnisse auf eine breitere Basis zu stellen.

Im Folgenden werden die Zukunftsthemen detaillierter dargestellt und entlang des Suchprozesses beschrieben.

Identifikation der einzelnen Zukunftsthemen

Im Gebiet der **Entwicklung neuer Werkstoffklassen** ist das Thema »Smart Materials« ein sehr zentrales. Als »Smart Materials« werden Materialien und Materialsysteme bezeichnet, die Effekte aus ihrer Umgebung wahrnehmen können und auf diese über einen aktiven Kontrollmechanismus reagieren können (vgl. IOM³ 2004: 8ff.). Aus Recherchen, Workshops und Interviews ergaben sich vor allem »Selbstheilende Materialien«[32] als neues Zukunftsthema. Sensorische und katalytische Beschichtungen, piezoelektrische Materialien sowie Metamaterialien wurden als langfristig relevante Forschungsthemen genannt. Zudem wurde der Bedarf an Herstellungstechnologie für die großskalige Produktion dieser Materialien adressiert.

Von den teilnehmenden Expertinnen und Experten an der Online-Befragung wie auch in den Interviews (sowohl innerhalb des Panels als auch weitere kontaktierte Expertinnen und Experten) wurden vor allem die Entwicklung von zuverlässigen Herstellungstechnologien für »Smart Materials« sowie die Entwicklung selbstheilender Materialien als langfristige Forschungsschwerpunkte als besonders wichtig eingeschätzt. Die Forschungsintensität dürfte, so die Beurtei-

32 Materialien, die in der Lage sind, verletzte Bereiche eines Systems (z. B. Risse in Oberflächen) zu regenerieren und damit die Funktionalität zu erhalten.

lung der Befragten kurz-, mittel- und langfristig auf gleichem Niveau bleiben, weil sich diese Frage bei jeder Materialentwicklung von Neuem stellen wird.

Aus dem Monitoring ergab sich »Metamaterialien« als hochrelevantes Forschungsthema. Für die Nanomaterialien wird auf das Zukunftsfeld »Nanotechnologie« verwiesen. Es gab Diskussionen unter den Experten, ob die »Materialien« in Zukunft nur noch unter Nano-Aspekten betrachtet werden sollten. Die Grenzen sind zwar fließend, aber einige Zukunftsaspekte des Materialfeldes konnten nicht in die Nanotechnologie integriert werden.

Den »Smart Materials« wird im Vergleich zu den anderen Themen die höchste Forschungsrelevanz im Bereich des Zukunftsfeldes »Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren« zugesprochen. Von Smart Materials wird nach Meinung der befragten Experten auch der stärkste Impuls für andere Forschungsfelder ausgehen.

Im Bereich der **Materialien mit anwendungsspezifischen Eigenschaften** ergaben Recherchen, Workshop und Interviews, dass die Anwendungen in den Feldern Energie, Gesundheit, Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) und Biotechnologie als die wichtigsten zu betrachten sind. Aus dieser Erkenntnis heraus wurden **Werkstoffe für den Gesundheitsbereich** und **Energiewerkstoffe** im Rahmen der Online-Befragung bewertet (siehe Tabelle 10.3). Beide Themengebiete wurden als hoch relevant mit dem Zeithorizont zehn und mehr Jahre eingeschätzt. Die Expertinnen und Experten versprechen sich von den Anwendungen in den Zukunftsfeldern »Energie« und »Gesundheit« den höchsten Beitrag zur Lebensqualität der Menschen. Fortschritte im Bereich Energiewerkstoffe werden zudem als zweitwichtigster Impulsgeber für andere Forschungsfelder genannt und mit Abstand als am bedeutendsten für die wirtschaftliche Entwicklung eingeschätzt.

Innerhalb des Themengebiets **Energiewerkstoffe** sprechen die Expertinnen und Experten der Entwicklung von neuen Materialien für Energiespeicher die höchste Relevanz unter allen abgefragten Themen zu, allerdings wird die Zeit der höchsten Forschungsintensität eher kurzfristig gesehen. Vergleichbar relevant, aber mit einem kürzeren Zeithorizont werden hochwarmfeste Materialien sowie Beschichtungsmaterialien für die Gewinnung von Solarenergie eingeschätzt. Schutzmaterialien für radioaktive Strahlung werden zwar als langfristiges Forschungsthema eingeschätzt, aber die Relevanz wird als sehr gering betrachtet. Dies könnte auf die fehlende Akzeptanz zurückzuführen sein, die in der Online-Befragung von ca. 50 Prozent der Experten als maßgeblicher hemmender Faktor für den weiteren Forschungsfortschritt gesehen wird.

Im Gebiet der Materialien, die im **Gesundheitsbereich einsetzbar sind,** wurden biokompatible langzeitstabile Materialsysteme, sensorische und

aktuatorisch biokompatible Materialsysteme als »Replacements« sowie bioaktive und biodegenerative Materialien zur Wiederherstellung von Körpergewebe in der Online-Befragung als überdurchschnittlich relevant angesehen. Im Durchschnitt sehen die Experteneinschätzungen die höchste Forschungsintensität früher als in 6 bis 10 Jahren für langzeitstabile und biokompatible Materialien. Bei den anderen Themen und bei entsprechenden Materialeigenschaften (bioaktiv, biodegenerativ, sensorisch, aktuatorisch) wird die höchste Forschungsintensität im Durchschnitt erst nach 6 bis 10 Jahren erwartet. Auffällig ist, dass die befragten Expertinnen und Experten vor allem einen Mangel bei Kompetenzen und Ausbildung als Hindernis für weitere Forschung in diesem Feld sehen.

Der Bereich der Verbesserung herkömmlicher Materialien umfasst Verbundwerkstoffe, klassische Materialklassen und Materialien, die unter extremen Bedingungen eingesetzt werden. Das Gebiet der Verbundwerkstoffe wurde sowohl in vorhandenen Sekundärquellen als auch in den durchgeführten Workshops als zunehmend wichtig genannt. Diese Einschätzung wird durch die Bewertung der Online-Befragung gestützt. In der Online-Befragung wurden Verbundwerkstoffe, anorganische Materialien, organische Materialien und Materialien unter extremen Bedingungen getrennt bewertet. Verbundwerkstoffe wurden als überdurchschnittlich relevant mit dem Zeithorizont von zehn Jahren und länger bewertet. Auffällig ist die Experteneinschätzung einer fehlenden Akzeptanz von naturfaserverstärkten Kunststoffen (NFK), die als wesentliches Hindernis für Fortschritte auf dem Gebiet genannt wurde. Das Gebiet der anorganischen Materialien wurde als zweitwichtigstes Gebiet für die wirtschaftliche Entwicklung genannt.

Das Gebiet der **organischen Werkstoffe** umfasste neue Eigenschaftskombinationen für funktionelle Polymere sowie leitfähige Polymere. Beide Komponenten wurden von den online befragten Expertinnen und Experten als überdurchschnittlich relevant angesehen, allerdings mit verhältnismäßig frühem Zeitpunkt höchster Forschungsintensität. Auffällig ist die Einschätzung der Befragten, dass in diesem Gebiet vor allem unzureichende Kompetenzen, Ausbildungsmöglichkeiten und Promotionen einer Weiterentwicklung des Feldes im Wege stehen.

Das Gebiet der **herkömmlichen anorganischen Werkstoffe** umfasste Eisenmetalle, Nichteisenmetalle sowie Glas und Keramik. Nach der Einschätzung von Monitoring-Expertinnen und -Experten sowie der Workshop-Teilnehmerinnen und -Teilnehmer sind keramische Beschichtungen langfristig besonders wichtig, um Bauteile mit einer extremen Temperaturbeständigkeit herzustellen. Ultrahochfesten Stählen sowie Nichteisenmetallen für den Leichtbau (Legierungen und Schäume) sowie für Hochtemperaturanwendungen wurde eine überdurchschnittlich hohe Relevanz zugesprochen. Die Zeit der höchsten Forschungsintensität wird von der Mehrzahl der Expertinnen und Experten in zehn Jahren gesehen. Auffällig ist, dass eine hohe Anzahl von Expertinnen und Experten auf

dem Gebiet von Eisenmetallen und Nichteisenmetallen einen Mangel an Vernetzung in Deutschland bemängelt (zwischen 25 und 35 Prozent). Verschiedene Befragungsteilnehmer und -teilnehmerinnen nutzten das Kommentarfeld für dieses Gebiet ferner dafür, auf die Problematik parallel arbeitender Forschergruppen hinzuweisen. Hohe Relevanz und ein langfristiger Zeithorizont wird auch der Herstellung photonischer Komponenten aus Glas zugesprochen (vgl. hierzu auch das Zukunftsfeld **Optische Technologien**).

Das Gebiet der **Verbundwerkstoffe** wurde sowohl in vorhandenen Sekundärquellen, als auch in den durchgeführten Workshops als zunehmend wichtig. Verschiedene Themen mit Relevanz für das Feld Verbundwerkstoffe, z. B. Verbindungstechnologien sowie Test- und Simulationsverfahren, wurden genannt. Auffällig ist wiederum die Experteneinschätzung einer fehlenden Akzeptanz von naturfaserverstärkten Kunststoffen (NFK), die als wesentliches Hindernis für Fortschritte auf dem Gebiet genannt wurde.

Materialien unter extremen Bedingungen wurden in den Interviews als hoch relevant gesehen, wobei Fragestellungen zu Korrosionsbeständigkeit und Stabilität bei Wechselbelastungen in die Online-Befragung aufgenommen wurden (siehe Tabelle 10.3).

Weitere Zukunftsthemen stellen Prozesstechnologien sowie Technologien für den Einsatz in Herstellungs- und Bearbeitungsprozessen von Materialien dar. Diese wurden von den Expertinnen und Experten der Online-Befragung als hoch relevant für die wirtschaftliche Entwicklung in Deutschland genannt. In den Workshops und den Interviews wurden unterschiedliche Themen als wichtig genannt, die zum überwiegenden Teil auch in der Online-Befragung aufgegriffen wurden. Als überdurchschnittlich relevant sowie erst spät intensiv erforscht, wurden Verbindungstechnologie für unterschiedliche Werkstoffe sowie das Recycling von Verbundwerkstoffen gesehen. Besonders späte Forschungsintensität bei hoher Relevanz wird außerdem für die Reparatur komplexer Materialsysteme angenommen. Mit Abstand am spätesten wird nach Expertenmeinung die Herstellung von Materialien durch selbstorganisierende Prozesse sowie der Aufbau aus einzelnen Molekülen erwartet. Letztere Themen werden jedoch als weniger relevant eingeschätzt.

Ein weiteres Gebiet stellt das **Management von Werkstoffdaten** dar. Dieses wurde in »Prüfen und Analysieren von Materialien und Werkstoffen« sowie »Modellierung und Simulation« unterteilt. Auffällig ist, dass beide Themen in der Online-Befragung insgesamt im Vergleich zu anderen Themen als unterdurchschnittlich wichtig angesehen werden. Dem steht die Einschätzung von Expertinnen und Experten aus Interviews und Workshops gegenüber, die beide Themen als langfristig besonders wichtig ansehen.

Im Gebiet des **Prüfens und Analysierens von Werkstoffen** wurde von den befragten Experten die Analyse von Nanostrukturen als besonders bedeutsam genannt. Demgegenüber wurden die vollständige Automatisierung von Prüfverfahren sowie die simultane Prüfung unterschiedlicher Parameter lediglich als durchschnittlich wichtig eingeschätzt. Dies widerspricht der Einschätzung aus den Gesprächen mit Expertinnen und Experten, hier eine hohe wirtschaftliche Bedeutung sehen, da deutsche Unternehmen bei den entsprechenden Technologien weltweit führend sind und die Verfahren in immer mehr Prozessen eingesetzt werden. In den Befragungsergebnissen spiegelt sich diese Ambivalenz wider, da alle Personen mit hoher Fachkenntnis die Relevanz der Themen als »hoch« bzw. »sehr hoch« einschätzen. Eine derartige Diskrepanz ist in keiner Bewertung der anderen Aspekte im Zukunftsfeld Materialien zu finden.

Modellierung und Simulation umfasst das virtuelle Design von Materialien und Prozessen und wird von den Befragten in der Online-Befragung als überdurchschnittlich relevant angesehen. Außerdem wird ein überdurchschnittlich später Forschungshöhepunkt erwartet. Dies spiegelt die Eindrücke aus den Experteninterviews sowie die Workshop-Ergebnisse wider. Der nationale Workshop brachte zudem die stochastische Modellierung von Werkstoffparametern als wichtiges Forschungsthema auf. Laut der Befragung wird überdurchschnittlich spät intensive Forschung erwartet, allerdings wird dieses Thema als verhältnismäßig wenig relevant angesehen. Die Ursache hierfür könnte darin liegen, dass ca. 30 Prozent der Befragten eine fehlende Akzeptanz als Hauptproblem der weiteren Entwicklung des Forschungsgebiets konstatiert. Zudem sehen ca. 35 Prozent in den fehlenden Ausbildungsmöglichkeiten ein wesentliches Hindernis der Entwicklung der Modellierung und generell der Simulation. Hier sei aber auch auf das Zukunftsfeld neuen Zuschnitts »Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation« verwiesen.

10.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick

Die folgende Tabelle 10.3 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Zukunftsthemen im BMBF-Foresight-Prozess. **Themen nach 1. Recherche** sind die Themen aus den Prozessen der Fachreferate (sofern sie nicht aussortiert wurden, weil sie bereits auf der Forschungsagenda stehen) und aus der ersten Literaturanalyse. **Themen nach 1. Workshop** sind diejenigen Themen, die nach dem 1. Workshop besonders verfolgt werden sollten. Die Tabelle 10.2 im vorangegangenen Abschnitt ist der auf dem Workshop bearbeitete Stand und damit zwischen den Themen nach erster Recherche und den Themen nach dem ersten Workshop anzusiedeln. **Themen Online-Befragung** sind in die Online-Befragung eingegangen, bedeuteten also eine weitere Zusammenfassung der Zwischenergebnisse, die in der Befragung bewertet wurden. Und die **Themen nach Kriterienfilter** sind bereits »Zukunftsthemen«, die in der letzten Phase des Prozesses untersucht wurden. Sie sind in der Regel sehr ähnlich den am En-

de des BMBF-Foresight-Prozesses vorgeschlagenen Zukunftsthemen (siehe erste Tabelle dieses Kapitels). Durch letzte Recherchen und Experteninterviews sind jedoch noch einige Zukunftsthemen modifiziert worden.

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Nachwachsende Rohstoffe	**Kernbereich**	**Materialien mit anwendungsspezifischen Eigenschaften - Gesundheits- und Biomaterialien**	**Virtuelles Materialdesign (in Modellierung)**
Naturfasern (kostengünstige, industrielle Herstellung von Naturfasern, Naturfasern im Außenbereich)	Komplexe Verbundwerkstoffe	Neue biokompatible langzeitstabile Materialsysteme für eine alternde Gesellschaft	Bioaktive und biodegenerative Materialien
Grundstoffe für Lebensmittel	Oberflächentechnik	Sensorische und aktuatorische biokompatible Materialsysteme als Replacements	Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK)
Alternative Grundstoffe (Biotechnologieprodukte, Wood-Plastic-Composites	Zelluläre Werkstoffe und Membrane	Bioaktive und biodegenerative Materialien zur Wiederherstellung von Körpergewebe	Smart Materials
Polymere	Beschichtungen	**Verbesserung von herkömmlichen Materialien organischer Art**	Komplexe Verbundwerkstoffe
Biomaterialien (hochfeste biokompatible und bioaktive Polymere)	Smart Materials	Neue Eigenschaftskombinationen für funktionelle Polymere	Materialien unter extremen Bedingungen
Leitfähige Polymere (leitfähige Polymere auf Basis von Nanopartikeln, Polymer-LEDs, industrielle kostengünstige Herstellung leitfähiger druckbarer Polymere)	Recycling von Verbünden (insbesondere Nano)	Leitfähige Polymere zur Erweiterung des Funktions- und Einsatzspektrums	Biokompatible (intelligente) Materialien
Faserverstärkte Polymere	Thermoelastische Materialien	**Prozesstechnologie mit Innovationssprüngen im Herstellungs- und Bearbeitungsprozess von Materialien**	
Glas	Werkstoffe für Fusionstechnologie	Recycling von komplexen Materialsystemen und Verbünden	
Photonische Komponenten	**Schnittstellen**	Materialherstellung durch Selbstanordnung	
Bio-Werkstoffe (Glas als Replacement-Material, Arrays auf Basis von Glas (Detektion von Biomolekülen), bioaktive Gläser, Glas als Wirkstoffdepot	Biomaterialien	Erzeugung von feinen Strukturen durch die Manipulation von Molekülen und Atomen	
Neue Herstellungstechnologien (neue energieeffiziente, CO_2-neutrale Schmelzprozesse,	Produktionstechnik für hybride Werkstoffe	Entwicklung neuer Katalysatoren für die effiziente Polymerherstellung	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Großvolumige kontrollierbare Schmelzprozesse)			
Modellierung & Simulation	Werkstoffinhärente Informationsspeicherung	Neue Membranen	
Neue skalenübergreifende Modelle & Simulationen von Werkstoffen (neue Softwarelösungen für das Durchführen der Simulationen, skalenübergreifende Simulation der Interaktion von Werkstoffen)	Verfahrenskombinationen	**Materialien mit anwendungsspezifischen Eigenschaften - Neue Energiewerkstoffe für die Energiesicherheit der Gesellschaft**	
Skalenübergreifendes Modellieren und Simulieren von Prozessen (Modellieren von Herstellprozessen (z. B. Guss) und Optimierung der Prozesse, Modellieren von Bearbeitungsprozessen (z. B. Umformen))	Biomaterialien für Infrastrukturen	Neue Beschichtungsmaterialien für die kostengünstige Gewinnung solarer Energie	
Zusammenfügen verteilter Datenbestände		Hochtemperaturwerkstoffe für energietechnische Anwendungen	
Analytik & Charakterisierung	Katalysematerialien	Entwicklung neuer Materialsysteme für eine neue Generation von Energiespeichern	
3D-Analyse von Nanostrukturen (Nanoidentierung)	Materialien für Thermogeneratoren	Neue Werkstoffe für den zuverlässigen Schutz von radioaktiver Strahlung	
Erheben neuer Material- und Werkstoffdaten	Wasserstoffproduktion	**Verbesserung von herkömmlichen Materialien unter extremen Bedingungen**	
Validieren von Materialdaten (z. B. Langzeitstabilität, Belastungsfähigkeit)	Solarzellen	Stabilitätsvermögen von Werkstoffen bei hohen mechanischen Wechselbelastungen erhöhen	
Messen & Prüfen	Energiespeicher	Resistenz von Werkstoffen gegen aggressive Medien zur Verlängerung der Lebensdauern	
Weitere Automatisierung der Verfahren (hohe Portabilität der Prüfgeräte)	Chemie		

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Simultanes zerstörungsfreies Prüfen von Struktur, chemischen und mechanischen Eigenschaften			
Prüfen komplexer Materialstrukturen und Verbünde		**Verbesserung von herkömmlichen Materialien anorganischer Art**	
Nichteisenmetalle		Eisenmetalle - Neue ultrahochfeste Stähle für hochfeste Strukturen bei geringer Masse und hoher Duktilität	
neue Leichtbaulegierungen (Alumnium, Titan, Magnesium und Verarbeitungstechnologie Leichtbaulegierungen)		Eisenmetalle - Prozesstechnologien für die Bearbeitung und Reparatur von Leichtbauwerkstoffen in der Massenproduktion	
Metallschäume		Nichteisenmetalle - Neue Leichtbaulegierungen und Metallschäume, die hohe Festigkeit und Duktilität mit geringer Masse und Korrosionsanfälligkeit vereinen	
Energieeffiziente, CO_2 neutrale Herstellprozesse		Nichteisenmetalle - Gegen Hitze, Oxidation und mechanische Beanspruchung beständige Superlegierungen für Hochtemperaturanwendungen	
Kenngrößenbestimmung		Nichteisenmetalle - Thermoelastische Materialien für Hochtemperaturanwendungen über 1200°C mit geringster Wärmeausdehnung	
Eisenmetalle		Eisenmetalle und Nichteisenmetalle- Prozesstechnologien für energieeffiziente und CO_2-effizienteHerstellungsverfahren	
Neue hochfeste Stähle (TWIP-, Zwei-/ Mehrphasen-, Hochmanganhaltige , faserverstärkte, Bor-legierte Stähle)		Photonische Komponenten aus Glas mit ultrafeinen Strukturen	
Neue ultraleichte Stähle		Völlig neue Verfahren für die effiziente Glasschmelze	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Flexible Produktionsprozesse			
Energieeffiziente, CO_2 neutrale Herstellprozesse			
Verbundwerkstoffe		**Verbundwerkstoffe**	
Faserverstärkte Leichtbauwerkstoffe		Polymer-Matrix-Composite (PMC) für recyclefähige Strukturen bei weiterhin verbesserten Funktionseigenschaften insbesondere im Leichtbaukontext	
Bio-Verbundwerkstoffe		Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) für eine höhere Penetration von Kompositen mit Anteilen nachwachsender Rohstoffe bei äquivalenter Leistungsfähigkeit und konstanter Güte	
Metallische Verbünde		Kostengünstige Herstellungsverfahren mit konstanter Produktqualität bei Metall-Matrix-Compositen (MMC)	
Nanokomposite		Ceramik-Matrix-Composite (CMC) mit geringer Sprödbruchgefahr zur Steigerung der Temperatur- und Verschleißfestigkeit	
Chemische Verfahren für das Herstellen von Verbünden		Schlüssige Verbindung von Matrix und Verstärkungsmittel zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Verbundwerkstoffen	
Verbindungstechnologien für unterschiedliche Werkstoffe			

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Smart Materials		**Entwicklung neuer Werkstoffklassen - Smart Materials**[33]	
Aktorische Materialien		Selbstheilende Materialien für höhere Lebensdauer und Zuverlässigkeit	
Bionische Konzepte in Materialien		Sensorische und katalytische Beschichtungen für zielgerichtete Objektmanipulation	
Selbstheilende Materialien		Piezoelektrische Materialien mit weitreichenden Anwendungen als Kraft-Weg-Element	
Kostengünstige industrielle Herstellungsverfahren		Metamaterialien	
Keramiken		Zuverlässige Herstellungstechnologien für Smart Materials mit hohen Stückzahlen	
Hochtemperaturwerkstoffe			
Biomaterialien (resorbierbare Keramiken)			
Herstellung komplexer Strukturen mit hoher Zuverlässigkeit			

Tabelle 10.3: Entstehung der Zukunftsthemen Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren – Zwischenstände

[33] Materialien, die in der Lage sind, verletzte Bereiche eines Systems (z. B. Risse in Oberflächen) zu regenerieren und damit die Funktionalität zu erhalten.

10.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern

Das Zukunftsfeld Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren weist als Querschnittsthema vielfältige Verbindungen und Überschneidungen zu fast allen anderen Feldern auf. Hervorzuheben sind Verknüpfungen zu den Zukunftsfeldern Energie, wie beispielsweise über Materialien für neuartige Energiespeicher oder als Beschichtungen für Solarzellen. Starke Verknüpfungen bestehen zum Zukunftsfeld Gesundheit, z. B. über Materialien für alle Arten von »Replacements«, die zugleich bioaktive, biodegenerative oder aktuatorische Eigenschaften aufweisen.

Vielfältige Überschneidungen bestehen ferner mit dem Zukunftsfeld Nanotechnologie. Diese werden deutlich bei der Nutzung von Phänomenen der Selbstanordnung für die Herstellung von Materialstrukturen, der Materialherstellung durch Manipulation von einzelnen Molekülen oder der Analyse von Materialstrukturen auf der Nanoebene. An verschiedenen Punkten werden zudem Schnittstellen zum Zukunftsfeld »Industrielle Produktionsprozesse« deutlich. Besonders enge Verknüpfungen bestehen bei Fragestellungen der Materialprüfung sowie der Modellierung und Simulation von Prozessen und Verfahren. Auffällig ist, dass im Zukunftsfeld neuen Zuschnitts »Zukunftsfähige Lebensräume« die Baumaterialien, also Materialfragen, eine besonders hohe Wichtigkeit zugesprochen bekommen.

Themenkoordination:
Antonino Ardilio, IAO (antonino.ardilio@iao.fraunhofer.de)

11 Nanotechnologie

Die Nanotechnologie ist eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Es wird erwartet, dass sie Auswirkungen auf nahezu alle Branchen haben wird. In Deutschland sind derzeit rund 750 Unternehmen im Bereich Nanotechnologie tätig. Hier existiert eine ausdifferenzierte Forschungslandschaft mit starker Beteiligung von HGF, MPG, WGL, DFG, FhG, Hochschulen, Ressort- und Industrieforschung. Rund 50 Netzwerke bestehen, darunter fördert das BMBF seit 1998 (teilw. 2003) neun Kompetenzzentren. Die zunehmenden öffentlichen Investitionen belaufen sich derzeit weltweit auf ca. 4 Mrd. US Dollar pro Jahr, wobei sich die Fördermittel in den gegenwärtig wichtigsten Forschungsregionen USA, EU und Japan die Waage halten.

Aktuelle Marktprognosen für nanooptimierte Produkte gehen von einer volkswirtschaftlichen Hebelwirkung der Nanotechnologie auf ein Weltmarktvolumen von bis zu 3 Billionen US Dollar bis zum Jahr 2015 aus. Nanotechnologie alleine konstituiert kein Produkt, sondern ermöglicht Funktionalitäten, die als Materialien oder Systeme in Produkten Anwendung finden und somit eine Wertschöpfung erzielen.

11.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Nanotechnologie

Neue Eigenschaften nanoskaliger Materialien
Materialien mit neuartigen Effekten, funktionalisierte komplexe Materialien mit physikalischen/ chemischen Eigenschaften
Nano-Hybridmaterialien mit gänzlich neuartigen Grenzflächenphänomenen
Metamaterialien mit neuartigen optischen Eigenschaften
Nanomaterialien mit speziellen Effekten bei Umgebungsbedingungen
Nanobiotechnologie und Nanomedizin
Biologische Prinzipien für die Nanotechnologie (Selbstorganisation)
Analyse- und Manipulationsmethoden der Nanotechnologie für die Biologie
Diagnostik/Imaging durch Nanotechnologie (z. B. molekularen Bildgebung)
Therapie/Behandlung (z. B. Drug-Delivery)
Nanoelektronik und Nanophotonik (insbesondere Manipulation von Licht durch künstliche Materialien)
Nanophotonik – Manipulation von Licht durch künstliche Materialien
Bottom-up-Nanoelektronik (Beyond CMOS)
Neue Eigenschaften nanoskaliger Materialien durch gekoppelte Eigenschaften

Nanomaterialien für Energieanwendungen
Nanomaterialien und -systemen mit thermodynamischen, optischen oder elektrochemischen Eigenschaften zur Energieeinsparung
Nanomaterialien für einen verlustarmen oder kabellosen Energietransport

Tabelle 11.1: Identifizierte Zukunftsthemen Nanotechnologie im Überblick

Die in der Tabelle 11.1: Identifizierte Zukunftsthemen Nanotechnologie im Überblick genannten Zukunftsthemen haben sich als die langfristig wichtigsten herauskristallisiert.[34]

11.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen

Auf der Nanoskala konvergieren klassische Disziplinen wie Physik, Chemie und Biologie. Physikalische Gesetzmäßigkeiten, chemische Stoffeigenschaften und biologische Prinzipien werden zusammengeführt, worauf die Sichtweise der Nanotechnologie als Querschnittstechnologie oder »Enabling Technology« beruht. Drei Aspekte sind ausschlaggebend, um von einer Nanotechnologie sprechen zu können: die gezielte Herstellung/ Manipulation von Strukturen oder molekularen Materialien und Systemen, der Größenbereich kleiner 100 Nanometer sowie die Nutzung neuer Funktionalitäten und Eigenschaften, die allein aus der Nanoskaligkeit der Systemkomponenten resultieren.

Start des Prozesses

Die Förderung der Nanotechnologie vollzieht sich in einer thematischen Breite, die sich weiterentwickelt und technische, anwendungsbezogene und gesellschaftliche Aspekte einschließt. Als **Start für den Foresight-Prozess** wurden gemeinsam mit dem Institut für Nanotechnologie (INT) des Forschungszentrums Karlsruhe (Unterauftragnehmer im Rahmen des Foresight-Prozesses) aus dem breiten Themenspektrum der Nanotechnologie folgende neun besonders relevante Bereiche ausgewählt:

Nanomaterialien: Die besonderen Effekte in der Nanoskaligkeit eröffnen die Möglichkeiten der Herstellung und Nutzung von Materialien mit neuen Eigenschaften. Diese kommen als Nanomaterial oder -struktur zum Einsatz oder dienen dem Aufbau von komplexeren Systemen.

Kohlenstoffnanoröhrchen: Kohlenstoffnanoröhren sind eine Unterklasse der Nanopartikel (CNT: Carbon Nanotubes). Für die Zukunft wird den CNT aufgrund ihrer außergewöhnlichen und einmaligen strukturellen, mechanischen,

[34] Die dunkelgrau unterlegten Felder sind die Zukunftsthemen, die hellgrau hinterlegten einzelne, besonders wichtige Forschungsaufgaben.

elektronischen und anderer Eigenschaften ein hohes wirtschaftliches Potenzial prognostiziert.

Nanofabrikation: Alle heutigen und zukünftigen Erzeugnisse der Nanotechnologie müssen mit vertretbarem Aufwand produziert werden, um in die breite Anwendung zu gelangen. Daher befasst sich ein großer Bereich der Forschung mit neuartigen, ultrapräzisen Herstellungs- und Bearbeitungsmethoden von Strukturen, Schichten, Oberflächen im Nanometerbereich: die Nanofabrikation.

Nanoanalytik: Die Analyse und Detektion von Nanostrukturen ist eine der zentralen Aufgaben der Nanowissenschaften und Grundlage für die Nanotechnologie. Von Interesse sind neben rein geometrischen auch physikalische, chemische und biologische Eigenschaften, die sich oft nur über die dynamische Entwicklung eines Phänomens ausreichend charakterisieren lassen. »Herkömmliche« Analyseinstrumente wie optische Mikroskopie erreichen ihre Auflösungsgrenzen bei etwa 250-500 nm. Elektronenmikroskop oder Rastertunnelmikroskopie überwinden diese Grenze, indem Elek-tronenstrahlen genutzt oder Atome »fühlbar« gemacht werden.

Funktionale Moleküle: Der Bereich »funktionale Moleküle« fasst die Weiterentwicklung solcher Forschungsgebiete wie synthetische Chemie und supramolekulare Chemie unter Einbezug biologischer, physikalischer und ingenieurswissenschaftlicher Prinzipien und Techniken zusammen. So ist die supramolekulare Chemie heute in der Lage, immer größere und funktionalere Ensembles zu generieren.

Nanoelektronik: Als Nanoelektronik wird die auf Silizium basierende Elektronik mit Strukturbreiten unter 100 nm sowie dazu alternative ebenfalls auf der Nanotechnologie beruhende Ansätze verstanden. Wenn die »Extrem Ultravioletten Lithographieverfahren« (EUV) aufgrund des immer ungünstigeren Stromverbrauchs durch unerwünschte Leckströme (Quanteneffekte) endgültig an ihre Grenzen stoßen, sind in der nahen Zukunft radikale Technologiewechsel unumgänglich.

Nanophotonik: Nanophotonik lässt sich als ein Teilbereich der Nanooptik auffassen und hat zum Ziel, mit Methoden der Nanotechnologie die Eigenschaften von Licht maßschneidern und kontrollieren zu können.

Nanoenergetik: Es werden Nanomaterialien und -systeme zur Energieumwandlung, -speicherung, zum Energietransport und zur Energieeinsparung erforscht und entwickelt, um Systeme effizienter, kleiner, leistungsfähiger zu machen oder neue technische Prinzipien anzuwenden.

Nanobiotechnologie: Erforscht und genutzt werden biologische Prinzipien für die Nanotechnologie (Bio2Nano) sowie Analyse- und Manipulationsmethoden der Nanotechnologie für die Biologie (Nano2Bio). Die Oberflächenfunktionalisierung (z. B. Schnittstelle technisch-biologisches System) und das gezielte Design von Nanopartikeln kommen besonders zum Tragen. Angrenzende Gebiete sind Medizin(technik), Pharmazie oder Informations- und Kommunikationstechnologie.

Foresight-Workshop 2007

Dies waren die Einstiegsthemen für den **nationalen Experten-Workshop** im November 2007 (siehe auch Tabelle 11.1). Der Workshop hatte das Ziel, ihre Vollständigkeit zu überprüfen sowie die Relevanz für den Foresight-Prozess zu bewerten.

Als besonders **wichtig** kristallisierten sich heraus: **Funktionale Moleküle** (hier befindet sich auch die Grundlagenforschung noch in den Anfängen), die **Nanophotonik** (mit den Bereichen Photonische Kristalle, Metamaterialien und Plasmonik), aber auch die **Systemintegration** und geschlossene Prozesskette zur **Fabrikation/ Produktion** zukünftiger nanotechnologischer Produkte. Ebenfalls besonders relevante Themen waren **alternative Bottom-up**-Ansätze in der Nanoelektronik, da in den nächsten 10 bis 20 Jahren die herkömmliche (Top-down-) Siliziumelektronik an ihre Grenzen stoßen wird und dann abgelöst werden könnte. Ebenso hervorgehobene Forschungsthemen waren nach Einschätzung der Workshopteilnehmer die **Nanophotonik, alternative Nanoelektronik** mit klaren Schnittstellen zu Informations- und Kommunikationstechnologie, optischen Technologien oder auch »**Brain Machine Computer Interfaces«** als relevantes Thema an der Schnittstelle Nano-Kognition. Weiter gehören hierzu **neuartige Energiesysteme** durch Nanotechnologie, **technische industrielle Photokatalyse** und **Grenzflächenphänomene biologisch-technischer Systeme**.

Im Zuge des Workshops wurden weitere potenzielle Zukunftsthemen aufgenommen: So wurde die **Nachhaltigkeit** als ein Querschnittsthema mit besonderer Relevanz mit ihrer gesellschaftlichen, ökologischen und ökonomischen Sichtweise berücksichtigt. Hierunter fallen z. B. die Nanotoxikologie als neues, sich etablierendes Forschungsfeld im Querschnitt zwischen Toxikologie, Nano(bio)technologie, Medizin, Statistik etc. (gesundheitliche Aspekte) oder die Untersuchung und Beeinflussung der Lebensdauer, Zuverlässigkeit und Sicherheit nanoskaliger bzw. Nanomaterialien enthaltender Bauteile und Systeme, z. B. aufgrund veränderter Grenzflächen auf der Nanoskala (ökonomische Aspekte). Soziale Aspekte sind aus Expertensicht zu berücksichtigen in Bezug auf die gesellschaftliche Akzeptanz. Diese hat auch für die Kommerzialisierungschancen von Nanotechnologie-Produkten Relevanz . Ökologische Aspekte be-

treffen mögliche **Umweltauswirkungen von Nanomaterialien** und **-systemen** (z. B. Lebenszyklus-Betrachtung, Auswirkungen auf Ökosysteme).

Deutlich wurde auch, dass Top-down-Verfahren und -Ansätze immer stärker durch **Bottom-up-Ansätze** ersetzt und in Zukunft eine außerordentlich wichtige Rolle einnehmen werden.

Nanomaterialien
1-dim nanoskalig: Schichtstrukturen, ultradünne organische Schichten, Hybridpolymere, Dünnfilme
2-dim nanoskalig: Nanoröhren/ CNTs, Nanodrähte, Nanostäbe, Nanogräben
3-dim nanoskalig: Nanopartikel, Nanopulver, Nano-Metalloxide, Fullerene, Quantum Dots
Nanoporöse Porenstrukturen (offen/geschlossen)
Komplexe Strukturen: z. B. supramolekulare Strukturen
Kohlenstoff-Nanoröhren (CNT)
Herstellung (Lichtbogen, CVD, Laserverdampfen) und Separation (Zentrifugation, Dielektrophorese)
Gezielte Nutzung der Struktur (Chiralität, Durchmesser, Länge, Defekte, SWNT, MWNT) und der daraus folgenden Eigenschaften
Nanofabrikation
Top-Down: Nanolithografie (EUV-, Elektronenstrahl- Ionenstrahl-, Lithografie, etc), Strukturübertragung, etc.
Bottom Up: Selbstorganisation und molekulare Erkennung, Synthese und Selfassembly, Rastersondenverfahren
Nanoanalytik
Rastertunnelmikroskopie
Rasterkraftmikroskopie
Sensorik (optisch, magnetisch, elektro-chemisch, biologisch, mechanisch)
Funktionale Moleküle
Einzelmolekül Bauteile und Systeme (Molekulare Elektronik, Schalter)
Molekulare Netzwerke, Kristalle
Chemisch- Biologisch-Technische Hybridstrukturen/-systeme (Molekulare Motoren)
Nanoelektronik
Silizium-Halbleiter-Elektronik <100nm (Top-Down)
Nano-Silizium-Hybriddesign (z. B. CMOS/Nano, Crossbar, CNT)
Magnetoelektronik (GMR-Effekt), Spinelektronik
Alternative (Bottom-Up) Ansätze: Einzelelektrontransistor, Quantenpunkt-Bauteile, Quantencomputer, DNA – Computer
Nanophotonik
Photonische Kristalle (opt. Schalter, Filter)
Metamaterialien (perfekte Linsen)
Plasmonik (Sensorik, Biophotonik)
Nanoenergetik
Energieumwandlung (Materialien/Dünnschichten für herkömmliche Solarzelle, Quantenpunkt-Solarzellen, Farbstoffsolarzellen, organische Solarzellen, Solarthermie, Wasserstofferzeugung durch Sonnenlicht, OLED, Katalysator/Membran für Brennstoffzelle, Thermo
Energiespeicherung (H2- Speicherung, Latentwärmespeicher, supraleitende magnetische Energiespeicher, Superkondensatoren (SuperCaps), Batterien (Li-Ionen, ...)
Energietransport (Wärmeleitende Materialien, Supraleitende Materialien)

Energieeinsparung (verbesserte Materialeigenschaften, Dämmung, schaltbare Werkstoffe, Reflektion, leichtere Materialien, Materialsubstitution)
Nanobiotechnologie
Bio2Nano (Biol. Bausteine im nm-Maßstab, biol. Adaptionsfähigkeit, Biomaterialien, Biosensoren, biomolekulare Motoren/ Maschinen, Biomineralisation Biomembrane)
Nano2Bio (Tissue Engineering, in vivo Behandlungsverfahren, Drug Delivery, biokompatible Materialien, Diagnostik/Früherkennung (z. B. Biochip, molekulare Erkennung) in Kombination mit bildgebenden Verfahren, Nanopartikel-gestützte Gentherapie, Biostrukture

Tabelle 11.2: Themen Nanotechnologie im ersten Foresight-Workshop 2007

Monitoring-Panel erste Welle

Basierend auf den Ergebnissen des ersten Experten-Workshops im November 2007 in Berlin wurden die zentralen als wichtig und weiter zu verfolgenden Forschungsgebiete der Nanotechnologie in der ersten **Monitoring-Welle** reflektiert und validiert. Im Rahmen der ersten Welle des internationalen Monitorings konnte durch die Interviews mit den Panellistinnen und Panellisten die Einteilung und Sichtweise des Zukunftsfeldes Nanotechnologie wie in der Tabelle 11.2 abgebildet weitgehend bestätigt werden.

Vertiefende **Experteninterviews** mit Wissenschaftlern am Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen dienten zudem einer weiteren Konkretisierung und Verdichtung der Themen. Diese sind in die Online-Befragung eingeflossen.

Dabei wurde seitens der Experten noch einmal die besondere Bedeutung von **Nanomaterialien** als »Building Blocks« mit ihrer Forschungsrelevanz verdeutlicht. Die Liste der wichtigen Themen wurde durch Anregung der internationalen Panellistinnen und Panellisten im Bereich der Biologie/ Medizin ergänzt. Demnach sollte **Nano-Medizin** als wichtiges und eigenes Gebiet der Nanotechnologie betrachtet werden, weil sie ein anderes Innovationssystem (Ansprechpartner, Akteure, Fragestellungen etc.) darstellt als Nanobiotechnologie. Ebenso ergänzt bzw. präzisiert wurde der Bereich der Analytik, was zu einem eigenen Bereich Virtuelle/ visualisierte Nanotechnologie führte: So wurden die Notwendigkeit und der Nutzen, aber auch die Herausforderungen bei der Entwicklung und Durchführung von kombinatorischen Screenings der Eigenschaften von (hauptsächlich) neuen Materialien von den Befragten erkannt. Eine wesentliche Voraussetzung für diese Untersuchungen sind die entsprechenden mess- und prozesstechnischen Werkzeuge für die automatisierte Analyse von Materialkombinationen. Die Aspekte dieser Arbeit (»combinatorial synthesis tools«, »nano scale characterization equipments«, »standardisation for nano data sheets«, »collaborative analysing strategy« etc.) wurden zusätzlich aufgenommen.

Die Konvergenz der unterschiedlichen Wissensdomänen, also die interdisziplinäre Zusammenarbeit, und die Kommerzialisierung von Nanomaterialien durch eine schnelle, frühzeitige und effiziente Identifikation von relevanten Materialien mit geeigneten Funktionalitäten aus der Forschung wurden hinzugefügt. Ebenso relevant seien der Transfer in die Anwendung auf Forscherseite sowie die Kenntnis der Anforderungen aus der Industrie.

Durch das internationale Monitoring sowie durch die Interviews/ Expertengespräche am Institut für Nanotechnologie konnte der Eindruck bestätigt werden, dass für nahezu alle diskutierten Zukunftsthemen der Nanotechnologie bereits in den nächsten fünf Jahren eine hohe bis sehr hohe Forschungsintensität erwartet wird.

Online-Befragung

Aus den Startthemen sowie den Ergänzungen aus der ersten Welle des internationalen Monitorings wurden neun Themen mit Unterthemen abgeleitet, um sie in der nationalen Online-Befragung hinsichtlich Relevanz, Bedeutung und Forschungsintensität bewerten zu lassen (Tabelle 11.3).

Im Rahmen der **Online-Befragung** schätzten mehr als 80 Prozent der Befragten im Zukunftsfeld Nanotechnologie ihre eigene Fachexpertise als »mittel« bis »sehr hoch« ein.

Es wurden nur wenige ergänzende Themen benannt, wie z. B. die **Risikoforschung** (Bewertung und Kommunikation), **Nanoethik** oder **Nanoionik**. Alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer empfahlen, die in der Befragung genannten Themen weiter zu bearbeiten. Hinsichtlich der Zukunftsperspektive wurde gefragt, ob die Themengebiete auch in 10 Jahren oder später noch ein wichtiges Forschungsthema darstellen. Bis auf die Themen »Nachhaltige sowie Virtuelle/ Visualisierte Nanotechnologie«, deren künftige Bedeutung mit »zutreffend« bestätigt wurde, charakterisierten die Befragten die voraussichtliche Bedeutung aller weiteren Themen in 10 Jahren mit »voll zutreffend«.

Die im nationalen Experten-Workshop als wichtig, aber bereits gefördert eingestuften Nanomaterialien wurden in die Befragung unter dem Aspekt »Neue Eigenschaften nanoskaliger Materialen« aufgenommen und mit sehr hoher Relevanz, heute und auch für die nächsten 10 Jahre und später, bewertet. Dies deckt sich mit den Aussagen der nationalen und internationalen Experten, welche das Thema als absolute Basis für alle künftigen Weiterentwicklungen in der Nanotechnologie sehen und ihm eine langfristige Bedeutung zumessen.

Die Themengebiete funktionale Moleküle, Nanophotonik und -elektronik sowie Nanobiotechnologie und -medizin wurden mit ähnlich starkem Interesse be-

trachtet. Ihnen wird heute eine sehr wichtige und künftig (Zehnjahresperspektive) noch steigende Bedeutung zugemessen, was auf einen langfristigen Charakter sowie wachsende Anwendungsnähe hindeutet. Die Nanosystemintegration und Beiträge der Nanotechnologie zu Energiesystemen werden heute als wichtig und mit zunehmender Bedeutung für die nächsten 10 Jahre eingeschätzt. Auffällig ist, dass die im Workshop als sehr wichtig und unbedingt weiter zu verfolgend eingeschätzten Themen funktionale Moleküle, Nanophotonik, Bottom-up-Nanoelektronik (»Beyond CMOS«) sowie Nanosystemintegration (Fabrikation), in der Online-Befragung zwar bestätigt werden, aber erst an zweiter Stelle nach den Nanomaterialien gesehen werden. Gemäß der Ergebnisse der Befragung sind diese Themen mit der höchsten Forschungsintensität in den nächsten 6 bis 10 Jahren als bedeutend anzusehen.

Die Nanobiotechnologie wurde im Workshop als sehr wichtig bis ambivalent eingestuft. Zu der internationalen Expertenbefragung wurde die Nanomedizin heute und auch zukünftig eine sehr hohe Bedeutung zugemessen. Auch Nanomaterialien für Energiesysteme wurden im Workshop generell als wichtiges, weiter zu verfolgendes Thema eingestuft. Die Ergebnisse der Befragung zeigen ein differenziertes Bild auf Detailebene, da je nach Beiträgen der Nanotechnologie zu Energiespeicherung, -umwandlung, -einsparung oder -transport die Relevanz zwischen »wichtig« bis »sehr wichtig« und die Zeiträume zwischen einem und 15 Jahren gesehen werden.

Chemische Verfahren wurden auf Anregung der Experten im ersten Workshop mit den Unterthemen Katalyse, Trenntechnik und Mikro-/ Nanofluidik neu aufgenommen. Die Trenntechnik wurde im Workshop als wichtig, jedoch als nicht weiter verfolgenswert eingeschätzt. Die Ergebnisse der Befragung bestätigen prinzipiell diese Einschätzung, da der Zeitraum der höchsten Forschungsintensität eher kurzfristig gesehen wird. Die Katalyse wurde im Workshop als relativ wichtig erachtet, in der Befragung aber ebenso wie die Trenntechnik nicht als langfristiges Thema eingeschätzt. Nachhaltigkeit sowie Simulationen nanoskaliger Systeme wurden im Workshop als sehr wichtige Zukunftsthemen erachtet und in die Befragung als Nachhaltige und Virtuelle/ visualisierte Nanotechnologie neu aufgenommen. Die befragten Experten weisen diesen Themen jedoch eine im Vergleich zu den weiteren Themengebieten geringere Bedeutung zu. Im Fall der Virtuellen Nanotechnologie mag dies mit der Einschätzung zusammenhängen, dass Fortschritte stark mit Erfolgen auf dem Gebiet der Computertechnologie gekoppelt sind, denn derzeit fehlt es noch an der nötigen Rechenkapazität (Expertenkommentare). Dennoch wurden auch unzureichende theoretische/ mathematische Grundlagen bzw. Methoden mehrmals von den Expertinnen und Experten problematisiert, was auf einen großen Forschungsbedarf hinweist.

Für die Befragung wurde das Themengebiet Nanooptik aussortiert, welches in dem ersten Experten-Workshop benannt, jedoch als bereits intensiv gefördert eingestuft wurde. Das Thema ist zudem im Zukunftsfeld Optische Technologien mit Blick auf Herstellungsverfahren für die Nanooptik (nanostrukturierte Materialien und Bauteile durch Optik und Fertigung bzw. Bearbeitung mit Nanometergenauigkeit) sowie Nanophotonik berücksichtigt.

Bei der prozentualen Verteilung der Relevanz von »sehr wichtig« bis »unwichtig« zeigen sich in der Online-Befragung drei Typen der Verteilung: (1) Bei einem klaren Maximum bei »sehr wichtig« (und scharf abfallend in Richtung »weniger wichtig«) finden sich die Themen Nanomaterialien, funktionale Moleküle, Nanophotonik und -elektronik und Nanobiotechnologie und -medizin. Weiterhin zeigt auch das Thema nachhaltige Nanotechnologie eine solche Verteilung, was gegen ein Aussortieren spricht. (2) Ein Maximum zwischen »sehr wichtig« und »wichtig« weisen die Themen Nanosystemintegration und Nanotechnologie für Energiesysteme (Tendenz »sehr wichtig«) sowie chemische Verfahren (Tendenz »wichtig«) auf. (3) Zwischen »wichtig« und »mittel wichtig« findet sich das Thema virtuelle/ visualisierte Nanotechnologie. Es zeigt sich, dass sich, gemessen an der Verteilung der Relevanz ebenso wie an der durchschnittlichen Relevanz und den absoluten Werten, die gleiche Abfolge in der Priorisierung der Themengebiete ergibt.

Betrachten wir die Themengebiete hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Bedeutung für Deutschland, der Bedeutung für die Lebensqualität des Menschen, für neue Erkenntnisse in Wissenschaft und Technologie sowie als Impulsgeber für andere Forschungsgebiete, so werden diese Kriterien für nahezu alle Themengebiete mit »zutreffend« bis »völlig zutreffend« bestätigt. Besonders relevant für die wirtschaftliche Entwicklung wird der Beitrag der Nanotechnologie zu Energiesystemen, neuartigen Nanomaterialien, chemischen Verfahren, der Nanosystemintegration und der Nanophotonik und -elektronik gesehen.

Als am unwichtigsten wird die virtuelle/ visualisierte Nanotechnologie erachtet, welche auch in den weiteren Aspekten als weniger wichtig eingestuft wird (z. B. Bedeutung für die Lebensqualität). Für eine Verbesserung der Lebensqualität tragen nach Meinung der Befragten insbesondere die Nanobiotechnologie und -medizin sowie Beiträge der Nanotechnologie zu Energiesystemen bei. Als besonders relevant für die Wissenschaft werden neuartige Nanomaterialien, funktionale Moleküle und die Nanobiotechnologie und -medizin erachtet.

Somit stechen insgesamt die neuartigen Nanomaterialien – hier wird lediglich der Beitrag zur Lebensqualität etwas geringer eingeschätzt – sowie die Nanobiotechnologie und -medizin hervor. Beiträge der nachhaltigen Nanotechnologie werden in allen Bereichen (Wirtschaft, Wissenschaft, Impulsgeber, Lebensqualität) erwartet. Themengebiete, die prinzipiell sowohl hinsichtlich ihrer Relevanz

und Langfristperspektive (10 Jahre) als auch wegen ihres Beitrags zu Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft als bedeutend eingeschätzt werden, sind insbesondere neuartige Nanomaterialien, funktionale Moleküle sowie die Nanobiotechnologie und -medizin.

Auswahl Zukunftsthemen

Zu den wichtigen Zukunftsthemen mit einem Zeithorizont von 10 Jahren und mehr zählen in erster Linie, so die Analyse des Projektteams, Beiträge der Nanotechnologie zu globalen Themen mit breiter gesellschaftlicher Relevanz, wie **Nanobiotechnologie und Nanomedizin oder Nanotechnologie für Energiesysteme**. Beispiele sind Nanomaterialien und -systeme für therapeutische Verfahren und die medizinische Behandlung mit dem Ziel der Individualisierung der Verfahren, der Krankheitsheilung und gezielten Applikation von Therapeutika. Ebenso sind hier exemplarisch zu nennen: die Nutzung von Selbstorganisationsmechanismen biologischer Systeme für technische Systeme (z. B. Nanoelektronik/ -informatik, Diagnostik) unter Verwendung biologischer Bausteine (Bio2Nano) oder der Einsatz nanotechnologischer Verfahren und Komponenten in der Biotechnologie zur Miniaturisierung, Unterstützung und Kontrolle bio(techno)logischer Prozesse (Nano2Bio).

Für Energiesysteme ist die Forschung an und Entwicklung von Nanomaterialien und -systemen mit thermodynamischen, optischen oder elektrochemischen Eigenschaften zur Energieeinsparung, um effizienter und verbrauchssparender Energie zu nutzen, ebenso relevant wie die Erforschung von Nanomaterialien für einen verlustarmen oder kabellosen Energietransport.

Hinsichtlich künftiger Informations- und Kommunikationstechnologie und weiterer Anwendungen sind Entwicklungen der **Nanophotonik (insbesondere die Manipulation von Licht durch künstliche Materialien) und Nanoelektronik** besonders wichtig. Hier sind alternative Ansätze einer Bottom-up-Nanoelektronik (»Beyond CMOS«) relevant, wobei es z. B. um die Nutzung von Quanteneffekten zum gezielten Schalten, aber auch um das Erreichen neuer Funktionalitäten in nanoskaligen Bauteilen und Systemen an sich geht, z. B. durch Kontrolle elektronischer, Spin-, optisch-photonischer, phononischer (Nanophononik) und anderer Freiheitsgrade. Die Forschung an neuen Eigenschaften nanoskaliger Materialien, z. B. Multifunktionsnanomaterialien mit erhöhter Funktionalität und Effizienz durch gekoppelte Eigenschaften in einem System, ist für derartige, aber auch alle weiteren oben genannten Zukunftsthemen aus Sicht der Bearbeiter grundlegend.

Mit der Weiterentwicklung nanotechnologischer Komponenten und Bauteile nimmt die Bedeutung der Nanosystemintegration, insbesondere die industrielle Fertigung komplexer Architekturen unter Nutzung der Selbstorganisation und

Selbstanordnung (Bottom-up), weiter zu. Hierzu zählt die Fertigung bzw. Produktion von nanotechnologischen Systemen selbst (»Produktion von Nano«) sowie mithilfe der Nanotechnologie (»Nano in Produktion«). Auch die Synthese von Bottom-up- und Top-down-Fabrikationsmethoden durch die Zusammenführung der Vorteile beider Methoden in einer »Hybrid-Methode« ist aus unserer Sicht ein wichtiges Zukunftsthema.

Funktionale Moleküle, mit welchen Eigenschaften molekularer komplexer Strukturen gezielt beeinflussbar werden, könnten für eine spätere breite Fabrikation und Systemintegration fundamentale Bausteine liefern. Zukünftige Entwicklungsbereiche betreffen den Bottom-up-Aufbau komplexer, funktionaler supramolekularer Architekturen (z. B. molekulare Schalter oder Motoren), molekulare Netzwerke wie molekulare Kristalle und Netze ebenso wie Einzelmolekülsysteme mit z. B. elektronischen, magnetischen, optischen oder kombinierten Eigenschaften einzelner Moleküle für eine molekulare Elektronik oder Einzelmolekülmagnete, aber auch biologisch-chemische Hybridstrukturen als biologische Grundstrukturen kombiniert mit künstlichen Strukturen. Für alle diese beschriebenen Entwicklungen und Anwendungen der Nanotechnologie ist die Identifikation und Nutzbarmachung **neuer Eigenschaften nanoskaliger Materialien** grundlegend und daher ein Zukunftsthema per se.

Zugleich sollten die Optimierung und das Design von nanoskaligen Systemen, Komponenten und Bauteilen, z. B. durch computerunterstütztes Design (CAD) berücksichtigt werden. Hierzu zählt auch die Organisation und Logistik einer konvergierenden und komplexen Nanotechnologie, bezogen auf das Management interdisziplinärer Informationsverteilung, -logistik und -aufbereitung sowie das Verfügbarmachen und Visualisieren der wachsenden Information.

11.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick

Die folgende Tabelle 11.3 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Zukunftsthemen im BMBF-Foresight-Prozess. **Themen nach 1. Recherche** sind die Themen aus den Prozessen der Fachreferate (sofern sie nicht aussortiert wurden, weil sie bereits auf der Forschungsagenda stehen) und aus der ersten Literaturanalyse. **Themen nach 1. Workshop** sind diejenigen Themen, die nach dem 1. Workshop besonders verfolgt werden sollten. Die Tabelle 11.2 im vorangegangenen Abschnitt ist der auf dem Workshop bearbeitete Stand und damit zwischen den Themen nach erster Recherche und den Themen nach dem ersten Workshop anzusiedeln. **Themen Online-Befragung** sind in die Online-Befragung eingegangen, bedeuteten also eine weitere Zusammenfassung der Zwischenergebnisse, die in der Befragung bewertet wurden. Und die **Themen nach Kriterienfilter** sind bereits »Zukunftsthemen«, die in der letzten Phase des Prozesses untersucht wurden. Sie sind in der Regel sehr ähnlich den am Ende des BMBF-Foresight-Prozesses vorgeschlagenen Zukunftsthemen (siehe erste

Tabelle dieses Kapitels). Durch letzte Recherchen und Experteninterviews sind jedoch noch einige Zukunftsthemen modifiziert worden.

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Nanomaterialien	**Kernbereich**	**Nachhaltige Nanotechnologie**	Neue Eigenschaften nanoskaliger Materialien
1-dim nanoskalig: Schichtstrukturen, ultradünne organische Schichten, Hybridpolymere, Dünnfilme	Funktionale Moleküle	Nano-Toxikologie	Nanomedizin
2-dim nanoskalig: Nanoröhren/ CNTs, Nanodrähte, Nanostäbe, Nanogräben	Photokatalyse	Lebensdauer, Zuverlässigkeit und Sicherheit nanoskaliger bzw. Nanomaterialien enthaltender Bauteile und Systeme	Nanoelektronik
3-dim nanoskalig: Nanopartikel, Nanopulver, Nano-Metalloxide, Fullerene, Quantum Dots	Nanophotonik	Gesellschaftliche Akzeptanz und Kommerzialisierung	Manipulation von Licht durch künstliche Materialien
Nanoporöse Porenstrukturen (offen/ geschlossen)	Nano-Bauteillebensdauer: Analytikmethoden	Umweltauswirkungen von Nanomaterialien und -systemen	Nanobiotechnologie
Komplexe Strukturen: z. B. supramolekulare Strukturen	Magnetische Materialien	**Virtuelle/Visualisierte Nanotechnologie**	
	Nanosimulation	(Quanten)theoretische Modellierung nanoskaliger Systeme zur Untersuchung, dem Verständnis und der Vorhersage neuer Effekte/Phänomene.	**Virtuelle/Visualisierte Nanotechnologie (in Modellierung)**
Kohlenstoff-Nanoröhren (CNT)	Nanofabrikation: Systemintegration und geschlossene Prozesskette	Virtuelle Experimente bzw. Simulation im Nanobereich	
Herstellung (Lichtbogen, CVD, Laserverdampfen) und Separation (Zentrifugation, Dielektrophorese)	Alternative (Bottum-Up) Ansätze in der Nanoelektronik	Screening nanoskaliger Funktionsträger sowie nanoskaliger Prozessabläufe	**Nano-Materialien für Energieanwendungen (in Energiekonzert)**
Gezielte Nutzung der Struktur (Chiralität, Durchmesser, Länge, Defekte, SWNT, MWNT) und der daraus folgenden Eigenschaften		Optimierung und Design von Nano-Systemen, -Komponenten und -Bauteilen	
		Organisation und Logistik konvergierender und komplexer NT	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Nanofabrikation	**Schnittstellen**	**Neue Eigenschaften nanoskaliger Materialien**	
Top-Down: Nanolithografie (EUV-, Elektronenstrahl- Ionenstrahl-, Lithografie, etc.), Strukturübertragung, etc.	Alternative Konzepte Nanoelektronik	Ambient Nanomaterials - Effekte bei Umgebungsbedingungen	
Bottom Up: Selbstorganisation und molekulare Erkennung, Synthese und Selfassembly, Rastersondenverfahren	Nanobiotechnologie	Multi-Funktions Nanomaterialien: erhöhte Funktionalität und Effizienz durch gekoppelte Eigenschaften in einem System	
	Bottom-Up-Produktionsansätze (Nano2Produktion, Produktion2Nano)	Bio(kompatible)-Nanomaterialien	
Nanoanalytik	Analytikmethoden	Nano-Hybridmaterialien: neue Effekte durch Fusion zweier Funktionsträger	
Rastertunnelmikroskopie	Mikroverfahrenstechnik	Komplexe und Invertierte Nanomaterialien	
Rasterkraftmikroskopie	Nanotechnologie für Energiesysteme	Membrane/Grenzflächen	
Sensorik (optisch, magnetisch, elektrochemisch, biologisch, mechanisch)		Metamaterialien	
		Funktionale Moleküle	
Funktionale Moleküle		Einzelmolekülsysteme	
Einzelmolekül Bauteile und Systeme (Molekulare Elektronik, Schalter)		Molekulare Netzwerke	
Molekulare Netzwerke, Kristalle		Hybridstrukturen (Bio/Chem)	
Chemisch- Biologisch-Technische Hybridstrukturen/-systeme (Molekulare Motoren)		Biofunktionale Moleküle	
		Molekulare Architekturen	
Nanoelektronik		Kohlenstoffarchitekturen	
Silizium-Halbleiter-Elektronik <100nm (Top-Down)			

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Nano-Silizium-Hybriddesign (z. B. CMOS/ Nano, Crossbar, CNT)		**Nanosystemintegration (Analytik und Fabrikation)**	
Magnetoelektronik (GMR-Effekt), Spinelektronik		Analytik und Trenntechnik für Nano (Top-Down)	
Alternative (Bottom-Up) Ansätze: Einzel-elektrontransistor, Quantenpunkt-Bauteile, Quantencomputer, DNA – Computer		Nanoarchitektonik (Bottom-Up)	
		Synthese von Bottum-Up und Top-Down Fabrikationsmethoden	
Nanophotonik		Prozess und Systementwicklung (Produktion von Nano-Produkten)	
Photonische Kristalle (opt. Schalter, Filter)		Systemintegration (NT in Produktion)	
Metamaterialien (perfekte Linsen)		**Nanophotonik und Nanoelektronik**	
Plasmonik (Sensorik, Biophotonik)		Photonische Kristalle (PC)	
		Plasmonik	
Nanoenergetik		Nanooptoelektronik und Interconnects	
Energieumwandlung (Materialien/ Dünn-schichten für herkömmliche Solarzelle, Quantenpunkt-Solarzellen, Farbstoffsolar-zellen, organische Solarzellen, Solarthermie, Wasserstofferzeugung durch Sonnenlicht, OLED, Katalysator/ Membran für Brenn-stoffzelle, Thermo		Bottum-Up Nanoelektronik - Beyond CMOS	
Energiespeicherung (H2- Speicherung, Latentwärmespeicher, supraleitende mag-netische Energiespeicher, Superkondensato-ren (SuperCaps), Batterien (Li-Ionen, ...)		Nano-Hybriddesigns als Übergangslösung »Silizium«-»Nicht-Silizium«	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
		Nanotechnologie für Energiesysteme	
Energietransport (Wärmeleitende Materialien, Supraleitende Materialien)		Nanomaterialien zur Energieerschließung/-umwandlung durch molekular gekoppelte Prozesse und effiziente Energie-/ Ladungstransferprozesse	
Energieeinsparung (verbesserte Materialeigenschaften, Dämmung, schaltbare Werkstoffe, Reflektion, leichtere Materialien, Materialsubstitution)		Nanomaterialien und -membrane für chemische, elektrische oder magnetische Energiespeichersysteme	
		Nanomaterialien für verlustarmen oder kabellosen Energietransport/-verteilung	
		Nanomaterialien mit thermodynamischen, optischen oder elektrochemischen Eigenschaften zur Energieeinsparung	
Nanobiotechnologie		**Nanobiotechnologie und Nanomedizin**	
Bio2Nano (Biol. Bausteine im nm-Maßstab, biol. Adaptionsfähigkeit, Biomaterialien, Biosensoren, biomolekulare Motoren/Maschinen, Biomineralisation Biomembrane)		Bio2Nano - synthetische Biologie für die Nanotechnologie	
Nano2Bio (Tissue Engineering, in vivo Behandlungsverfahren, Drug Delivery, biokompatible Materialien, Diagnostik/Früherkennung (z. B. Biochip, molekulare Erkennung) in Kombination mit bildgebenden Verfahren, Nanopartikel-gestützte Gentherapie, Biostrukturen		Nano2Bio - Einsatz nanotechnologischer Verfahren und Komponenten in der Biotechnologie	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Nanomaterialien		Nanomaterialien und -systeme für die medizinische Diagnostik und das Imaging (diagnostische Nanomedizin)	
1-dim nanoskalig: Schichtstrukturen, ultradünne organische Schichten, Hybridpolymere, Dünnfilme		Nanomaterialien und -systeme für therapeutische Verfahren (Wirkstofftransport, Therapie) und medizinische Behandlung (Implantate, Biomaterialien), therapeutische Nanomedizin	
2-dim nanoskalig: Nanoröhren/ CNTs, Nanodrähte, Nanostäbe, Nanogräben		**Chemische Verfahren (Katalyse und Trenntechnik)**	
3-dim nanoskalig: Nanopartikel, Nanopulver, Nano-Metalloxide, Fullerene, Quantum Dots		Katalyse mit/durch Nanotechnologie	
		Trenntechnik durch Nanotechnologie	
		Mikro- und Nanofluidik	

Tabelle 11.3: Entstehung der Zukunftsthemen Nanotechnologie – Zwischenstände

11.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern

Insbesondere im Querschnittsfeld Nanotechnologie zeigt sich auf breiter Basis eine Schnittmenge zu anderen Zukunftsfeldern, wie Biotechnologie/Gesundheit (Nano2Bio, Bio2Nano, Nanomedizin), Informations- und Kommunikationstechnologie (z. B. Beyond CMOS), Nanomaterialien für Energiesysteme, Materialwissenschaften (Metamaterialien, Membrane, Selbstanordnung, Multifunktionsmaterialien) sowie Optische Technologien (photonische Kristalle, Optoelektronik). Zur Informations- und Kommunikationstechnologie gibt es direkte Bezüge im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit der Computer. So hängen die Fortschritte auf dem Gebiet der virtuellen Nanotechnologie stark von den Fortschritten auf dem Gebiet der Computertechnologie ab.

Bei den funktionalen Molekülen gibt es einen direkten Bezug zur Optik, konkret bei der Kontrolle lichtaktivierter funktionaler Moleküle auf ultraschnellen Zeitskalen. Neue Erkenntnisse der Attophysik sollen auf die Nanotechnologie übertragen werden, um z. B. Elektronentransport direkt sichtbar zu machen oder gar zu kontrollieren und manipulieren (laseraktivierte Zustände). Weitere Bezüge zur Optik existieren bei der Forschung an und Nutzbarmachung von nicht-linearen Effekten in Nanosystemen. Im Bereich Energie gibt es einen Link zur Nanophotonik und Nanoelektronik: die Nanoionik. Diese wird als »sehr wichtig« eingestuft mit der höchsten Forschungsintensität im Zeitraum 1 bis 5 Jahre. Kern der Nanoionik ist das Verstehen und die Steuerung der Ionenleitung an Grenzflächen. Dies spielt in chemischen Festkörperprozessen und elektrochemischen Anwendungen eine Schlüsselrolle.

Themenkoordination:
Dr. Daniel Heubach, IAO (daniel.heubach@iao.fraunhofer.de) und
Dr. Axel Thielmann, ISI (axel.thielmann@isi.fraunhofer.de)

12 Neurowissenschaften und Lernforschung

Neurowissenschaften und Lernforschung beschäftigen sich mit der Aufnahme, Präsentation und Verarbeitung von äußeren Reizen und Wissen im menschlichen Gehirn. Dabei geht es sowohl um die neurobiologischen Funktionsweisen, als auch um die psychologischen und sozialen Prägungen von Wahrnehmung, Denken, Motorik, Sprache und Lernen.

Von den Neurowissenschaften gehen wesentliche Impulse zum besseren Verständnis von Kognition und Bewusstsein sowie zur Bekämpfung von altersbedingten neurodegenerativen Krankheiten aus. Von großer Bedeutung sind die biochemischen und neurologischen Grundlagen des Denkens, die in den Neurowissenschaften vorrangig erforscht werden. Hier haben sich in den letzten Jahren Fortschritte aufgrund neuer bildgebender Verfahren, neuer medizinischer Erkenntnisse sowie computergestützter Verfahren zur Simulation von Hirnströmen ergeben. Die Vision der neurowissenschaftlichen Forschung ist es, das Gehirn vollständig zu entschlüsseln und zu einer widerspruchsfreien Beschreibung der biologischen Grundlagen von Reizverarbeitung, Bewusstsein und Handlungsfreiheit zu gelangen.

12.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Neurowissenschaften und Lernforschung

Wissenserwerb in informellen Lernsettings
Game-based Learning
Virtuelle pädagogische Agenten
Metakognitive und selbstregulative Prozesse beim Wissenserwerb
Wissenserwerb in ausgedehnten, kollaborativen Informationsräumen
Information Foraging
Group Awareness
Semantische Technologien
Adaptive Lernumgebungen und kognitive Prothesen
Intelligente tutorielle Systeme
Virtual Reality
Augmented Reality
Kulturspezifität im Lernen
Forschung zum Lernen von Migranten
Interkulturelle Kooperation im Lernen
Lernen bis ins hohe Alter
Lernen im Alter
Lernen mit zunehmendem Alter unter hoher Belastung, z. B. am Arbeitsplatz

Modellierung des Gehirns
Wie kann man aus den umfangreichen Hirnstrom-Daten Modelle und Theorien über die Funktionsweise des Gehirns generieren?
Dynamische Modellierung komplexer Neuro-Systeme
Modellierung der gesamten kognitiven Architektur
Engineering-Ansätze in der Neurowissenschaft zum Nachbau des Gehirns
Neuroprothesen und Neuroimplantate
Verbesserung auditorischer und visueller Implantate
Behandlung von Störungen des motorischen Systems
Behandlung von Störungen des »Milieu intérieur« des menschlichen Körpers.
Integration von Nanotechnologie und Materialwissenschaften zur Herstellung neuer Implantate, die besser verträglich sind.
Erkenntnisse und neue Möglichkeiten für Gehirn-Computer-Schnittstellen
Entwicklung einer künstlichen biochemischen Synapse
Neuro-Enhancement (Hirndoping)
Pharmawirkstoffe (Hirnpille)
Implantate, Memory-Chips und andere invasive Methoden
Zelltransplantat bzw. Gentherapie (Gendoping).
Neurobionik und bioanaloge Informationsverarbeitung
Bioanaloge Informationsverarbeitungsmethoden
Computer und Maschinen mit Gedächtnis- und Lernfunktionen.
Social and Cultural Neuroscience
Social and Cultural Neuroscience
Entwicklungsneurobiologie (Entwicklung des Gehirns)
Entwicklungsneurobiologie

Tabelle 12.1: Identifizierte Zukunftsthemen Neurowissenschaften und Lernforschung im Überblick

Die in der Tabelle 12.1 genannten Zukunftsthemen der Neurowissenschaften sowie der Lernforschung wurden im BMBF-Foresight-Prozess als besonders relevant eingeschätzt[35]. Dabei wurde das Zukunftsthema Neuro-Enhancement (Hirndoping) im Zukunftsfeld neuen Zuschnitts Mensch-Technik-Kooperationen (siehe Bericht »Zukunftsfelder neuen Zuschnitts«) besonders beobachtet.

Ziel der Lernforschung ist es, die dem Wissenserwerb zugrunde liegenden Mechanismen zu erforschen und zur Förderung effektiver Lernprozesse anzuwenden. Eine genaue Kenntnis der Mechanismen, auf denen Wissenserwerb basiert, ist von hoher Bedeutung, zumal sich die Formen des Wissenserwerbs aufgrund einer Reihe von Entwicklungen (Notwendigkeit zum lebenslangen Lernen, Internet als neue Form der Wissensspeicherung und -distribution) zunehmend diversifizieren.

35 Die dunkelgrau unterlegten Felder sind die Zukunftsthemen, die hellgrau hinterlegten einzelne, besonders wichtige Forschungsaufgaben.

Auf die einzelnen Zukunftsthemen wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

12.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen

12.2.1 Neurowissenschaften

Start des Prozesses

Am Anfang des Suchprozesses standen sieben Startthemen (siehe Tabelle 12.2), die im Folgenden näher beschrieben werden. Die Beschreibung diente als Vorlage für die Diskussionen und Einschätzungen auf dem ersten Experten-Workshop im November 2007 in Berlin.

Neurowissenschaften
Suche nach medizinischen Anwendungen - Verständnis von Ursachen neurologischer Krankheiten (Alzheimer, MS, Parkinson) - Analyse psychischer Phänomene unter Berücksichtigung neuronaler Prozesse
Modelle und Funktionslogiken - Bestimmung der Vorgänge auf der Basis von Zellverbänden - Zunehmende Kopplung mit Mathematik/Informatik. Computational Neuroscience
Neuroimplantate - Kopplung technischer Elemente an Nervenzellen über Schnittstellen - Sensorische Implantate - Motorische Implantate - Beschleunigung durch Fortschritte in der IuK Technologie
Neuroimaging - Verbesserte Auflösung von Hirnbildern durch fmRI - Verknüpfung mit Verfahren der Mikroelektronik
Neuroenhancement - Manipulation von Gehirnleistungen - Verbesserung der Lernfähigkeit
Neurobionik - Nutzung biologischer Modelle - Bioanaloge Informationsverarbeitung
Social Neuroscience - Erforschung des Wechselspiels zwischen Gehirn und sozialer Umwelt - Enge Zusammenarbeit zwischen Neuro- und Sozialwissenschaften
Lehr- / Lernforschung
Multiple Repräsentationen - (dynamische) Visualisierungen und Texte - Repräsentationen zur Kommunikationssteuerung
Metakognitive, selbstregulative Prozesse - Ziel: Förderung von funktionalen lernbezogenen Überzeugungen, Kognitionen und Strategien
Computer-supported collaborative learning

	- Steuerung der Lernprozesse - Task-Media Fit
Informelle Learnsettings	- TV, Printmedien, Internet, Museen - Auswirkungen des Unterhaltungsbezugs auf Wissenserwerb
Intelligente tutorielle Systeme	- Bsp. cognitive tutor - Information, Aufgaben, Konstruktion, Kooperation
Kollaborative Informationsräume	- Web 2.0 (Wiki, Blog), VR-Welten - Orientieren, Suchen, Bewerten der Information - Group Awareness
Gruppenspezifische Lernprozesse	- Altersspezifität - Kulturspezifität

Tabelle 12.2: Themen Neurowissenschaften und Lehr-/Lernforschung im ersten Foresight-Workshop 2007

Medizinische Forschung zur Behandlung von Erkrankungen des Gehirns und des Nervensystems: Bei der klinischen Forschung steht das Verständnis der Ursachen und die Behandlung von neurologischen (z. B. Alzheimer, Parkinson, Multiple Sklerose) und psychischen Erkrankungen (z. B. Schizophrenie, Depression) im Vordergrund. Nach einer Untersuchung des »European Brain Council« leiden in Europa etwa 127 Millionen Menschen an Erkrankungen des Gehirns oder des Nervensystems. Diese Krankheiten verursachen neben individuellem Leid auch hohe Kosten.

Ein weiteres Ziel der klinischen Forschung ist es, psychische Auffälligkeiten auf Hirnveränderungen zurückführen zu können und Fehlentwicklungen bzw. Verhaltensdispositionen diagnostizieren und behandeln zu können. Die Suche nach medizinischen Anwendungen ist bereits heute der größte Bereich der Hirnforschung und wird in Zukunft noch wichtiger. Dabei soll dieser Bereich von der Integration von Erkenntnissen aus anderen Bereichen, wie z. B. der Neuroinformatik oder neuen Neuro-Imaging-Techniken, profitieren (TAB 2007; Roloff et al. 2006; BMBF Roadmap Gesundheit).

Funktionslogiken und Modelle des Gehirns (mittlere Ebene): Die Hirnforschung lässt sich prinzipiell in drei Ebenen gliedern: Auf der unteren Ebene werden Vorgänge auf dem Niveau einzelner Zellen und Moleküle untersucht. Auf der mittleren Ebene steht die Beschreibung des Geschehens innerhalb von Verbänden von Neuronen und Zellen im Vordergrund. Und auf der oberen Ebene sollen jene Hirnareale identifiziert werden, die bei spezifischen Handlungen bzw. Denkvorgängen aktiv sind.

Nach Ansicht führender Neurowissenschaftler ist es insbesondere die **mittlere Ebene,** die in Zukunft in den Fokus der Forschung rücken sollte (Monyer et al. 2004). Hier geht es darum, jene neuronalen Prozesse zu verstehen, die beim Lernen, Erkennen und Planen von Handlungen vorkommen. Eine Hauptfrage

ist, wie »Schaltkreise« von Hunderten oder Tausenden von Neuronen im Verbund des ganzen Gehirns Informationen kodieren, bewerten, speichern und auslesen. Allerdings fehlt heute noch eine »Theorie des Gehirns«. Die Neurowissenschaften müssen, so die Einschätzung der Autoren, in Zukunft ein theoretisches Fundament erhalten, das Erklärungsmuster zur Verfügung stellt, wie dies z. B. im Zusammenspiel zwischen theoretischer Physik und der Physik der Fall ist.

Tatsächlich schwillt die Datenflut aus den Laboratorien in einem Ausmaß an, das die Experimentatoren und Experimentatorinnen mit der Deutung und Verarbeitung überfordert. Hier sind die empirisch arbeitenden Neurowissenschaftlerinnen und -wissenschaftler auf die Unterstützung aus der Mathematik, Physik und Informatik angewiesen. Damit ist das Gebiet der »Computational Neurosciences« benannt. Die Experten und Expertinnen in diesem Bereich können bei der Datenanalyse unterstützen und die Daten in Funktionsmodelle des Gehirns umwandeln (Ritzert 2006; BMBF 2006). Das Forschungsgebiet auf mittlerer Ebene weist Anknüpfungspunkte zur Systembiologie auf.

Neuroprothesen und Neuroimplantate: Die Forschungs- und Technologiegebiete Neuroprothetik und Neuroimplantate beschäftigen sich mit der Wiederherstellung sensorischer und motorischer Fähigkeiten durch die elektrische Stimulation neuronaler Prozesse. Die Prozesse zur Steuerung von Sensorik und Motorik im Gehirn werden von elektrischer Aktivität begleitet, die Basis für die Signalübertragung zwischen den einzelnen neuronalen Elementen im zentralen Nervensystem ist. So ergibt sich die Möglichkeit, technische Systeme über neuroelektrische Schnittstellen an Nerven anzukoppeln. Elektroden, die im Gehirn eingesetzt werden, können nicht (mehr) vorhandene neuronale Verknüpfungen ersetzen.

Derzeit werden drei Cluster von Erkrankungen unterschieden, bei deren Behandlung neuroelektrische Schnittstellen Verwendung finden:Erstens Erkrankungen und Verletzungen im Bereich der Sinnessysteme. Hier werden auditorische Implantate, visuelle Implantate sowie Implantate zur Wiederherstellung des Gleichgewichtssinns eingesetzt.

Das zweite Cluster bezieht sich auf Erkrankungen und Verletzungen des motorischen Systems. Darin finden sich Bewegungsstörungen, deren Ursache im Bereich der unwillkürlichen Motorik liegt, wie z. B. bei Morbus Parkinson oder bei der Dystonie, aber es finden sich auch Störungen der Motorik mit Querschnittslähmung und Schlaganfall als Hauptursachen. Die zum Einsatz kommenden Systeme ermöglichen eine Bewegungsäußerung des Patienten in seiner Umwelt. Die bisher hierfür genutzten Systeme sind u. a. so genannte Gehirn-Maschine-Schnittstellen sowie die Tiefenhirnstimulation (TAB 2007; Stieglitz et al. 2005).

Ein dritter Bereich von Störungen bezieht sich auf das »Milieu intérieur« des menschlichen Körpers. Hierin eingeschlossen sind chronische Schmerzzustände, Zwangsneurosen, Depressionen und Epilepsie. Die verwendeten Schnittstellen sind z. B. Tiefenhirnstimulation, Motorkortexstimulation oder Rückenmarksstimulation.

Die Entwicklung neuroelektrischer Schnittstellen verläuft in letzter Zeit stark beschleunigt, und es wird eine ganze Reihe neuer Einsatzbereiche in den Blick genommen. Ein Trend, der sich aus den Fortschritten in der IKT-Technologie, bei der Miniaturisierung mechanischer und elektronischer Systeme sowie den jüngsten Erkenntnissen über die Funktionsweise des Gehirns speist. Neuartige Kombinationen unterschiedlicher Wissens- und Technologiefelder lassen z. B. neue Gehirn-Computer Schnittstellen zu. Beispielhaft für diesen Bereich steht das Projekt der mentalen Schreibmaschine, die von Fraunhofer FIRST und der Charité in Berlin entwickelt wurde und die es gelähmten Menschen ermöglicht, einen Text durch reine Gedankenanstrengung zu »tippen«.

Neue Verfahren des Neuro-Imaging (inkl. des Einsatzes von Nanotechnologien und Mikroelektronik): Dank verbesserter Magnetresonanz-Imaging-Techniken können Hirnbilder heute eine Auflösung haben, die eine Beobachtung von Aggregatzuständen weniger Nervenzellen erlaubt. So lässt sich z. B. die Reifung implantierter Stammzellen beobachten, und selbst den Transport von Botenstoffen in Zellen hinein oder aus diesen heraus können die Forscher inzwischen »live« verfolgen. Die Beobachtung solcher Prozesse wäre noch vor wenigen Jahren undenkbar gewesen (Ritzert 2006). Für die Zukunft stellen sich nach Einschätzung des Projektteams die Herausforderungen, neue Technologien für noch bessere Bildgebungsverfahren zu entwickeln, die Datenbanken mit den Ergebnissen international zu koordinieren, um die neuronalen Erregungsmuster mit Denkleistungen in Verbindung bringen zu können, sowie Methoden zu entwickeln, die die große intersubjektive Variabilität von Aktivitätsmustern reduzieren helfen (Roloff et al. 2006). Hinsichtlich neuer Technologien für das Neuro-Imaging geht es in Zukunft in erster Linie darum, Erkenntnisse und Verfahren aus der Nanotechnologie sowie der Mikroelektronik (z. B. beim Implantieren von Elektroden) zu integrieren (Beckert et al. 2006).

»Hirndoping«/ »Neuro-Enhancement«: Der Fortschritt im Wissen über die Manipulation neuronaler Prozesse ermöglicht über die Behandlung von Krankheiten hinaus auch die Verbesserung von Gehirnleistungen beim gesunden Menschen. In diesem Fall spricht man von »Hirndoping« oder »Neuro-Enhancement« und meint damit die Steigerung von Konzentrationsfähigkeit, Erinnerungsvermögen, Auffassungsgabe und Lernfähigkeit, die Verlängerung von Wachphasen und die Verbesserung von Stimmung und Wahrnehmung durch Medikamente (»Hirnpillen«), neurochirurgische Eingriffe oder neurosti-

mulierende Verfahren (Implantation von Elektroden oder »Elektroden-Headsets«).

Hier sind momentan die USA führend; in Europa wird dieser Bereich der Hirnforschung vor allem im Zusammenhang mit ethischen Fragestellungen wahrgenommen. Auch hierzulande werden große wissenschaftliche und wirtschaftliche Potenziale im Zusammenhang mit »Hirndoping« bzw. »Neuro-Enhancement« gesehen (BMBF 2006). Ein besonders interessanter Teilbereich des Hirndopings sind die Neuroimplantate, bei denen es darum geht, das Gehirn mit »Speichererweiterungen« oder »Kompetenz-Modulen« (wie z. B. Sprachen, analytischen Fähigkeiten, Ortskenntnis) zu bestücken (Beckert et al. 2006). Hier gibt es Überschneidungen mit dem Teilbereich Neuroprothesen und Neuroimplantate.

Neurobionik und bioanaloge Informationsverarbeitung: Bei der Neurobionik handelt es sich um ein neues, sich rasch entwickelndes Forschungsgebiet, das sowohl von Fortschritten hinsichtlich Methodik und Erkenntnissen aus den Neurowissenschaften, als auch von der Materialforschung und der Nanotechnologie profitiert. Ein Merkmal der Neurobionik ist, dass der Informationsfluss in eine andere Richtung als bei der »normalen« Hirnforschung verläuft, nämlich von der Neurobiologie zu den Ingenieurswissenschaften oder zur Informatik. Die Biologie zeigt in vielen Fällen Wege auf, die die Techniker für die Lösung spezifischer Probleme nutzen können. So lassen sich die besonderen Leistungen tierischer Nervensysteme nutzen, um bioinspirierte Sensoren zu entwickeln (Ritzert 2006; BMBF Roadmap Gesundheit).

Wichtige Bereiche mit großem künftigen Potenzial sind die bioanalogen Informationsverarbeitungsmethoden und der Bio-Computer mit Gedächtnis- und Lernfunktionen (BMBF 2066; BMBF Roadmap Gesundheit). Dabei werden Programmier- und Hardwareprinzipien genutzt, die man bei der Untersuchung der Funktionsweisen des Gehirn entdeckt hat. Dadurch werden nicht nur neue Software-Anwendungen, sondern auch neue, nicht auf Silizium basierende Hardware-Lösungen möglich. Stichworte sind hier: »Biohardware«, optische Speicher und »DNA-Computing«. Der Bereich bioanaloge Informationsverarbeitung weist Schnittstellen zu den Informations- und Kommunikationstechnologien auf.

Social and Cultural Neuroscience: Die Ergebnisse der Hirnforschung zeigen, dass Verschaltungsprozesse im Gehirn bei Kleinkindern und Jugendlichen häufig mit sozialen Erfahrungen aus dem direkten Umfeld der Heranwachsenden zusammenhängen. Soziale Erfahrungen mit Eltern, Peers und Lehrern sind prägend. Derzeit entwickelt sich aus diesen Erkenntnissen eine neue Forschungsdisziplin, die die Hirnforschung auch an die sozial- und kulturwissenschaftliche Forschungslandschaft anschließt: »Social Neuroscience«.

Die Wissenschaftler in diesem Forschungsfeld sehen die neuronalen Prozesse in einem Wechselspiel mit dem Sozialen (Markowitsch et al. 2005). Dabei wird primär die historische Perspektive bedeutsam: Das Gehirn und seine Potenziale koevoluieren mit der Kultur, die selbst Voraussetzungen schafft, um bestimmte Potenziale entwickeln zu können. In der Ausrichtung ihrer Fragestellungen unterscheiden sich die europäischen Forscher von ihren Kollegen in den USA, deren Ziel es ist, herauszufinden, aufgrund welcher Hirnstrukturen sich bestimmte soziale Strukturen ergeben.

Zu einem derzeit stark diskutierten Wissenschaftsfeld gehört die Forschung zu Erinnerung und Biographie, bei welcher verschiedene Erzählformen und Inhalte mit neuronalen Aktivierungsmustern und Prozessen in Verbindung gebracht werden. Andere Teilgebiete sind die soziale und neuronale Basis der Entwicklung von Emphathie und Vertrauen (Neuroökonomie). Hier ergeben sich Schnittstellen zu »Hirndoping/ Neuro-Enhancement« sowie zur Lehr- und Lernforschung.

Foresight-Workshop 2007

Von den Experten und Expertinnen des Workshops wurden von den vorgeschlagenen und dargestellten Themen (siehe Tabelle 12.3) folgende als besonders wichtig und zukunftsträchtig bewertet: »Neuroprothetik«, »Social and Cultural Neuroscience« und »Neuro-Enhancement«. Als wichtiger übergreifender Ansatz wurde »Brain-Machine-Interfaces« genannt. Als weniger wichtiges Thema innerhalb des Feldes erwies sich die Suche nach medizinischen Anwendungen, da es umfassend im Bereich Gesundheit behandelt wird (siehe z. B. Gesundheitsroadmap 2020).

Monitoring-Panel

Auf der Grundlage der Einschätzungen der Experten des Workshops und der Anregungen und Bewertungen der anschließenden Experten- und Monitoring-Interviews musste entschieden werden, welche Themen vertieft bearbeitet werden und welche im Rahmen des BMBF-Foresight-Prozesses zunächst nicht weiter ausgearbeitet werden sollten. Die folgenden Ausführungen dokumentieren den Entscheidungsverlauf und das Ergebnis.

Forschung zu neurologischen Erkrankungen (kein Vertiefungsthema): Auf dem Workshop und in den Interviews wurde die Meinung vertreten, dass es zwar richtig sei, das Zukunftsthema als langfristig und wichtig zu betrachten. Das Thema werde aber bereits stark beforscht und komme deshalb nicht als neues Thema in Frage. Es sollte aber als Vertiefungsgebiet nicht ganz aufgegeben werden. Psychiatrische Störungen nehmen in hochentwickelten Gesellschaften immer stärker zu. Ein bislang unterschätztes Thema ist die Bearbeitung

des Problems der ständigen gefühlten Überforderung mit immer neuen Informationen (»Informationsflut«). Hierzu gibt es bisher noch relativ wenig Forschung. Psychologie, Neurobiologie und Gesellschaftswissenschaften müssten hier, so die Empfehlung, künftig stärker zusammenarbeiten.

Neuro-Imaging (kein Vertiefungsthema): Auch hier stimmten die Einschätzungen der Interviewpartner mit den Einschätzungen des Kernteams überein: In diesem Bereich gibt es bereits vielfältige Aktivitäten, sowohl von staatlicher Seite, als auch in der Industrie. In der Weiterentwicklung bestehender Instrumente und Verfahren lässt sich schon eine beachtliche industrielle Dynamik beobachten. Früher oder später wird sich dies auch in Anwendungen niederschlagen, z. B. im öffentlichen Personennahverkehr in Form einer Aufmerksamkeitssteuerung für Busfahrer. Wie weit die jeweiligen Anwendungen gehen, hängt von der gesellschaftlichen Akzeptanz des Einsatzes ab.

Modellierung des Gehirns (Vertiefungsthema): Hierbei handelt es sich nach übereinstimmender Einschätzung der Experten um ein ausnehmend interessantes Forschungsthema. Es kommt besonders darauf an, das Gehirn im Rahmen eines »Systemansatzes« zu verstehen. Das Forschungsthema hat die Aufdeckung von Mechanismen kleinerer Neuronenverbände zum Ziel. Es geht vor allem darum, die Modelliererinnen und Modellierer, Theoretikerinnen und Theoretiker (aus Physik, Mathematik, Informatik) enger mit der empirischen Forschung zu verkoppeln. Der Ansatz des BMBF, durch die Förderung von interdisziplinären Zentren (Bernstein-Center for Computational Neuroscience) diese nach wie vor unterschiedlichen Fachkulturen zusammenzubringen, ist prinzipiell zu begrüßen. Die Herausforderung besteht allerdings in der praktischen Umsetzung der interdisziplinären Forschung. Dazu muss eine neue Forschungskultur eingeübt und mit weiteren Maßnahmen unumkehrbar gemacht werden.

Neuroimplantate (Vertiefungsthema): In diesem Bereich sind in Deutschland schon beachtliche Fortschritte erzielt worden. Dies ist nicht zuletzt auf die frühen Initiativen des BMBF im Rahmen der Vorstudie des zweiten Neurotechnologiereports zurückzuführen (Gutachten von R. Eckmiller aus dem Jahr 1995). Momentan sind besondere Fortschritte den Materialwissenschaften zu erwarten. Durchbrüche in der Nanotechnologie würden den Forschungsbereich weiter voranbringen. Zukünftig werden Implantate nach Einschätzung der Experten voraussichtlich mit Nanoelektroden ausgerüstet sein.

»Neuro-Enhancement« (Vertiefungsthema): Fortschritte und Weiterentwicklungen im Bereich des »Neuro-Enhancements« scheinen vor allem vom Prozess der gesellschaftlichen Auseinandersetzung abhängig zu sein. Die zentralen Fragen sind dabei, was zulässig und gesellschaftlich akzeptabel ist. Weiterhin ist es notwendig, feinere »Tools« zu entwickeln, um die Nebenwirkungen zu reduzie-

ren. Einige pharmakologische »Enhancements« sind vor allem deshalb problematisch, weil ihre Nebenwirkungen bislang nicht beherrschbar sind.

Neurobionik (Vertiefungsthema): Hier geht es vor allem darum, die Netzwerke im Gehirn zu verstehen. Die Forschung zu transgenen Tieren hat dabei bereits viel zum Verständnis der funktionellen Netzwerkarchitektur im Gehirn beigetragen.

Ein spezielles Ziel in diesem Forschungsbereich muss es nach Auffassung der Experten sein, eine künstliche biochemische Synapse zu entwickeln, sodass Implantate ohne Nebenwirkungen eingesetzt werden können. Bisher werden Neuronen durch Implantate elektrisch erregt. Hier ist vor allem weitere Grundlagenforschung notwendig, um neue Materialien zu entwickeln, die dem natürlichen Prozess der biochemischen Erregung entsprechen.

»Social Neuroscience« (Vertiefungsthema): Bei diesem Forschungsbereich waren sich Workshopteilnehmerinnen und -teilnehmer sowie Interviewpartnerinnen und -partner einig: Es wird in Zukunft ein wichtiges Thema werden und momentan noch zu wenig vorangetrieben. Es gab aber auch kritische Stimmen, die vorbrachten, dass die Gefahr der Banalisierung bestehe, weil der gemeinsame Nenner, der in Zusammenarbeit der verschiedenen Disziplinen erzeugt werden könne, eher gering sei.

Neuropädagogik (kein Vertiefungsthema): Neuropädagogik wurde von den Interviewpartnerinnen und -partnern überwiegend kritisch gesehen. Meist könnten die neurowissenschaftlichen Erkenntnisse nicht für den Schulbetrieb fruchtbar gemacht werden. Teilweise wurden die Ratschläge aus der Neurowissenschaft von den Pädagogen und Pädagoginnen als anmaßend empfunden. Statt der Neuropädagogik sollte die pädagogische Grundlagenforschung unterstützt werden. In der Lehr- und Lernforschung ist nach Auffassung der Interviewpartner nur ein kleiner Teil der Fragestellungen sinnvoll mit neurowissenschaftlichen Methoden zu erfassen. Insbesondere bei extremen Lernstörungen (extreme Lese-Rechtschreib-Schwäche, Dyslexie, Dyskalkulie) und zur Analyse von Rückmeldungen beim Lernen könnte die Neurowissenschaft Beiträge liefern.

Entwicklungsneurobiologie (Entwicklung des Gehirns) (neues Thema): Dieses Thema wurde auf Anregung von Gesprächspartnern zur Liste der Zukunftsthemen hinzugefügt. Allerdings waren sich die Experten hinsichtlich der Einschätzung des Themas uneinig. Einige Experten hielten das Themengebiet für ein in Deutschland bereits gut entwickeltes, andere sahen hier noch zu wenige Aktivitäten. Es wurde darauf hingewiesen, dass die Entwicklungsneurobiologie ein besonders wichtiges Zukunftsthema sei, das auch für die Lehr- und Lernforschung wichtige Impulse setzen könne.

Generell beschäftigt sich die Entwicklungsneurobiologie mit der Entstehung und Reifung von Nervensystemen (Neurogenese). Beim Menschen wird u. a. erforscht, wie das Gehirn zunächst grobe, dann immer detailliertere Baupläne entwirft. Haupterkenntnisse der institutionalisierten Entwicklungsneurobiologie beziehen sich auf die Produktion und Funktion von Botenstoffen im Gehirn. So konnte z. B. gezeigt werden, dass Gehirnnervenzellen in den ersten 30 Lebenstagen ihre Funktionen für das ganze Leben »einüben«. Die Gehirnnervenzellen sind anfangs in der Lage, viele verschiedene Botenstoffe herzustellen, sie »spielen« gewissermaßen mit ihren Möglichkeiten, bis sie sich für ein bestimmtes Repertoire »entscheiden«. Die Gehirnnervenzellen des Erwachsenen greifen dann im Notfall – etwa bei einem epileptischen Anfall - auf das früh Gelernte zurück.

Ein wichtiges Thema innerhalb der Entwicklungsneurobiologie ist die Plastizität des Gehirns. Darunter versteht die Neurowissenschaft die Fähigkeit des menschlichen Gehirns, sich an wandelnde Umweltanforderungen mit Umstrukturierungen anzupassen. Ursprünglich gingen die Forscher davon aus, dass die Eigenschaft des Gehirns, sich durch neue Aufgaben zu verändern, im Alter kaum noch gegeben ist. Plastische Anpassungsprozesse hielten Forscher vor allem in der frühen Entwicklungsphase des Gehirns für möglich. Neuere Forschungsergebnisse zeigen jedoch, dass diese Aussage so pauschal nicht haltbar ist. Zwar zeigt sich zum Teil eine Abnahme kognitiver Leistungen mit zunehmendem Alter. So genannte fluide Fähigkeiten, d. h. prozessorientierte Fähigkeiten, werden überwiegend in den ersten drei bis vier Lebensjahrzehnten erlernt. Je stärker aber in dieser Zeit die kognitiven Ressourcen genutzt werden, desto leichter können neue Inhalte integriert werden, desto leichter kann aber auch einem möglichen Abbau der Fähigkeiten entgegengewirkt werden. Die Entwicklung des Gehirns im Alter hängt entscheidend von seiner kognitiven Beanspruchung ab. Elaborierte Verarbeitungsmechanismen können die Plastizität des menschlichen Gehirns bis ins hohe Alter beeinflussen.

Im weiteren Verlauf der Bearbeitung wurde das Thema Entwicklungsneurobiologie dem Zukunftsfeld neuen Zuschnitts »Das Altern entschlüsseln« zugeordnet, da sich die Fragestellungen in ihrer Ausrichtung auf die Entwicklung über den gesamten Lebensverlauf hinweg ergänzen.

Online-Befragung

Im Zukunftsfeld Neurowissenschaften wurden in der Befragung aufgrund der Vorrecherchen sieben Zukunftsthemen (siehe Tabelle 12.3) mit ihren jeweiligen Forschungsfragen (insgesamt 18) zur Diskussion gestellt. Die Erforschung neurodegenerativer Krankheiten wie z. B. Alzheimer oder Parkinson war nicht Bestandteil der Befragung, da diese Krankheiten bereits heute umfangreich beforscht werden und ihre Erforschung umfassend gefördert wird.

Die Zukunftsthemen stießen insgesamt auf große Akzeptanz bei den befragten Expertinnen und Experten. Beim Aspekt der Relevanz der einzelnen Themengebiete in zehn Jahren zeigte sich die hohe Wichtigkeit von Fortschritten bei der Modellierung des Gehirns, bei der Entwicklungsneurobiologie sowie Neuroprothesen bzw. Neuroimplantaten.

Bei der Modellierung des Gehirns handelt es sich um ein grundlagenorientiertes Gebiet. Neuroprothesen und Neuroimplantate sind dagegen eher anwendungsorientiert und ingenieurswissenschaftlich geprägt. Dass beide Zukunftsthemen von den befragten Expertinnen und Experten ungefähr gleich relevant eingestuft werden, reflektiert aus Sicht der Autoren die Tatsache, dass sich in der Hirnforschung die Weiterentwicklung theoretischer Konzepte und die Entwicklung praktischer Anwendungen stark wechselseitig bedingen und vielfältige Überscheidungen zu beobachten sind.

Bei der Modellierung des Gehirns wurde insbesondere in den Interviews der Monitoring-Phase deutlich, dass es immer mehr Kooperation zwischen empirisch forschenden Neurobiologen/ -biologinnen und Modelliererinnen und Modellierern gibt. Dieses Ergebnis wird durch die Bibliometrie gestützt: So schlägt sich die verstärkte Zusammenarbeit in einer Zunahme der Ko-Publikationsaktivitäten von Mathematikerinnen und Mathematikern, Informatikerinnen und Informatikern, Neurobiologinnen und Neurobiologen sowie Neuropsychologinnen und Neurobiologen nieder. Diese Entwicklung wird sich, so die Einschätzung, in den kommenden zehn Jahren weiter fortsetzen. Das BMBF hat auf diese Entwicklung bereits mit der Gründung der »Bernstein Centers for Computational Neuroscience« reagiert. Aufgrund der Bedeutung dieses Überschneidungsbereiches für die Weiterentwicklung des Wissenschaftsfeldes erscheinen aus Sicht der Autoren zusätzliche Aktivitäten notwendig.

Die hoch eingestufte Relevanz des Themengebiets Entwicklungsneurobiologie (Entwicklung des Gehirns) lässt darauf schließen, dass sich die Befragten vor allem neue Erkenntnisse über die Entwicklung des Gehirns, Hinweise auf die generelle Funktionsweise des Gehirns sowie Antworten auf konkrete medizinische und pädagogische Fragen versprechen. Auch dieses Ergebnis bestätigen die Erkenntnisse aus der Such- und Monitoring-Phase: Experten und Expertinnen hatten dort bereits auf die Entwicklungsneurobiologie als ein außergewöhnlich wichtiges Zukunftsthema verwiesen.

Einen speziellen Bereich bilden die Neurobionik und bioanaloge Informationsverarbeitung, welche ebenfalls als relevant eingestuft wurden. Verschiedene Experten und Expertinnen haben dieses Thema auch als »Neuromorphic Engineering« überschrieben. Neurobionik ist ein relativ neues Forschungsgebiet, das in erster Linie von Fortschritten in der Materialforschung und der Nanotechnologie profitiert. Die Biologie zeigt dabei Wege auf, die die Techniker für die Lö-

sung spezifischer Probleme nutzen können. So lassen sich beispielsweise die Leistungen tierischer Nervensysteme nutzen, um bioinspirierte Sensoren zu entwickeln. In der Online-Befragung wurde der Neurobionik eine besondere Bedeutung für die künftige wirtschaftliche Entwicklung in Deutschland zugestanden. Zugleich ist das Teilgebiet der bioanalogen Informationsverarbeitung ein Thema mit einem weiteren Zeithorizont, d. h. es wird seinen Zeitraum der intensivsten Forschungsaktivitäten erst in sechs bis zehn Jahren erreichen. Die Neurobionik erhält zentrale Impulse aus anderen Wissenschaftsbereichen.

Bei der Frage nach den Auswirkungen stehen erneut die Neuroprothesen und Neuroimplantate an erster Stelle. Besonders wichtig sind, so die Beurteilung der Teilnehmer an der Online-Befragung, die Forschungsaufgaben zur Verbesserung auditorischer und visueller Implantate, bei denen es um leistungsfähigere Nachfolger heutiger Cochlea- und Retina-Implantate geht, und die Behandlung von Störungen des motorischen Systems, die sich primär auf Morbus Parkinson und Dystonie beziehen. Die Experten und Expertinnen heben hier sowohl die künftige wirtschaftliche Bedeutung hervor als auch mögliche positive Folgen für die Lebensqualität der Menschen. Aber auch als Impulsgeber für andere Forschungsgebiete und als Schrittmacher für Erkenntnisse in Wissenschaft und Technologie wird das Thema von den Experten gesehen. Ebenso werden von Fortschritten bei der Modellierung des Gehirns Anstöße für die Weiterentwicklung anderer Forschungsgebiete erwartet.

Dagegen fällt die Bewertung des »Hirndopings« bei der Online-Befragung äußerst negativ aus. Die Forschung zum »Hirndoping« hat nach Einschätzung der Befragten weder positive Auswirkungen auf die Lebensqualität der Menschen noch auf die wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands. Einen Beitrag zum wissenschaftlichen Fortschritt erkannten die befragten Expertinnen und Experten in dem Thema nicht. Die Auswertung der Befragung durch FhG ISI und IAO ergab, dass die Ablehnung des Themas dabei umso stärker war, je weniger kompetent sich die Befragten in diesem Bereich einschätzten. Die Bewertungen dokumentieren eine kritische Einstellung gegenüber Eingriffen in das neuronale System zur Leistungssteigerung bzw. zur Verbesserung kognitiver Fähigkeiten in Deutschland. Im angelsächsischen und asiatischen Raum wird das Thema »Neuro-Enhancement« weniger skeptisch beurteilt. Manche Experten und Expertinnen, vor allem in den USA, sehen in der »Enhancement«-Aussicht vielmehr die treibende Kraft der Forschungsanstrengungen im Neuro-Bereich.

Die Skepsis beschränkt sich in Deutschland indes auf »Hirndoping« und »Neuro-Enhance-ment« bzw. die dort angesiedelten Aspekte der Leistungssteigerung, so die Analyse der Recherchen. Dies zeigen die Einschätzungen zu Neuroprothesen und Neuroimplantaten, die von den deutschen Fachleuten als wichtig und relevant eingeschätzt werden. Zielgerichtete Manipulationen des Gehirns zur Behandlung von neurodegenerativen Krankheiten, d. h. unter ex-

plizit medizinischem Vorzeichen, sind auch für deutsche Expertinnen und Experten akzeptabel und stellen ein aussichtsreiches Forschungsthema dar. Es ist, so die Erfahrung der Bearbeiter, aber nur ein kleiner Schritt von der medizinischen Anwendung zur Verbesserung kognitiver Fähigkeiten bei Gesunden. Dieses Ergebnis deutet aus Sicht der Autoren darauf hin, dass die Debatte um die gesellschaftliche Akzeptanz von leistungssteigernden Hirnmedikamenten und Hirnprothesen möglicherweise erst am Anfang steht und konkrete Anwendungen insbesondere invasiver Methoden (z. B. Chip-Implantate als Fremdsprachenmodule) momentan in Deutschland noch nicht gesehen werden.

Auch zum Forschungsgebiet Neuropädagogik äußerten sich die Experten und Expertinnen gegenwärtig noch zurückhaltend. Angemahnt wird von ihnen, dass es heute noch zu wenige Lehrstühle für Neuropädagogik in Deutschland gebe, dass die Akzeptanz in der Forschung unzureichend sei und dass zu wenig fächerübergreifende Kooperationen existierten. Die eher skeptische Haltung gegenüber der Neuropädagogik wurde auch in Gesprächen mit Fachleuten im Rahmen des Monitorings deutlich: Die zukünftigen Herausforderungen der Pädagogik – komplexere Probleme, komplexe Lernumgebungen – seien mit Methoden der Neurowissenschaft allein kaum zu lösen, so die Einschätzung der Experten.

Bibliometrie

Die bibliometrische Analyse bestätigte die Struktur der vorgegebenen Themen. Vor allem wurde in der Analyse deutlich, dass interdisziplinäre Kooperationen zwischen Modellierern und Modelliererinnen (aus Physik, Informatik, Mathematik) und empirischen Forscherinnen und Forschern aus der Neurobiologie ein wichtiger Trend ist, den es weiterhin zu unterstützen gilt.

Zweite Welle Monitoring-Panel

Bei den Monitoring-Interviews der zweiten Welle wurden folgende Punkte in den Vordergrund gestellt:

- Aus der Weiterentwicklung der »Computational Neuroscience« sind zahlreiche starke Impulse, primär theoretischer Art, zu erwarten. Der weitere Aufbau des theoretischen Rahmens ist für den zukünftigen Fortschritt der Forschung besonders wichtig. Momentan existiert noch keine tragfähige Theorie für den Bereich Neurowissenschaften wie beispielsweise in der Physik.
- Die Neuroprothetik wird in den kommenden Jahren noch mehr an Bedeutung gewinnen. Hauptziel ist die Verbesserung von »Brain-Machine-Interfaces«. Europa ist in den Ingenieurwissenschaften (Robotik etc.) heute schon gut aufgestellt. Die neurowissenschaftliche Grundlagenforschung müsste jedoch stärker an den Anwendungsproblemen ausgerichtet sein.

Hier gibt es besonders deutliche Unterschiede zu den USA. Die Entwicklung von »Interfaces« würde von dieser Ausrichtung stark profitieren.

- Beim Thema »Neuro-Enhancement« gab es kontroverse Ansichten. Die skeptische Einschätzung bezog sich auf den Stand der Forschung und ihre Risiken: So wurde geäußert, dass es bisher noch keine wirklich vielversprechende Forschung und Entwicklung zum »Neuro-Enhancement« gebe, obwohl es schon sehr lange auf der Agenda stehe. Darüber hinaus sei die Forschung in diesem Bereich mit enormen Risiken verbunden: Viele Mechanismen des Gehirns seien noch nicht bekannt, insofern bleibe die Forschung auf »Trial-and-Error«-Mechanismen angewiesen. Das aber kann gefährlich sein: Einen Teil des Gehirns zu verbessern, kann heißen, andere Teil des Gehirns zu verschlechtern, weil die Raum- und Verarbeitungskapazitäten begrenzt sind. Die positive Einschätzung stellte die Chancen von »Neuro-Enhancement« in den Vordergrund: Ethische Untersuchungen wurden von den Befragten begrüßt, sollten aber nach Meinung der Befragten nicht davon abhalten, die Forschung zu forcieren. Es gebe inzwischen ein größeres Verständnis biochemischer Prozesse des Gehirns, die es ermöglichten, sehr zielgerichtet bei der Verbesserung menschlicher Fähigkeiten vorzugehen. Dies betreffe vor allem das pharmakologische »Enhancement«.
- Als zukunftsträchtig werden auch die »Social and Cultural Neurosciences« eingeschätzt. Viele Probleme der Hirnforschung können nicht mehr gelöst werden, indem das Gehirn isoliert betrachtet wird. In dieser Hinsicht sind auch viele traditionelle Forschungsansätze aus Sicht der Panellisten inadäquat. Die experimentelle Neurowissenschaft wird in den kommenden Jahren boomen, weil FMRIs leichter zugänglich sind.
- Eng verbunden mit dem Thema »Social and Cultural Neuroscience« ist die Entwicklungsneurobiologie/ »Neuro Education«. Es gilt, so die im Rahmen der Interviews geäußerte Einschätzung, neue Forschungsansätze in diesem Bereich zu entwickeln, um neue Impulse für die Lernforschung geben zu können. Die bisherigen Erkenntnisse reichen bei Weitem nicht aus, um komplexe Lernprozesse zu verstehen. Um hier Fortschritte zu erzielen, ist eine stärkere Vernetzung mit Psychologen und Psychologinnen sowie Kognitionswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern notwendig. Die Weiterentwicklung von bildgebenden Verfahren ist wichtig für die Untersuchung der Entwicklung des Gehirns und die Forschung zur Sprachentwicklung bei Kindern.
- Als problematisch für die Forschung im Bereich »Behaviourial Neuroscience« werden von den Befragten die gesetzlichen Einschränkungen bei Tierversuchen in Europa betrachtet.
- Bei »Computational Neuroscience« werden in den kommenden Jahren Erkenntnisse aus empirischer Forschung noch stärker in ingenieurwissenschaftliche Projekte einfließen. Einschneidende Veränderungen sind in der For-

schungsorganisation zu erwarten prognostizieren die Befragten: Aufgrund der immer stärkeren Verknüpfung zwischen Modellierung, empirischer Forschung sowie klinischer Verhaltensforschung sei es (nach Ansicht eines Panellisten) notwendig, dass sich die Organisation des Wissens von kleinteiligen Projektzusammenhängen hin zu Großforschungseinrichtungen entwickelt. Dies hätte Implikationen für das Management von Forschung und Entwicklung in den Neurowissenschaften.

- »Social Neuroscience« ist nach Meinung vieler Experten ein bislang vernachlässigtes Forschungsfeld, das es aus deren Sicht jetzt verstärkt zu fördern gilt. Ausgangspunkt zur Beschäftigung mit entsprechenden Forschungsthemen waren die Erkenntnisse aus der Autismusforschung. Weitere Themen sind Empathie sowie soziale Exklusion.
- Auch in der Entwicklungsneurobiologie wurden Fortschritte gesehen, die zukünftig Möglichkeiten bieten, für die Neuropädagogik einen Beitrag zu leisten. Dies bezieht sich in erster Linie auf die Konstruktion und die Verarbeitung mentaler Schemata, die in der Unterrichtsforschung zum Einsatz kommen könnten.

Auswahl Zukunftsthemen und erweiterter Input für »Das Altern entschlüsseln« und »Mensch-Technik-Kooperationen«.

Am Ende des gesamten Such- und Rechercheprozesses stehen die in Tabelle 12.3 genannten Zukunftsthemen

Für die Alternsforschung wurde eine Akteursanalyse im Zukunftsthema Entwicklungsneurobiologie durchgeführt. Zur Erarbeitung des Zukunftsfeldes neuen Zuschnitts Mensch-Technik-Kooperationen wurden erweiterte Recherchen durchgeführt, die der Vorbereitung und Durchführung eines Workshops zur Vertiefung des Zukunftsfeldes dienten.

12.2.2 Lernforschung

Neurowissenschaften und Lernforschung wurden gemeinsam betrachtet, weil in Zukunft eine starke disziplinäre Verschmelzung erwartet wurde. Dies hat sich jedoch im Verlauf des Foresight-Prozesses relativiert (siehe Diskussion zur Neuropädagogik).

Gestartet wurde in der Lernforschung auf der Basis von Recherchen und einem ersten Austausch mit Expertinnen und Experten im Vorfeld des Foresight-Workshops 2007. Auf der Basis des Workshops, weiterer Expertengespräche mit deutschen Lernforschern sowie der ersten internationalen Monitoring-Welle wurden fünf Zukunftsthemen identifiziert, die in die Online-Befragung aufgenommen wurden: 1) Wissenserwerb in informellen Lernsettings, 2) Wissenser-

werb in ausgedehnten, kollaborativen Informationsräumen, 3) adaptive Lernumgebungen und Lernen mit »Virtual Reality« bzw. »Augmented Reality«, 4) Kulturspezifität im Lernen und 5) Lernen bis ins hohe Alter (siehe Tabelle 12.3).

Alle Themen wurden von den Teilnehmerinnen und Teilnehmern der Online-Befragung und den Panellistinnen und Panellisten der zweiten Monitoring-Welle als relevant bis sehr relevant eingestuft, und diese Relevanz wurde ihnen auch noch in zehn Jahren oder später zugesprochen. Insbesondere den Zukunftsthemen »Lernen in informellen Lernsettings«, »adaptive Lernumgebungen und Lernen mit Virtual Reality bzw. Augmented Reality« sowie »Lernen bis ins hohe Alter« wurde zudem im Rahmen der Panelinterviews und der Online-Befragung ein positiver Einfluss auf die wirtschaftliche Entwicklung in Deutschland und die Lebensqualität zugeschrieben.

Als auffallend wichtig wurden in der Lernforschung vor allem technikgetriebene Themen eingeschätzt, z. B: »virtuelle pädagogische Agenten«; damit sind Hilfesysteme in netzbasierten Lernsettings gemeint, die auf der Basis von intelligenten tutoriellen Systemen automatisch Online-Hilfen generieren (Krämer, 2007), und »Augmented Reality«, d. h. Informationen aus der Realität werden durch Informationen aus der virtuellen Realität erweitert, bzw. »Lernen mit Virtual Reality« (Guadagno/ Allmendinger 2008). Bislang nicht darstellbares Lernmaterial wird mit »Virtual Reality« zugänglich gemacht. So ist z. B. für einen erfolgreichen Entwurf neuer Wirkstoffe und Medikamente eine genaue räumliche Vorstellung der molekularen Geometrie und der chemischen Eigenschaften des Zielmoleküls und möglicher Arzneimoleküle notwendig. Visualisierungs- und Interaktionsverfahren in »Virtual Reality« sind daher zu Werkzeugen in der Arzneistoffentwicklung geworden und unterstützen das Lernen von Wirkstoffzusammenhängen (Dehof et al. 2009). Auch gefährliche oder teure Lerninhalte (z. B. Bedienung von Reaktoren im Notfall) können erprobt werden.

Ebenfalls als besonders wichtig wurden die Forschungsfragen im Umfeld des Zukunftsthemas »Lernen bis ins hohe Alter« (Lernen im Alter, Lernen mit zunehmendem Alter unter hoher Belastung, z. B. am Arbeitsplatz) erachtet. Die Befragten fügten hier z. B. als zusätzliche Forschungsfrage die »Bedeutung und Gestaltung des generationenübergreifenden Lernens« an. Aktuelle Forschungsrichtungen zum Lernen im Alter stellen u. a. »Informelles Lernen«, »Selbstgesteuertes Lernen«, »Medienkompetenz« und »Zugang zu Informations- und Kommunikationstechnologien« älterer Erwachsener in den Vordergrund (z. B. Akademiengruppe Altern in Deutschland 2009; Dohmen 2001; Malwitz-Schütte 2006). Das Zukunftsthema »Lernen bis ins hohe Alter« ist in das Zukunftsfeld neuen Zuschnitts »Das Altern entschlüsseln« eingeflossen. Lernen bis ins hohe Alter unterstützt bei der Lösung eines bereits heute bestehenden bzw. im Entstehen begriffenen Problems mit Zukunftsrelevanz (entsprechend den Auswahlkriterien), da Bildung und Weiterbildung Bausteine für eine aktive und

befriedigende Gestaltung des Lebensabschnittes »hohes Alter« sein können. »Bis« ins hohe Alter bezieht sich jedoch genauso auf die Zeit vor dem hohen Alter, d. h. auf die gesamte Lebensspanne.

12.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick

Die folgende Tabelle 12.3 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Zukunftsthemen im BMBF-Foresight-Prozess. **Themen nach 1. Recherche** sind die Themen aus den Prozessen der Fachreferate (sofern sie nicht aussortiert wurden, weil sie bereits auf der Forschungsagenda stehen) und aus der ersten Literaturanalyse. **Themen nach 1. Workshop** sind diejenigen Themen, die nach dem 1. Workshop besonders verfolgt werden sollten. Die Tabelle 12.2 im vorangegangenen Abschnitt ist der auf dem Workshop bearbeitete Stand und damit zwischen den Themen nach erster Recherche und den Themen nach dem ersten Workshop anzusiedeln. **Themen Online-Befragung** sind in die Online-Befragung eingegangen, bedeuteten also eine weitere Zusammenfassung der Zwischenergebnisse, die in der Befragung bewertet wurden. Und die **Themen nach Kriterienfilter** sind bereits »Zukunftsthemen«, die in der letzten Phase des Prozesses untersucht wurden. Sie sind in der Regel sehr ähnlich den am Ende des BMBF-Foresight-Prozesses vorgeschlagenen Zukunftsthemen (siehe erste Tabelle dieses Kapitels). Durch letzte Recherchen und Experteninterviews sind jedoch noch einige Zukunftsthemen modifiziert worden.

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Neurowissenschaften	**Kernbereich**	**Neuroprothesen und Neuroimplantate**	**Neuroprothesen und Neuroimplantate (in MTK)**
Suche nach medizinischen Anwendungen (Verständnis von Ursachen neurologischer Krankheiten (Alzheimer, MS, Parkinson), Analyse psychischer Phänomene unter Berücksichtigung neuronaler Prozesse)	Gehirn-Computer Schnittstelle (Neuroimplantate, Neuroprothetik, Brain-Reading)	Verbesserung auditorischer und visueller Implantate	
Modelle und Funktionslogiken (Bestimmung der Vorgänge auf der Basis von Zellverbänden, zunehmende Kopplung mit Mathematik/ Informatik. Computational Neuroscience)	Neuro Enhancement/Personal Enhancement	Behandlung von Störungen des motorischen Systems	**Modellierung des Gehirns (in Modellierung)**
Neuroimplantate (Kopplung technischer Elemente an Nervenzellen über Schnittstellen, sensorische Implantate, motorische Implantate, Beschleunigung durch Fortschritte in der IuK Technologie	Sozio-kulturelle Prägung von Gehirnstrukturen (social & cultural neuroscience)	Behandlung von Störungen des »Milieu intérieur« des menschlichen Körpers.	Neurobionik (Bioinspirierte Sensorik & Bioanaloge Inf.verarbeitung)
Neuroimaging (Verbesserte Auflösung von Hirnbildern durch fmRI, Verknüpfung mit Verfahren der Mikroelektronik)	Lernen von Migranten	Integration von Nanotechnologie und Materialwissenschaften zur Herstellung neuer Implantate, die besser verträglich sind.	
Neuroenhancement (Manipulation von Gehirnleistungen, Verbesserung der Lernfähigkeit)	Lernen im Alter	Erkenntnisse und neue Möglichkeiten für Gehirn-Computer-Schnittstellen	**Wissenserwerb in ausgedehnten, kollaborativen Informationsräumen (in MTK) in MTK**
Neurobionik (Nutzung biologischer Modelle, bioanaloge Informationsverarbeitung)	Verallgemeinerung von Hirnforschungsergebnissen angesichts interindividueller Variabilität	Entwicklung einer künstlichen biochemischen Synapse	Wissenserwerb in informellen Lernsettings
Social Neuroscience (Erforschung des Wechselspiels zwischen Gehirn und sozialer Umwelt, enge Zusammenarbeit zwischen Neuro- und Sozialwissenschaften)	Personalisierte Medizin im Neurobereich (Alter Geschlecht)	**Neuro-Enhancement (Hirndoping)**	
		Pharmawirkstoffe (Hirnpille)	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
	Schnittstellen	Implantate, Memory-Chips und andere invasive Methoden	**Entwicklungsneurobiologie (in Altern)**
	Lernen vom Nervensystem für IKT	Zelltransplantat bzw. Gentherapie (Gendoping).	
	Erkennung von Nutzerintentionen		
	Nutzer-Präferenzprofile	**Neurobionik und bioanaloge Informationsverarbeitung**	
	Hirn-Computer-Schnittstelle, Brain Machine Computer Interface	Bioanaloge Informationsverarbeitungsmethoden	
		Computer und Maschinen mit Gedächtnis- und Lernfunktionen.	
		Social and Cultural Neuroscience	
		Social and Cultural Neuroscience	
Lehr-/ Lernforschung		**Wissenserwerb in informellen Lernsettings**	
Multiple Repräsentationen (dynamische Visualisierungen und Texte, Repräsentationen zur Kommunikationssteuerung)		Game-based Learning	
Metakognitive, selbstregulative Prozesse (Ziel: Förderung von funktionalen lernbezogenen Überzeugungen, Kognitionen und Strategien)		Virtuelle pädagogische Agenten	
Computer-supported collaborative learning (Steuerung der Lernprozesse, task-media fit)		Metakognitive und selbstregulative Prozesse beim Wissenserwerb	
Informelle Learnsettings (TV, Printmedien, Internet, Museen, Auswirkungen des Unterhaltungs-bezugs auf Wissenserwerb)			
Intelligente tutorielle Systeme (Bsp. cognitive tutor, Information, aufgaben,			

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Konstruktion, Kooperation)			
Kollaborative Informationsräume (Web 2.0 (Wiki, Blog), VR-Welten, Orientieren, Suchen, Bewerten der Information, Group Awareness)		**Wissenserwerb in ausgedehnten, kollaborativen Informationsräumen**	
Gruppenspezifische Lernprozesse (Alters-spezifität, Kulturspezifität)		Information Foraging	
		Group Awareness	
		Semantische Technologien	
		Adaptive Lernumgebungen und kogni-tive Prothesen	
		Intelligente tutorielle Systeme	
		Virtual Reality	
		Augmented Reality	
		Kulturspezifität im Lernen	
		Forschung zum Lernen von Migranten	
		Interkulturelle Kooperation im Lernen	
		Lernen bis ins hohe Alter	
		Lernen im Alter	
		Lernen mit zunehmendem Alter unter hoher Belastung, z. B. am Arbeitsplatz	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Neuropädagogik		**Modellierung des Gehirns**	
Lernverläufe und kortikale Informationsverarbeitung		Wie kann man aus den umfangreichen Hirnstrom-Daten Modelle und Theorien über die Funktionsweise des Gehirns generieren?	
Abweichende Hirnfunktionen bei Lernstörungen		Dynamische Modellierung komplexer Neuro-Systeme	
Repräsentation unterschiedlicher Wissensarten im Gehirn		Modellierung der gesamten kognitiven Architektur	
		Engineering-Ansätze in der Neurowissenschaft zum Nachbau des Gehirns	

Tabelle 12.3: Entstehung der Zukunftsthemen Neurowissenschaften und Lernforschung – Zwischenstände

12.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern

Neurowissenschaften

Folgende Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern können aufgeführt werden:

- Informations- und Kommunikationstechnologien: Insbesondere bestehen Nahtstellen im Bereich der Neuroimplantate, aber auch in der Entwicklung neuer Gehirnscanning-Methoden.
- Optische Technologien: Im Bereich der bildgebenden Verfahren erhoffen sich führende Neurowissenschaftler Weiterentwicklungen durch neue Verfahren aus den optischen Technologien.
- Gesundheitsforschung: Die meisten Verbindungen bestehen zum Zukunftsfeld Gesundheitsforschung. Hier kann die Neurowissenschaft wichtige Beiträge zur Erklärung psychosomatischer Phänomene liefern.

Eine herausragende Bedeutung heben die Neurowissenschaften für das Zukunftsfeld »Mensch-Technik-Kooperationen«. Zahlreiche Entwicklungen und Anwendungen, die den Neurowissenschaften entstammen, haben Konsequenzen für eine engere Verflechtung zwischen Mensch und Technik. Hier sind vor allem Gehirn-Maschine-Interfaces ein wichtiger Bezugspunkt. Während der Monitoring-Phase wurde deutlich, dass die neurowissen-schaftliche Forschung noch enger auf die Probleme der »Brain-Machine-Interfaces« orientiert werden muss, um die Entwicklung voranzutreiben. Bezüge finden sich aber auch zu »Das Altern entschlüsseln«.

Lernforschung

In der Lernforschung wurde von den internationalen Panellistinnen und Panellisten im Experteninterview vor allem auf das Lernen in Kombination mit den Inhalten der Zukunftsfelder Biotechnologie, Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung, Mobilität und Nanotechnologie hingewiesen. Dabei geht es eher um das »Educating« (»Erziehen und Belehren«) von Menschen, um mit den Themen korrekt umzugehen und diese einschätzen zu können. Ein weiteres Beispiel ist die Zusammenschau von Lern- und Gesundheitsforschung; dabei wurde u. a. die Nutzung von Internet-Agenten angesprochen, die Hilfesuchenden Diagnosen auf der Basis von programmierten Informationsverarbeitungssystemen anbieten. Das Zukunftsfeld neuen Zuschnitts Mensch-Technik-Kooperationen hat sich ebenfalls durch Themen aus der Lernforschung entwickelt (z. B. virtuelle pädagogische Agenten, »Augmented Reality«). Generell weisen in der Lernforschung die eher technikgetriebenen Zukunftsthemen deutliche Bezüge zum Zukunftsfeld Informations- und Kommunikationstechno-

logie auf. Das Zukunftsthema Lernen bis ins hohe Alter ist wiederum mit dem Zukunftsfeld neuen Zuschnitts »Das Altern entschlüsseln« vernetzt.

Themenkoordination:
Dr. Bernd Beckert, ISI (bernd.beckert@isi.fraunhofer.de) und
Dr. Katrin Allmendinger, IAO (katrin.allmendinger@acontrain.de)

13 Optische Technologien

Optische Technologien umfassen die Gesamtheit physikalischer, chemischer und biologischer Naturgesetze und Technologien zur Erzeugung, Verstärkung, Formung, Übertragung, Messung und Nutzbarmachung von Licht vom extremen ultravioletten bis zum infraroten Spektralbereich. Die Vielzahl der Entwicklungen und Anwendungen rund um das Licht prägten den Begriff der Photonik in Analogie zur Elektronik.

In nahezu allen Bereichen werden Aufgaben vermehrt mit optischen Technologien bzw. der Photonik gelöst, und Produkte enthalten immer mehr optische Komponenten als Schlüsselbausteine. Darüber hinaus bilden die optischen Technologien vielfach die Grundlage und Voraussetzung für weitere technologische Entwicklungen und Anwendungen. Dem Photon wird deshalb im 21. Jahrhundert eine vergleichbare Bedeutung zugesprochen wie dem Elektron im vergangenen Jahrhundert. Die Entwicklung der optischen Technologien und der Photonik ist besonders von der »Eroberung« des gesamten elektromagnetischen Spektrums und der gleichzeitigen Miniaturisierung technologischer Systeme (große Schnittmenge mit der Nanotechnologie) gekennzeichnet – demnach von einer Entwicklung hin zur Quantentechnologie, der Nutzung quantenmechanischer Prinzipien und Phänomene. Darüber hinaus weisen die optischen Technologien einen starken Querschnittscharakter und ein breit gefächertes, branchenübergreifendes Anwendungspotenzial auf.

13.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld »Optische Technologien«

Entwicklung neuer Herstellungsverfahren für Nano- und Mikrooptik
Weiterentwicklung bekannter Lithografietechniken
Direktschreibende Verfahren
Nano-Imprint-Verfahren
Manipulation und Kontrolle von Licht durch künstliche Materialien (Nanomaterialien)
Selbstorganisationseffekte von Nanoteilchen
Photonische Kristalle
Metamaterialien
Anwendungen der Nahfeldoptik
Licht als Werkzeug
Verständnis der Wechselwirkung von Licht und Materie
Effiziente Quellen mit hoher Leistung
Quellen mit extrem kurzen Wellenlängen
Entwicklung spezifischer Strahlführungssysteme

Optische Methoden für die Lebenswissenschaften
Diagnose und Therapie an der lebenden Zelle (in vivo)
Molekulare Bildgebung
Miniaturisierte Ausrüstung für die Medizintechnik
Photonik für die Energietechnik
Energieerzeugung durch Photonik
Energieübertragung durch Photonik
Moderne Festkörperlichtquellen
Optische Netzwerke

Tabelle 13.1: Identifizierte Zukunftsthemen Optische Technologien im Überblick

Eine kontinuierliche Entwicklung und Verbesserung von Strahlquellen, optischen Herstellungs-, Be- und Verarbeitungsverfahren sowie optischer Komponenten und Bauteile hat zu einer Technologie mit extrem breiten Ausstrahleffekten in zahlreichen Anwendungsbereichen geführt. So ist Deutschland heute nicht zuletzt dank der gezielten Förderstrategie der Bundesregierung führend in den optischen Technologien. Tabelle 13.1: Identifizierte Zukunftsthemen Optische Technologien im Überblick« zeigt einen Überblick über die Zukunftsthemen im Zukunftsfeld »Optische Technologien«.[36]

13.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen

Start des Prozesses

Das Zukunftsfeld Optische Technologien wurde im Anschluss an den ersten Experten-Workshop im November 2007 in Berlin in den BMBF-Foresight-Prozess aufgenommen. Hierzu wurden eine Mindmap sowie ein Hintergrundpapier vom Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (Fraunhofer IOF) entwickelt (interner Workshop). Diese dienten als Basis für weitere Recherchen und Befragungen, insbesondere für die Online-Befragung, sowie die Überprüfung von Schnittstellenthemen in weiteren Zukunftsfeldern. Tabelle 13.2 zeigt die vom Fraunhofer IOF entwickelte Übersicht mit neun vorläufigen Zukunftsthemen und den damit verbundenen Forschungsfragen bzw. -bereichen. Die Tabelle 13.2 wird im Folgenden erläutert:

Entwicklung neuer Herstellungsverfahren für Nano- und Mikrooptik
Verfahren und Methoden, zur Strukturierung von Materialien im Größenbereich von wenigen Nanometern bis in den Mikrometerbereich
Übertragung von Verfahren und Methoden der Halbleiterfertigung auf die Nano- und Mikrooptik bzw. relevante Materialien und -kombinationen
Weiterentwicklung bekannter Lithografie-Techniken, Direktschreibverfahren, etc.

36 Die dunkelgrau unterlegten Felder sind die Zukunftsthemen, die hellgrau hinterlegten einzelne, besonders wichtige Forschungsaufgaben.

Optische Methoden für die Lebenswissenschaften
Optik-basierte Verfahren, molekulare Bildgebung (z. B. mittels neuer Wellenlängen, Kurzpulssysteme, verbesserter Auflösung und Plasmon-basierten Nahfeldmethoden)
Diagnose an der lebenden Zelle
Beobachtung des Wirkstofftransports mithilfe geeigneter Biomaterialien und Analyse von Prozessen auf molekularer Ebene für eine präventive Medizin
quasi-klassische medizinischen Verfahren (z. B. Endoskopie, lasergestützte Chirurgie)
Manipulation und Kontrolle von Licht durch künstliche Materialien
Kontrolle von Brechung, Beugung, Polarisation und Dispersion des Lichtes mittels nanostrukturierter Materialien
photonische Kristalle, Metamaterialien, Selbstorganisationseffekte von Nanoteilchen, Anwendungen der Nahfeldoptik
Photonik für die Energietechnik
Ressourcenschonende Energieumwandlung
Energieerzeugung und -übertragung mit Photonik
Energieeffizienz durch moderne Festkörperlichtquellen oder optische Netzwerke
Licht als Werkzeug
Tiefergreifendes Verständnis der Licht-Materie-Wechselwirkung
Entwicklung und Weiterentwicklung von Quellen sowie Strahlführungssysteme für die spezifischen Anwendungen

Tabelle 13.2: Themen Optische Technologien im ersten(internen) Experten-Workshop

Herstellungsverfahren für Nano- und Mikrooptik: Das Thema »Herstellungsverfahren für Nano- und Mikrooptik« umfasst die Verfahren und Methoden, mit welchen Materialien im Größenbereich von wenigen Nanometern bis zu einigen 100 Mikrometern strukturiert werden können. Die Palette der zu strukturierenden Werkstoffe reicht dabei von Metallen über anorganische Dielektrika bis hin zu organischen Molekülen, die Verfahren von der Elektronenstrahllithografie über Direktschreibverfahren bis hin zu nanoskaligen Druckmethoden.

»Klassische« Herstellungsverfahren in neuen Dimensionen: Der Inhalt des Themas Klassische Herstellungsverfahren in neuen Dimensionen besteht in der konsequenten Weiterentwicklung bekannter Herstellungsverfahren hin zu neuen Genauigkeitsdimensionen und geometrischen Freiheitsgraden. Die Kombination von »makroskaligen« optischen Flächen mit Mikro- und Nanostrukturen wird dabei neue Felder der Funktionalität eröffnen.

Nanomaterialien und Nahfeldoptik: »Nanomaterialien und Nahfeldoptik« beinhaltet die Nutzung wellenlängen-, richtungs- und polarisationsabhängiger Effekte an Grenzflächen und an Strukturen, die kleiner als die Wellenlänge sind. Die Kontrolle von Brechung, Beugung, Polarisation und Dispersion des Lichtes mittels nanostrukturierter Materialien verspricht bisher ungeahnte Möglichkeiten: »langsames Licht«, höchste Auflösung bei Abbildung und Sensorik, sogar die »Tarnkappe«. Selbstorganisationseffekte nanoskalig strukturierter En-

titäten stellen zudem eine interessante Erweiterung der unter Punkt 1 aufgeführten »Herstellungsverfahren für Nano- und Mikrooptik« dar.

Optoelektronische Konvergenz: Kosteneffiziente Konzepte für planare optische Technologien lehnen sich an die Verfahren der Mikroelektronik an oder sind zu diesen weitgehend kompatibel. Damit ergeben sich konvergente Tendenzen, die von den Materialien über die Prozessierung in Wafer-Einheiten bis hin zur Applikation reichen (z. B. monolithische Integration der SOI-Wellenleitertechnik in die CMOS-Chiptechnologie). Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Optoelektronik haben weitreichende Hebelwirkungen auf Anwendungen von der Datenerfassung (Kameras) – über die Datenverarbeitung bis hin zur Datenspeicherung.

Licht als Werkzeug: »Licht als Werkzeug« baut auf einem tiefgreifenden Verständnis der Licht-Materie-Wechselwirkung auf, zu dem von der Forschung weiterhin grundlegende Beiträge zu leisten sind. Das Thema beinhaltet zudem die Entwicklung und Weiterentwicklung von Quellen sowie Strahlführungssysteme für die spezifischen Anwendungen, die von der fs-Technik, bei der das Photon als Sonde für extreme Nichtgleichgewichtszustände dient, bis hin zur hochenergetischen Laserstrahlung für die Plasmaerzeugung und Protonenbeschleunigung reichen.

Sensorik und Bildverarbeitung: Im Forschungsbereich »Sensorik und Bildverarbeitung« steht die Weiterentwicklung der optischen Sensorik und der Bilderfassung und -verarbeitung im Brennpunkt.

Optische Technologien für Sicherheit und Mobilität: Optische Technologien für Sicherheit und Mobilität umfassten die Entwicklung anwendungsspezifischer optischer Systeme, bei denen Sicherheit und/ oder Mobilität im Mittelpunkt stehen.

Optische Methoden für Biologie und Medizin: Optische Methoden für Biologie und Medizin umfassten alle Bereiche von der bio-spezifischen Sensorik bis hin zur lasergestützten, minimal-invasiven Chirurgie. Sie haben für die Lebenswissenschaften von der biologisch-medizinischen Grundlagenforschung bis hin zur medizinischen Versorgung eine herausragende Bedeutung.

Energieumwandlung und -nutzung: Die ressourcenschonende Energieumwandlung ist ein Kernthema für die optischen Technologien, dem im Rahmen einer zukunftssichernden Forschung erhebliche Relevanz zukommt.

Die Forschungsthemen und Aufgaben im Zukunftsfeld optische Technologien sind untereinander stark vernetzt, wie in Abbildung 7 dargestellt. Das trifft ebenso auf die Bezüge zu den weiteren Zukunftsfeldern im BMBF-Foresight-

Prozess zu, da optische Komponenten, optische Systeme und optische Technologien ohne hierbei unbedingt dominant zu sein, quasi omnipräsent sind. Dies wurde auch anhand einer Konvergenzmatrix deutlich, in welcher überlappende Forschungsbereiche und Schnittstellenthemen sowohl aus Sicht der optischen Technologien als auch der jeweiligen anderen Zukunftsfelder mit Bezug auf die optischen Technologien identifiziert wurden (siehe Tabelle 13.3). Insgesamt zeigt sich eine enorme Spannweite der Forschungsaufgaben, welche in den nächsten 10 bis 15 Jahren für die optischen Technologien abzusehen sind.

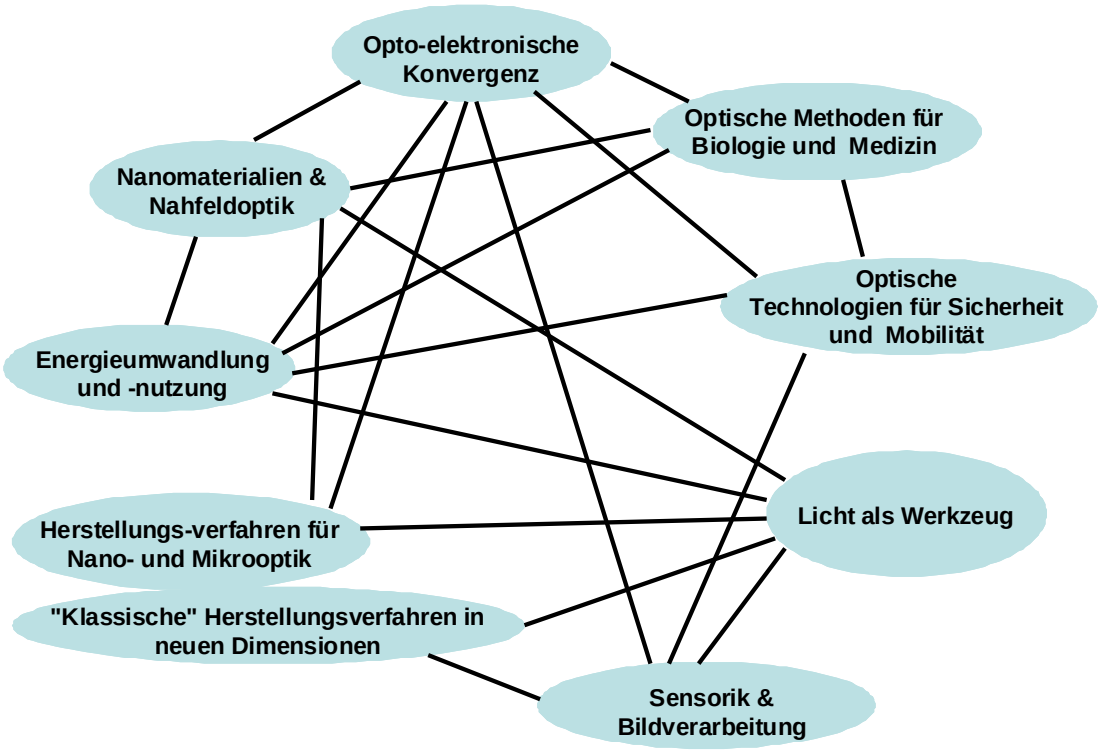

Abbildung 7: Vernetzung der neun vorläufigen Zukunftsthemen

Online-Befragung

Im weiteren Prozess wurden die Themenzuschnitte des Fraunhofer IOF unter Berücksichtigung der Zwischenergebnisse in den weiteren Zukunftsfeldern sowie ergänzender Literaturrecherchen (siehe u. a. angegebene Literatur im Daten & Fakten-Anhang) vom Fraunhofer ISI und IAO abgestimmt und für die Online-Befragung angepasst. Insbesondere wurde die immer deutlicher werdende Verschiebung von den optischen (EUV- bis IR-Spektralbereich) hin zu photonischen Technologien (gesamter Spektralbereich: z. B. auch Röntgen und Terahertz sowie Hindeutung auf Nutzung der Quantennatur des Lichts) stärker in den Vordergrund gestellt. Die seit 2005 auf EU-Ebene eingerichtete Technologieplattform »Photonics21« sowie das Memorandum zur Zukunft der opti-

schen Technologien in Deutschland (»Photonik 2020«, Juni 2009) unterstreichen diese Tendenz.

	Optische Technologien (Optik/ Photonik/ Optoelektronik)			
Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren	„Neue Gläser“ Metamaterialien	Nanoskalige transparente Keramik; Keramische Wave Guides	Neue Polymere und Keramiken für die Optik	
Informations- und Kommunikationstechnologie	Optische Netzwerke, Optronik Intelligente Optiken	Ubiquitäre Projektion und Informations-bereitstellung (Mikrobeamer)	SOI-Optik (Optik auf Chiplevel)	optische Signalverarbeitung (opt. Routing, …)
Nanotechnologie	Photonische Kristalle; Effektive Medien; Materialien mit negativem Brechungsindex	Funktionale optische Schichten	Optische Herstellungs-verfahren für Nanostrukturen (Lithografie, …)	Nanostrukturen auf Oberflächen mit optischen Funktionen; Komponenten für die Nahfeldoptik
Lebenswissenschaften und Biotechnologie	Molekular Imaging; biologisch optische Speicher; biologische Lichtverstärker	Analyse biologischer Prozesse auf molekularer Ebene, z.B. individualisierte Analyse, Diagnose und Therapie	Optische Analyse auf Mikrofluidik-Chips	Multimodale spektroskopische Analytik (z.B. Lebensmittel)
Industrielle Produktion	Faserlaser, CO2-Laser als Aktoren	zerstörungsfreie Analyseverfahren (gesamtes Spektrum, z.B. IR und THz)	Produktion von Mikro- und Nanooptik bzw. MOEMS (z.B. Wafer-level-packaging, Replikation)	Licht als Werkzeug: Verständnis der Licht-Materie-Wechselwirkung; Entwicklung v. geeigneten Materialien,Quellen u. Strahlführung
Gesundheitsforschung	Molekular Imaging; Hochfeld Imaging Neue Sensoren; Quantum Dots	Mikroskopie- und Spektroskopietechniken (µskopische Tomografie) markierungsfreie Kontrastverfahren		Laser-Mikrodissektion; Mikrochirurgie; Endoskopie
Wasser-Infrastrukturen	Sensorik (z.B. für Wasserqualität) Hygiene (UV))	Effiziente Sicherheits-technologien mit Hilfe optischer Messtechnik und Sensorik (z.B. Identifikation)	Multispektrale Analyseverfahren (Gefahrstoffdetektion)	Energieeffiziente Stadt- und Gebäudebeleuchtung
Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung	Produktionsorientierte Umwelttechnik (MSR, Mustererkennung)	Geomonitoring		
Energie	Optische Energieübertragung; Sensorik zur Reduzierung des Energiebedarfs	Photovoltaik und Photothermie mit effizientem Photonen-management (Nanotechnik für Photovoltaik)	Festkörperlichtquellen für Beleuchtung (LED,OLED); Intelligente und effiziente Beleuchtung	
Mobilität	Optische Sensorik	Fahrerassistenz	Verkehrsüberwachung und -management	Flugkörperüberwachung Satellitenkommunikation
Neurowissenschaften und Lernforschung	Optical brain imaging, z.B. 2-Photon-imaging	Optical computing	Intelligente, individuelle Beleuchtungskonzepte	
Services Science	Ubiquitäre Informations-darstellung	OLED	Individuelle und mobile Systeme (Messtechnik, Gesundheitsfürsorge, Unterhaltung, …)	
System- und Komplexitätsforschung	Simulationen und Agmented Reality (3D-Displays)			

Tabelle 13.3: Konvergenzmatrix mit Schnittstellenthemen zu weiteren Zukunftsfeldern

Als weiteres vorläufiges Zukunftsthema wurde das Thema **Design** als Querschnittsthema mit den Aspekten Modellierung und Simulation, Optimierung und photonisches Design, Standardisierung und Normung sowie Sicherheitsaspekte aufgenommen (siehe Tabelle 13.3). Vor allem die Modellierung und Simulation komplexer Systeme hat sich in weiteren Zukunftsfeldern (u. a. der Nanotechnologie) als relevant herauskristallisiert, da zunehmend zeit- und kostenaufwendige Experimente ersetzt werden können. Auch das optimierte, kompakte Design photonischer Komponenten und Bauteile unter Berücksichtigung bestmöglich erzielbarer Funktionalitäten gewinnt z. B. mit der Entwicklung neuer Herstellungsverfahren an Bedeutung. »Virtuelle Designs« könnten z. B. »Trial-and-Error«-Methoden vermeiden helfen. Schließlich hat sich im Verlauf des Foresight-Prozesses durch die Querschnittsbezüge z. B. auch das Zu-

kunftsthema neuen Zuschnitts »Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation« entwickelt.

In der Online-Befragung wurden aufgrund der Vorrecherchen insgesamt zehn vorläufige Zukunftsthemen mit ihren jeweiligen Forschungsfragen (insgesamt 36) zur Diskussion gestellt (siehe Tabelle 13.3).

Die Auswertung der Online-Befragung ergab, dass die **Industrielle Photonik** – neue **Herstellungsverfahren für Nano- und Mikrooptik** sowie die Entwicklung neuer Herstellungsverfahren langfristig (mit einer Perspektive von 10 bis 15 Jahren) als die relevantesten Themen angesehen werden. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus der ersten Monitoring-Welle (siehe weiter unten). Ebenso werden optische Methoden für die Lebenswissenschaften als langfristig relevant und sehr wichtig eingestuft.

Die **Sensorik und Bildverarbeitung** sowie **Licht als Werkzeug** stellen weitere sehr wichtige Forschungsthemen dar. Ein besonderes Potenzial wird in der Manipulation und Kontrolle von Licht durch künstliche Materialien gesehen, was als sehr wichtig, insbesondere in den nächsten zehn Jahren und später, eingestuft wird. Bei allen genannten Themen nimmt die Relevanz in den nächsten zehn Jahren laut Angabe der befragten Experten und Expertinnen tendenziell noch zu.

Bei der Einschätzung der Relevanz zeigt sich prinzipiell, dass Teilnehmer und Teilnehmerinnen mit höherer Fachkenntnis die Zukunftsthemen als wichtiger einschätzen als diejenigen mit geringerer Fachkenntnis. Insgesamt halten 80 - 100 Prozent der Expertinnen und Experten das jeweilige Thema für wichtig bis sehr wichtig und weniger als 20 Prozent für mittel, gering wichtig oder unwichtig. Lediglich das »Design« wird als mittel bis wichtig eingestuft, obgleich die Forschungsaufgaben zu Modellierung und Simulation sowie Optimierung und photonisches Design als wichtig eingestuft werden.

Dies weist darauf hin, dass die zentralen Zukunftsthemen der optischen Technologien erfasst werden konnten. Auch wurden nur wenige ergänzende Themen benannt, welche größtenteils Unterthemen jener in der Online-Befragung genannten darstellen und somit im BMBF-Foresight-Prozess bereits berücksichtigt sind. Auffällig ist die mehrfache Nennung von Themen mit Bezug zu Energieeffizienz (Licht aus Festkörpern, LED, OLED) und Energieumwandlung (»green photonics«, Solarenergie), optische (Ver-) Messungs-, Charakterisierungs-, Trenn-, Bearbeitungsverfahren auch für die Lebenswissenschaften sowie optische Informationsübertragung und Netze, z. B. für Sicherheitsanwendungen oder auch zur Unterstützung der Mobilität älterer Menschen. Optische Technologien können somit künftig wichtige Beiträge zu globalen, übergrei-

fenden Problemen wie Klima, Energie, demografische Entwicklungen etc. liefern. Dies wurde auch in der ersten Welle des Monitorings betont.

Der wirtschaftliche, wissenschaftliche und gesellschaftliche Beitrag der Themengebiete wird jeweils wie folgt eingeschätzt:

Für alle Zukunftsthemen wird die Annahme einer wirtschaftlichen Bedeutung für Deutschland als zutreffend bis völlig zutreffend bestätigt. Besonders relevant für die wirtschaftliche Entwicklung werden neue Herstellungsverfahren für Mikro- und Nanooptik sowie Photonik für die Energietechnik und Licht als Werkzeug beurteilt. Als weniger bedeutend für die Wirtschaft wird das Design eingestuft.

Für eine Verbesserung der Lebensqualität des Menschen tragen nach Meinung der Befragten in erster Linie die optischen Methoden für die Lebenswissenschaften, Photonik für die Energietechnik, optische Technologien für Sicherheit und Mobilität, Sensorik und Bildverarbeitung sowie industrielle Photonik (neue Herstellungsverfahren für Mikro- und Nanooptik) bei. Am geringsten wird hier der Beitrag klassischer Herstellungsverfahren in neuen Dimensionen gesehen.

Besonders relevant für neue Erkenntnisse in Wissenschaft und Technologie werden die Manipulation und Kontrolle von Licht durch künstliche Materialien, optische Methoden für die Lebenswissenschaften sowie Licht als Werkzeug erachtet. Die Aufgabe des Designs gilt als weniger wichtig.

Auch als Impulsgeber für weitere Zukunftsthemen bzw. Zukunftsfelder wird die Manipulation und Kontrolle von Licht durch künstliche Materialien als besonders relevant eingestuft. An zweiter und dritter Stelle folgen Licht als Werkzeug sowie neue Herstellungsverfahren für Nano- und Mikrooptik. Das Design spielt auch hier eine weniger wichtige Rolle.

Insgesamt werden somit neue Herstellungsverfahren für Nano- und Mikrooptik sowie die Manipulation und Kontrolle von Licht durch künstliche Materialien (Nanomaterialien) als besonders wichtige Zukunftsthemen eingeschätzt. Sicherheits- und Energieanwendungen sowie Beiträge für die Lebenswissenschaften werden in der Zukunft die häufigsten Anwendungsgebiete sein.

Auswahl der Zukunftsthemen anhand der Kriterien

Das wichtigste Zukunftsthema mit einem Zeithorizont von zehn Jahren und länger sowie zugleich großem Entwicklungspotenzial ist die **Manipulation und Kontrolle von Licht durch künstliche Materialien** (Nanomaterialien) und betrifft in erster Linie die Entwicklung von Metamaterialien. Andere als wichtig eingestufte Forschungsfragen mit einem etwas kürzeren Zeithorizont

von 6 bis 10 Jahren betreffen optische Netzwerke (Photonik für die Energietechnik) sowie die Entwicklung von Quellen mit extrem kurzen Wellenlängen und das Verständnis der Wechselwirkungen von Licht und Materie (Licht als Werkzeug). Weitere Gebiete mit einer späten Forschungsintensität (11 bis 15 Jahre), die als mittel bis wichtig eingestuft werden, sind die Photonik für die Energietechnik (z. B. Energieübertragung mit Photonik) sowie optische Technologien für Sicherheit und Mobilität (z. B. Geoinformationssysteme).

Vor allem die Manipulation und Kontrolle von Licht sowie die **Photonik für die Energietechnik** sind übergeordnete Gebiete und somit Zukunftsthemen, die kurz- (1-5 Jahre), mittel- (6-10 Jahre) und langfristig (11-15 Jahre) sehr differenzierte Beiträge liefern können. Forschungsfragen werden hier in ihrer Wichtigkeit und auch hinsichtlich der Zeit der höchsten Forschungsintensität unterschiedlich eingeschätzt, z. B. die Energieübertragung als mittel bis wichtig und spät, aber die Energieerzeugung durch Photonik sowie die Energieeffizienz durch moderne Festkörperlichtquellen als äußerst wichtig und relativ zeitnah.

Auffallend ist eine ähnliche Differenzierung dieser Themen auch aus Sicht der Nanotechnologie, da hauptsächlich die Energieübertragung in beiden Zukunftsfeldern sehr spät angesiedelt wird. Neben den Metamaterialien stellen Selbstorganisationseffekte von Nanoteilchen sowie Anwendungen der Nahfeldoptik wichtige Zukunftsthemen dar. Als sehr wichtig und langfristig gelten unter dem Zukunftsthema **Licht als Werkzeug** das tiefere Verständnis der Wechselwirkung von Licht und Materie auf verschiedenen, anwendungs- und materialspezifischen Zeit- und Intensitätsskalen (z. B. im Bereich der Ultrakurzzeitwissenschaften) sowie die Entwicklung von Quellen mit extrem kurzen Wellenlängen.

Auch **optische Methoden für die Lebenswissenschaften** wurden betont. Hier wurden die Themen Diagnose und Therapie an der lebenden Zelle (in vivo) und molekulare Bildgebung als sehr wichtig eingeschätzt, wobei ersteres einen längeren Zeithorizont aufweist und als besonders zukunftsträchtig angesehen wird. Insgesamt zeigt die Auswertung, dass primär die grundlegenden wissenschaftlichen Themen mit breitem Entwicklungs- und Anwendungspotenzial sowie Anwendungsgebiete der optischen Technologien, welche breite, globale Bedürfnisse wie Energieversorgung, Sicherheit, Mobilität oder Gesundheit betreffen, eher als langfristig und sehr wichtig gelten.

Die **Entwicklung neuer Herstellungsverfahren für die Nano- und Mikrooptik**, wie z. B. die Weiterentwicklung bekannter Lithographietechniken, Weiterentwicklung klassischer Verfahren mit nm-Präzision oder auch die optoelektronische Konvergenz, werden tendenziell eher mittelfristig und wichtig beurteilt. Hier handelt es sich um verbesserte Herstellungs- und Bearbeitungsverfahren mit optischen Technologien, optische Messtechniken, Systeme und ihre Integration. Die Sensorik und Bildverarbeitung sowie das Design haben

stärkeren Bezug zur Computertechnologie bzw. Informationsverarbeitung und werden als kurz- bis mittelfristige Themen mit mittlerer bis wichtiger Bedeutung angesehen; wichtigster Teilaspekt sind multispektrale, multidimensionale Sensorik, Messsysteme und (Bild-) Datenverarbeitung in Echtzeit.

Monitoring-Panel

Neben der Online-Befragung sind weitere Expertenmeinungen im Rahmen von Befragungen internationaler Expertinnen und Experten (erste und zweite Monitoring-Welle) im Bereich der optischen Technologien/Photonik in den Foresight-Prozess eingeflossen. In den Expertengesprächen wurden u. a. die bis dahin identifizierten Themen widergespiegelt und validiert. Diese konnten als zentrale Zukunftsthemen mit hoher Relevanz bestätigt werden. Signifikante Bezüge der optischen Technologien zu den anderen Foresight-Themen werden u. a. in den Bereichen industrielle Produktion, IKT, Gesundheit, Biotechnologie, Nanotechnologie und Materialien gesehen.

Als zukünftig relevant werden verbesserte Herstellungsverfahren und die Nanooptik auch über 10 Jahre hinaus eingeschätzt. Für eine langfristige, strategische Planung von Forschungsaktivitäten mit einem Zeithorizont von 10 bis 15 Jahren wird insbesondere der Querschnittsbereich zwischen den optischen Technologien und der Nanotechnologie als relevant eingestuft. Grundsätzlich würden optische Technologien auch jenseits des 10-15-Jahreszeitraums zu verbesserten Herstellungs- und Bearbeitungsverfahren, vor allem durch kontinuierlich verbesserte (Laser-)Strahlquellen unterschiedlicher Wellenlängen mit höherer Leistung, Auflösung und Präzision beitragen. Konvergenzen, z. B. auch von Optik und (Mikro-/ Nano-) Elektronik, dürften sich neben traditionellen Anwendungen in der industriellen Produktion immer stärker auf weitere Anwendungen wie Gesundheit und Medizintechnik auswirken. Im Zeitraum 10 bis 15 Jahre werde zudem die Forschung an neuen Materialien und ihrer Herstellung wichtiger werden. Abgesehen von der Materialentwicklung auf atomarem/molekularem Niveau betrifft das vor allem die Herstellung mesoskopischer Strukturen verschiedener Ordnungsgrade, neben effektiven Medien, z. B. funktionalisierte poröse Materialien (Hintergrund: Biosensorik auf Si-Chips).

Höchste Wichtigkeit wird daher den Herstellungstechnologien für µ- und Nanooptik sowie dem Einsatz der optischen Technologien für Biologie/Medizin und Energietechnik (Energieumwandlung/ Photovoltaik, Energieverbrauch/Festkörperlichtquellen) zugemessen. Als weitreichende Zukunftsthemen werden dabei z. B. die Bio-Sensorik in vivo, die Kopplung von Photonik und Mikroelektronik bis zur Chip-Neuron-Kopplung, »Smart Wireless Objects« und optische Technologien in Implantaten angesehen.

Die Gespräche mit den internationalen Expertinnen und Experten im Rahmen des Monitorings bestätigen daher nicht nur die identifizierten Forschungsthemen, sondern geben darüber hinaus eine äußerst detaillierte Einschätzung ab, die sich sehr gut mit den Ergebnissen der Online-Befragung deckt: Neue Herstellungsverfahren für µ- und Nanooptik sowie optische Methoden für die Lebenswissenschaften sind sowohl Langfristthemen ,als auch Themen mit besonders hoher Relevanz.

13.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick

Die folgende Tabelle 13.4 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Zukunftsthemen im BMBF-Foresight-Prozess. **Themen nach 1. Recherche** sind die Themen aus den Prozessen der Fachreferate (sofern sie nicht aussortiert wurden, weil sie bereits auf der Forschungsagenda stehen) und aus der ersten Literaturanalyse. **Themen nach 1. Workshop** sind diejenigen Themen, die nach dem 1. Workshop besonders verfolgt werden sollten. Die Tabelle 13.2 im vorangegangenen Abschnitt ist der auf dem Workshop bearbeitete Stand und damit zwischen den Themen nach erster Recherche und den Themen nach dem ersten Workshop anzusiedeln. **Themen Online-Befragung** sind in die Online-Befragung eingegangen, bedeuteten also eine weitere Zusammenfassung der Zwischenergebnisse, die in der Befragung bewertet wurden. Und die **Themen nach Kriterienfilter** sind bereits »Zukunftsthemen«, die in der letzten Phase des Prozesses untersucht wurden. Sie sind in der Regel sehr ähnlich den am Ende des BMBF-Foresight-Prozesses vorgeschlagenen Zukunftsthemen (siehe erste Tabelle dieses Kapitels). Durch letzte Recherchen und Experteninterviews sind jedoch noch einige Zukunftsthemen modifiziert worden.

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Dieses Feld startete später, wurde erst für die Online-Befragung recherchiert	**Kernbereich**	**Industrielle Photonik – neue Herstellungsverfahren für Nano- und Mikrooptik**	**Photonik für die Energietechnik (in Energiekonzert)**
	wurde erst im Jahr 2008 vertieft bearbeitet	Weiterentwicklung bekannter Lithografietechniken	Optische Netzwerke
	Schnittstellen	Direktschreibende Verfahren	Industrielle Photonik
	Photonik, Materialien mit neuen optischen Eigenschaften	Nano-Imprint-Verfahren	Kommunikation mit Hilfe von sichtbarem Licht (VLC)
	Energieübertragung	**Klassische Herstellungsverfahren in neuen Dimensionen**	Licht als Werkzeug
	Optical Brain Imaging	Fertigung von Asphären und Freiformflächen	Optische Methoden für die Lebenswissenschaften
	2 Photonen Imaging	Integration optischer, flexibler 3D-Messtechnik und Bearbeitung mit nm-Genauigkeit	Neue Herstellungsverfahren für Nano- und Mikrooptik
		Kombination von Makro- und Mikro- bzw. Nanooptik	
		Manipulation und Kontrolle von Licht durch künstliche Materialien (Nanomaterialien)	
		Selbstorganisationseffekte von Nanoteilchen	
		Photonische Kristalle	
		Metamaterialien	
		Anwendungen der Nahfeldoptik	
		Opto-elektronische Konvergenz	
		CMOS-kompatible SOI Technologie	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
		Hybride Integration	
		Organische Optoelektronik	
		Mikro-Optisch-Elektro-Mechanische Systeme (MOEMS)	
		Optische Datenspeicherung	
		Licht als Werkzeug	
		Verständnis der Wechselwirkung von Licht und Materie	
		Effiziente Quellen mit hoher Leistung	
		Quellen mit extrem kurzen Wellenlängen	
		Entwicklung spezifischer Strahlführungssysteme	
		Sensorik und Bildverarbeitung	
		THz-Systeme und Terahertztechnologie	
		3D-Messsysteme	
		Multispektrale, multidimensionale Sensorik, Messsysteme und (Bild) Datenverarbeitung in Echtzeit	
		Optische Technologien für Sicherheit und Mobilität - Vernetzte Photonik	
		Systeme zur Verkehrsführung, -überwachung und -optimierung	
		Identifikation sicherheitsrelevanter Merkmale und Multisensordatenfusion	
		Geoinformationssysteme	

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
		Optische Methoden für die Lebenswissenschaften	
		Diagnose und Therapie an der lebenden Zelle (in vivo)	
		Molekulare Bildgebung	
		Miniaturisierte Ausrüstung für die Medizintechnik	
		Photonik für die Energietechnik	
		Energieerzeugung durch Photonik	
		Energieübertragung durch Photonik	
		Moderne Festkörperlichtquellen	
		Optische Netzwerke	
		Design	
		Modellierung und Simulation	
		Optimierung und photonisches Design	
		Standardisierung und Normung hochenergetischer Laserquellen	
		Sicherheitsaspekte bei künftigen neuartigen Strahlquellen	

Tabelle 13.4: Entstehung der Zukunftsthemen Optische Technologien – Zwischenstände

13.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern

Die Zukunftsthemen des Feldes »Optische Technologien« weisen einen starken Bezug zu Nanophotonik, Nanomaterialien und damit auch zu den Materialwissenschaften auf. In diesem Querschnittsfeld könnten künftig neuartige optische Komponenten und Systeme durch die Kontrolle des Lichts mittels nanoskaliger Materialien sowie die Nutzung neuartiger (quanten-) optischer Effekte hervorgebracht werden. Anwendungen derartiger Systeme sind über die Optoelektronik (Konversion zwischen elektrischer Ladung und Strahlung/Photonen) in erster Linie für die Energietechnik oder die Informations- und Kommunikationstechnologien relevant. Bezüge zu Mobilität, Umwelt, Infrastrukturen etc. folgen über diese Anwendungsfelder. Für Biotechnologie und Gesundheit sind primär optische, bildgebende Verfahren relevant. Der Bezug zu industriellen Produktionsprozessen wird, so die hier getroffene Einschätzung, auch in Zukunft bestehen bleiben.

Gerade die im Zukunftsfeld »Optische Technologien« identifizierten Zukunftsthemen »Neue Herstellungsverfahren für Mikro- und Nanooptik«, »Manipulation und Kontrolle von Licht durch künstliche Materialien« und »Licht als Werkzeug« verdeutlichen die zunehmende Bedeutung der Schnittstelle zur Nanotechnologie im Rahmen der stetigen Miniaturisierung. Damit hängen Entwicklungen von hocheffizienten, kompakten, räumlich und zeitlich hochauflösenden Strahlquellen zusammen, die z. B. der Nanotechnologie selbst sowie weiteren Disziplinen wie Materialwissenschaften, Biotechnologie oder Anwendungsfeldern wie Lebenswissenschaften und Energietechnik zu neuen Innovationsschüben verhelfen können.

Ultrapräzisionstechnologien (ultrapräzise, ultraschnell bzw. -kurz, ultraleistungsfähig, ultraeffizient etc.) stellen daher eine besondere Verbindung zwischen den identifizierten Zukunftsthemen her und weisen zusätzlich einen klaren Bezug zu bereits vom BMBF im Rahmen der optischen Technologien geförderten Themen auf, wie zur Femtonik (im Vordergrund stehen bei der Femtonik vor allem die Themen Lebenswissenschaften und Produktion/Herstellungsverfahren, in der Online-Befragung und dem Monitoring am wichtigsten eingestufte Themen). Eine künftige »Attonik« könnte zu diesen und weiteren Zukunftsfeldern (z. B. Nanotechnologie, IKT etc.) klare und wichtige Bezüge herstellen. Die Atto(elektro)nik wurde im Zukunftsfeld neuen Zuschnitts »Zeitforschung« als »ultrapräzise/ultrakurze Zeitmessung« aufgenommen.

Themenkoordination:
Dr. Axel Thielmann, ISI (axel.thielmann@isi.fraunhofer.de) und
Oliver Mauroner, IOF (oliver.mauroner@iof.fraunhofer.de)

14 Services Science

Dienstleistungen und neue Wertschöpfungsformen

»Services Science« fokussiert Dienstleistungen als eigenständiges Forschungs- und Technologiefeld. Dabei verweist der Begriff »Services Science« darauf, dass mit Dienstleistungen interdisziplinäre und sektorübergreifende Forschungspotenziale verbunden sind (vgl. Stauss et al. 2007)[37]. »Services Science« ist die geläufige Kurzbezeichnung für »Services Science, Management and Engineering« – ein Ansatz, der seit 2004 im internationalen Umfeld von mehreren Großunternehmen vorangetrieben wird und der zunehmend auch im forschungspolitischen Umfeld auf ein positives Echo stößt (vgl. www.thesrii. O.rg). Auf einer übergeordneten Ebene zielt die Forderung nach einer »Services Science« darauf ab, in Wissenschaft, Wirtschaft und Politik das Bewusstsein für die ökonomische und soziale Bedeutung von Dienstleistungen und Dienstleistungsinnovationen zu schärfen und Dienstleistungsinnovationen durch neue Formen der akademischen Aus- und Weiterbildung zu fördern. Inzwischen finden sich auch wieder die Begriffe »Service Science« oder »Services Sciences«. Welche Begrifflichkeit sich durchsetzen wird, wird die Zukunft zeigen.

Um für den BMBF-Foresight-Prozess eine allgemein verständliche Bezeichnung zu verwenden, wurde das Zukunftsfeld um die Benennung »Dienstleistungen und neue Wertschöpfungsformen« ergänzt. Damit kündigt sich ein Paradigmenwechsel an. Denn der Begriff der »Dienstleistung« steht nicht mehr allein für die Bezeichnung sektoral zurechenbarer Tätigkeiten, sondern verweist auf neue, kundenorientierte Wertschöpfungsformen (vgl. Lusch/ Vargo 2006). Zentrales Kennzeichen dienstleistungsorientierter Wertschöpfungsformen ist eine stärkere Integration des Kunden in den Prozess der Leistungserstellung und eine konsequente Ausrichtung des Geschäftsmodells am Kundennutzen (»value-in-use«). Maßgeblich unterstützt werden dienstleistungsorientierte Wertschöpfungsformen durch den Einsatz neuer Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) (vgl. Spohrer et al. 2007). Wertschöpfung wird in diesem Zusammenhang als prozessorientiert, interaktiv, immateriell sowie digital und vernetzt verstanden.

[37] Am Ende des Foresight-Prozesses scheint die Debatte um die Formulierung wieder dahin zu gehen, dass das Zukunftsfeld »Service Science« heißen könnte. Hier ist demnach die Formulierung offenbar noch im Fluss.

14.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld »Services Science«/ Dienstleistungen und neue Wertschöpfungsformen

Dienstleistungsinnovation
Theoretische Grundlagen der Dienstleistungsinnovation
Methoden und Instrumente des Innovationsmanagements für Dienstleistungen
Neue Qualifikationsprofile für Mitarbeiter und Kunden
Integration von Dienstleistungen und neuen Technologien
Wechselwirkungen zwischen Dienstleistungs- und Technologieentwicklung
Automatisierung und Rationalisierung von Dienstleistungen
Technologie- und Dienstleistungsstandardisierung
Entwicklung neuer Organisations- und Geschäftsmodelle
Entwicklung »hybrider« Produkte durch Produkt-Dienstleistungskombinationen
Neue Preis- und Erlösmodelle
Dienstleistungsspezifische Transformation von Prozessen und Strukturen
Modellierung und Simulation von Dienstleistungen
Modellierungstechniken und Modellierungssysteme für Dienstleistungen
Modellierung komplexer Dienstleistungssysteme
Virtualisierung von Dienstleistungen
Service Engineering
Spezifisches Engineering für unterschiedliche Typen von Dienstleistungen
Engineering des Dienstleistungserlebnisses (Service Experience)
F&E-Management für Dienstleistungen

Tabelle 14.1: Identifizierte Zukunftsthemen Services Science im Überblick

Im Zukunftsfeld Dienstleistungen und neue Wertschöpfungsformen wurden im Rahmen des BMBF-Foresight-Prozesses fünf Zukunftsthemen identifiziert (siehe Tabelle 14.1).[38]

Dienstleistungsinnovation: Die Besonderheiten und der Charakter von Innovationen im Dienstleistungsumfeld bilden ein eigenständiges Forschungsthema, das bislang weder theoretisch noch analytisch durchdrungen ist.

Integration von Dienstleistungen und neuen Technologien: Es bilden sich neue Wechselverhältnisse zwischen Technologie- und Dienstleistungsentwicklung, wobei Dienstleistungen zunehmend Impulse für die Technologieentwicklung liefern.

Entwicklung neuer Organisations- und Geschäftsmodelle: Innovative Dienstleistungen verändern unsere Arbeits- und Lebenswelten und die Art und Weise, wie Unternehmen Geld verdienen.

38 Die dunkelgrau unterlegten Felder sind die Zukunftsthemen, die hellgrau hinterlegten einzelne, besonders wichtige Forschungsaufgaben.

Modellierung und Simulation von Dienstleistungen: Ähnlich wie in der Sachgutproduktion revolutionieren Modellierungs- und Simulationstechniken die Entwicklung neuer Dienstleistungen.

Service Engineering: Methoden und Vorgehensweisen zur Dienstleistungsentwicklung werden künftig stärker zur Gestaltung immaterieller Faktoren, wie Interaktionen und Emotionen, eingesetzt werden.

14.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen

Start des Prozesses und Foresight-Workshop 2007

Auf Basis einer umfassenden Literaturanalyse, in die auch Erkenntnisse weiterer internationaler Monitoring-Aktivitäten zum Thema Dienstleistungen eingeflossen sind (vgl. Spath/ Ganz 2008), konnten für den Foresight-Prozess fünf Startthemen identifiziert werden, die nachfolgend näher beschrieben werden.

Die Startthemen dienten als Diskussionsgrundlage für den ersten Experten-Workshop im November 2007 in Berlin. Zu beachten ist dabei, dass es sich bei »Dienstleistungen« um ein junges Forschungsfeld handelt, welches als Querschnittsthema eine Vielzahl unterschiedlicher wissenschaftlicher Disziplinen adressiert. Vor diesem Hintergrund haben sich die zu Beginn definierten Startthemen im Verlauf des Foresight-Prozesses gewandelt bzw. wurden neu definiert. Im Folgenden wird dieser Themenfindungsprozess rekonstruiert.

Herausforderungen komplexer Service Systeme: Das Themengebiet »Herausforderungen komplexer Service Systeme« wurde zu Beginn des Foresight-Prozesses definiert, um der zunehmenden Bedeutung der Vernetzung von Dienstleistungsakteuren im Wertschöpfungsprozess Rechnung zu tragen. Dabei sind Herausforderungen auf unterschiedlichen Ebenen zu sehen: Zum einen bedarf es ausgereifter theoretischer Grundlagen und Modelle, um die Komplexität von Dienstleistungssystemen adäquat zu erfassen. Darüber hinaus gilt es, neue Pfade in der empirischen Forschung zu beschreiten, um Dienstleistungssysteme analytisch zu durchdringen. Und schließlich sind viele Dienstleistungsangebote (z. B. Gesundheitsdienstleistungen) stark von den sozialpolitischen Rahmenbedingungen bzw. ihrer sozialen Einbettung abhängig. Die Ergebnisse des ersten Foresight-Workshops haben allerdings gezeigt, dass Forschungsdefizite vor allem im Hinblick auf die Theoriebildung zur Erfassung komplexer Dienstleistungssysteme gesehen werden.

Transformation von Organisations- und Geschäftsmodellen wurde als Startthema definiert und über den gesamten Foresight-Prozess hinweg beibehalten. Dabei ließen die Ergebnisse des ersten Foresight-Workshops darauf schließen, dass Forschungsbedarf vor allem bei der Integration von Produkten

und Dienstleistungen zu »hybriden« Produkten besteht. Darüber hinaus wurden von den beteiligten Experten inner- und überbetriebliche Kooperationsprozesse als besonders relevant eingeschätzt.

Modellierung und Simulation von Dienstleistungen: Ebenfalls unverändert beibehalten wurde das Zukunftsthema »Modellierung und Simulation von Dienstleistungen«. Allerdings konnte die gesamte Bandbreite des Themas erst im Verlauf des BMBF-Foresight-Prozesses erschlossen werden. Auffällig ist bei diesem Zukunftsthema über den gesamten Foresight-Prozess, dass die Dienstleistungsexperten mit technisch orientiertem Forschungsinteresse das Thema wichtiger einschätzen als die Experten mit einem anderen Forschungsschwerpunkt. Dieser Umstand zeichnete sich bereits in dem ersten Experten-Workshop ab. Für besonders wichtig erachtet wurde die Entwicklung geeigneter Modellierungssprachen und Modellierungssysteme, die es erlauben, die Wertschöpfungsprozesse von Dienstleistungen zu erfassen und grafisch bzw. informationstechnisch abzubilden.

Spitzentechnologien: Das Zukunftsthema »Spitzentechnologien« wurde erst im Verlauf des ersten Foresight-Workshops identifiziert. Hier vertraten einige Experten die Ansicht, dass innovative Technologien für das Zukunftsfeld Dienstleistungen von so elementarer Bedeutung seien, dass dies ein eigenes Zukunftsthema darstellen müsse. Im weiteren Foresight-Prozess hat sich diese Vermutung als zutreffend bestätigt. Besondere Beachtung ließen die Experten IT-gestützten Informationsplattformen zukommen, die viele neue Dienstleistungen überhaupt erst ermöglichen bzw. durch die etablierte Geschäftsmodelle revolutioniert werden (Ebay, YouTube etc.). Im weiteren Verlauf des Foresight-Prozesses wurde dieses Themengebiet unter der Bezeichnung »Integration von neuen Technologien und Dienstleistungen« begrifflich geschärft, da neben der Informationstechnologie weitere Technologien unter Dienstleistungsgesichtspunkten von Interesse sind (Energietechnik, Biomedizin etc.).

Service Design: Als weiteres Startthema wurde das Zukunftsthema »Service Design« formuliert. Bereits der erste Experten-Workshop ließ jedoch erkennen, dass die Bezeichnung »Service Design« nicht allgemein verständlich bzw. nicht einheitlich definiert ist. So bezieht sich der Design-Begriff im angelsächsischen Raum stärker auf die Gestaltung von Service-Prozessen, während in Kontinentaleuropa primär die räumliche Gestaltung der Dienstleistungsumgebung mit dem Begriff »Design« verbunden wird. Die Monitoring-Interviews haben dies im Wesentlichen bestätigt. Aus diesem Grund wurde das Zukunftsthema später unter dem Stichwort »Service Engineering« gefasst, da es sich im Verlauf des Foresight-Prozesses gezeigt hat, dass vor allem innovative Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Entwicklung neuer Dienstleistungen von besonderem Forschungsinteresse sind.

Monitoring-Panel

Im Zuge der internationalen Experteninterviews konnten die Auswahl an Zukunftsthemen präzisiert und die jeweiligen Forschungsinhalte konkretisiert werden. Zur Präzisierung hat auch beigetragen, dass die Zukunftsthemen mit Experten der »Taskforce Dienstleistungen« diskutiert und evaluiert wurden[39].

Dienstleistungsinnovation: Das Zukunftsthema »Dienstleistungsinnovation« fokussiert die Fragestellung, wie zukunftsfähige Innovationen durch und mit Dienstleistungen schneller und effektiver entwickelt und vermarktet werden können. Damit markiert »Dienstleistungsinnovation« ein Meta-Thema, das weitere Zukunftsthemen einschließt. Die befragten Experten waren sich gleichwohl einig, dass es sich bei Dienstleistungsinnovationen um ein eigenständiges Forschungsthema handelt. Denn die Dienstleistungsforschung fängt erst an, den Charakter von Dienstleistungsinnovationen zu verstehen.

So fehlt aus Sicht der Experten z. B. die Entwicklung eines eigenständigen Verständnisses von Dienstleistungsinnovationen. Was sind Dienstleistungsinnovationen und wie entstehen sie? Welche Rolle spielen »weiche« Faktoren wie Unternehmenskultur oder das Engagement und die Motivation der Beschäftigten? Und welche Funktion übt der Kunde als aktives Element im Innovationsprozess aus? Hinzu kommt, dass das Spektrum von Dienstleistungen breit und die Heterogenität der Dienstleistungsbranchen groß ist.

Daraus ergeben sich weiterführende Forschungsfragen: Z. B., inwiefern sich Innovationsstrukturen und Innovationsprozesse auf andere Dienstleistungsbereiche übertragen lassen oder wie Innovationen branchen- und sektorübergreifend in Dienstleistungssystemen entstehen und gemanaged werden können. Die befragten Experten schließen nicht aus, dass zur Beantwortung dieser Fragen die Dienstleistungsforschung ihr eigenes methodisches Instrumentarium überprüfen und weiterentwickeln muss, z. B. durch stärkere Verknüpfung qualitativer und quantitativer Methoden oder mit einem stärker interdisziplinär orientierten Methodeneinsatz.

Integration von Dienstleistungen und neuen Technologien: Neue Technologien lösen nicht nur alte im Sinne linearer Entwicklungspfade ab, sondern können die Funktionsweisen ganzer Märkte in kurzer Zeit verändern. So hat die Digitalisierung der Fototechnik zu einer vollständigen Neuausrichtung der Wertschöpfungsprozesse der Fotobranche geführt. Verstärkt wird diese Dynamik durch das engere Zusammenwachsen unterschiedlicher Technologien (»Tech-

39 Die »Taskforce Dienstleistungen« ist Teil der »Forschungsunion Wirtschaft-Wissenschaft«, welche die Deutsche Bundesregierung in Innovationsfragen unterstützt.

nologie-Konvergenz«) und die Kombination neuer Technologien mit dienstleistungsorientierten Wertschöpfungsformen.

Diese Effekte sind so weittragend, dass sich im Zuge des Foresight-Prozesses die Integration von Dienstleistungen bzw. dienstleistungsorientierten Wertschöpfungsformen und neuen Technologien als wesentliches und eigenständiges Zukunftsthema herauskristallisiert hat. Forschungsrelevante Fragestellungen finden sich z. B. bei der Nutzung neuer Technologien zur Automatisierung und Rationalisierung von Dienstleistungsprozessen. Auch tragen neue Technologien zunehmend zur Individualisierung von Leistungen bei, etwa durch individuelle Gestaltung der ästhetisch-emotionalen Leistungsbestandteile oder über die Gestaltung der Kommunikationsschnittstellen zwischen Anbieter und Kunde.

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 technologische Entwicklungen vorangetrieben werden (z. B. RFID-Technologie im Handel), ohne dass diese Prozesse bislang ausreichend erforscht worden sind. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch die stärkere Integration von Dienstleistungen mit neuen Technologien der Komplexitätsgrad von Dienstleistungssystemen erhöht, zugleich aber auch beherrschbar gehalten wird. Die daraus resultierenden Wechselwirkungen im Zusammenspiel von Konsum und Produktion sind bislang erst ansatzweise erforscht.

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

Eine leitende Forschungsfrage ist dabei, 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 Ressourcen (Kunden, Kooperations- und Netzwerkpartner) – Akteure mithin, die sich dem eigentlichen Steuerungsradius der Organisation entziehen. Eng damit verbunden ist die Entwicklung von innovativen Preis- und Erlösmodellen, die eine stärker nutzenorientierte Leistungsverrechnung erlauben.

Modellierung und Simulation von Dienstleistungen: Die Abstraktion von der sektoralen Unterscheidung zwischen Produktion und Dienstleistung führt dazu, dass sich die Dienstleistungsforschung Forschungsthemen zuwendet, von denen man bislang glaubte, sie seien dem produzierenden Sektor vorbehalten. Ein solches Thema stellt die Modellierung und Simulation dar. Dabei besteht ein primärer Bedarf in der Schaffung von Referenzmodellen für Dienstleistungssysteme sowie in der Formalisierung von Konzepten, um darauf neue betriebliche Informationssysteme aufzubauen (z. B. »Service Life Cycle Management«- Systeme, Ressourcenmanagementsysteme).

Die Modellierung und Simulation bietet darüber hinaus vielfältige Einsatzgebiete im Umfeld dienstleistungsorientierter Wertschöpfungsformen. Diese reichen von der Simulation räumlicher Umgebungen über die Simulation von Prozessen und Kapazitätsauslastungen bis zur virtuellen Gestaltung der Interaktion zwischen Anbieter und Nachfrager einer Leistung.

Dabei genügt es nicht, bekannte Modellierungs- und Simulationstechniken aus der Produktentwicklung auf Dienstleistungen zu übertragen. Gefragt sind eigenständige Ansätze für Modellierungssprachen, die Berücksichtigung und Abbildung von »weichen« Faktoren im Modellierungsprozess sowie die Entwicklung theoretischer Modelle, die es erlauben, Handlungen und Entscheidungen in Wertschöpfungsnetzwerken abzubilden. Die Modellierung und Simulation von Dienstleistungen zielt folglich darauf ab, entlang von Wertschöpfungsprozessen Informationen so zu verdichten, dass daraus Handlungs- und Entscheidungsmuster abgeleitet werden können. Einer unserer Interviewpartner sprach davon, dass eine wesentliche Herausforderung darin liege, eine Art Computer Aided Design (CAD) zur virtuellen Entwicklung von Dienstleistungen und Dienstleistungssystemen zu schaffen.

Service Engineering: Mit dem Begriff »Service Engineering« ist es der deutschen Dienstleistungsforschung bereits gelungen, ein Forschungsthema international zu platzieren. Das haben die Foresight-Gespräche mit internationalen Experten bestätigt. Zwar sind heute die entsprechenden Referenzmodelle für Dienstleistungsentwicklungsprozesse in Wissenschaft und Wirtschaft weitgehend etabliert. In jüngerer Zeit haben sich jedoch die Anforderungen an die systematische Entwicklung von Dienstleistungen verändert.

So steht das »Service Engineering« vor der Aufgabe, geeignete Methoden, Vorgehensweisen und Instrumente für die integrierte Entwicklung von Produkt-/Dienstleistungskombinationen (»hybride Produkte«) zu entwickeln. Auch fehlen geeignete Instrumente, um die Entwicklung ästhetisch-emotionaler Aspekte im Entwicklungsprozess von Dienstleistungen zu berücksichtigen - sowohl im B2C- als auch im B2B-Umfeld. Zudem verändert der Einsatz neuer Technologien (insb. IKT) die Kommunikation und Interaktion mit dem Kunden.

Daraus ergeben sich weiterführende Forschungsfragen, z. B. die Gestaltung differenzierter Interaktions- und Kommunikationsschnittstellen betreffend. Auch sind Ansätze zur systematischen Einbindung des Kunden in sämtliche Phasen des Entwicklungsprozesses aus Sicht der Bearbeiter unzureichend entwickelt. Insgesamt lässt sich festhalten, dass das »Service Engineering« stärker darauf abzielen muss, eigenständige dienstleistungsspezifische Methoden, Instrumente und Vorgehensweisen zu entwickeln, die unterschiedlichen Typen von Dienstleistungen gerecht werden.

Online-Befragung

Für die Online-Befragung wurden die im Zuge der Experteninterviews identifizierten Forschungsthemen operationalisiert und einem erweiterten Expertenkreis zur Bewertung vorgelegt (vgl. Tabelle 14.2). Ergänzt wurde die Themenauswahl durch ein zusätzliches Themengebiet »Dienstleistungen als Wissenschaft«. Dies geschah vor dem Hintergrund der Diskussion um die Etablierung einer »Services Science« als eigenständige Dienstleistungswissenschaft, die im Verlauf des Foresight-Prozesses an Dynamik gewonnen hat.

Die Analyse der schriftlichen Befragungsergebnisse zeigt, dass alle Themengebiete hohe Relevanzwerte erzielen. Die Ergebnisse machen aber auch deutlich, dass allen Zukunftsthemen relativ kurze Forschungshorizonte zugeschrieben werden – d. h. die höchste Forschungsintensität wird bereits für die kommenden Jahre erwartet. Dies lässt darauf schließen, dass die Dienstleistungsforschung als Querschnittsthema von Einflussgrößen abhängig ist, die sich langfristig schwer bestimmen lassen. Ein anderer Erklärungsansatz wäre, dass die Befragten in fünf bis zehn Jahren bereits die Umsetzung der Zukunftsthemen als Herausforderung sehen.

Die größte Bedeutung wurde in der Online-Befragung den Zukunftsthemen **Entwicklung neuer Organisations- und Geschäftsmodelle, Dienstleistungsinnovation und Integration von Dienstleistungen und neuer Technologie** zugemessen. Diese drei genannten Zukunftsthemen erhalten auch hohe Zustimmungswerte bei der Einschätzung, ob sie die wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands unterstützen, sowie bei der Frage, ob sie dazu beitragen, die Lebensqualität der Menschen zu verbessern. Leichte Verschiebungen ergeben sich bei der Frage, welches Zukunftsthema wichtige Erkenntnisse für Wissenschaft und Technologie liefert. Hier steht »Modellierung und Simulation von Dienstleistungen« an erster Stelle; dahinter rangieren »Integration von Dienstleistungen und neuer Technologie« und »Service Engineering«.

Als elementarer Impulsgeber für andere Forschungsgebiete wird keines der sechs Zukunftsthemen im Zukunftsfeld angesehen. Dies ist aus Sicht von FhG ISI und IAO insofern wenig überraschend, weil der Gedanke, dass Dienstleis-

tungen die Entwicklung neuer Forschungsthemen vorantreiben, in der Öffentlichkeit (noch) nicht stark verbreitet ist. Bislang dominiert die umgekehrte Vorstellung, dass nämlich die Entwicklung neuer Forschungsfelder die Entwicklung neuer Dienstleistungen impliziert, um für neue technologische Möglichkeiten vermarktungsfähige Produkte und Leistungen zu entwickeln. Gleichwohl finden sich in der Online-Befragung und den Experteninterviews Anknüpfungspunkte, die darauf hindeuten, dass diese Sichtweise zu kurz greift und die Verknüpfung von Technologie und Dienstleistungen sich künftig stärker als Wechselbeziehung darstellen wird.

Zugleich sehen die Befragten spezifische Probleme und Innovationsbarrieren. Nachfolgend werden für die Top-3-Themen die wichtigsten Innovationsprobleme aufgeführt (aufgelistet nach Relevanz). Für die »Entwicklung neuer Organisations- und Geschäftsmodelle« sind dies nach Einschätzung der Experten fehlende Kompetenzen/Ausbildung, mangelnde Akzeptanz sowie fehlende Promotoren. Bei »Dienstleistungsinnovation« sind es unzureichende Forschungsinfrastruktur, fehlende Promotoren sowie fehlende Kompetenzen/ Ausbildung. Und schließlich werden für die »Integration von Dienstleistung und neuer Technologie« folgende Hauptprobleme genannt: fehlende Kompetenzen/Ausbildung, unzureichende Forschungsinfrastruktur und mangelnde Akzeptanz.

Abschließend lohnt ein Blick auf die offenen Kommentare der Online-Befragung. Dabei fällt auf, dass sich die Befragten mit den Themengebieten »Dienstleistung als Wissenschaft« und »Modellierung und Simulation von Dienstleistungen« relativ kritisch auseinandersetzen. Zwar finden sich auch für andere Themengebiete kritische Kommentare und Hinweise. Diese adressieren aber bestehende oder zu erwartende Forschungsdefizite, während die Themen »Simulation/Modellierung« und »Dienstleistung als Wissenschaft« von einzelnen Befragten selbst in Frage gestellt werden. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass es sich dabei um spezielle Themen handelt, die bislang nicht besonders prominent in der Dienstleistungsforschung verankert sind.

Monitoring-Panel zweite Welle

Die Monitoring-Interviews der zweiten Welle haben vor allem Erkenntnisse zu folgenden Punkten geliefert:

- Die aktuelle weltweite Finanzkrise zeigt, dass Unternehmen mit hohen Service-Anteilen (abgesehen von der Finanzwirtschaft) in der Regel wirtschaftlich besser dastehen als Unternehmen mit reiner Sachgutproduktion. Diese Entwicklung steht allerdings in einem eklatanten Widerspruch zu der Tatsache, dass nur wenige Unternehmen eigene Forschungs- und Entwicklungsabteilungen für Dienstleistungen unterhalten. Eine Herausforderung wird

deshalb darin gesehen, Unternehmen dazu zu bewegen, stärker in Dienstleistungsforschung zu investieren.

- Die Bedeutung der Integration von neuen Technologien und Dienstleistungen wird immer wichtiger. Dabei zeichnet sich ein Trend dahingehend ab, dass Dienstleistungen zum Treiber für neue Technologien werden. Ursache hierfür sind Veränderungen in der gesellschaftlichen Nachfrage, aber auch neue Geschäftsmodelle von Unternehmen. Nicht zu unterschätzen ist in diesem Zusammenhang die Debatte über ökologische Nachhaltigkeit, die dazu führt, dass vermehrt zyklusorientierte Geschäftsmodelle eingeführt werden, die einer Dienstleistungslogik folgen.
- Die wachsende Bedeutung von Dienstleistungen führt ferner dazu, dass Fragen der Qualifikation der Beschäftigten und des Human Ressource Managements für die Unternehmen, aber auch für ganze Volkswirtschaften, an Bedeutung gewinnen. Gefragt sind zunehmend Mitarbeiter, die technologisches und betriebswirtschaftliches Wissen vereinen und die Problemlösungen aus der Perspektive des Kunden entwickeln und umsetzen können. Dies stellt wiederum Anforderungen an die Ausgestaltung der Aus- und Weiterbildungssysteme.
- Trotz der internationalen Dynamik, die die aktuelle Diskussion um die Etablierung einer »Dienstleistungswissenschaft« im Sinne einer »Services Science« gegenwärtig entfaltet, bestätigen die Expertengespräche der zweiten Monitoring-Welle, dass (noch) kein Einverständnis darüber besteht, was genau unter einer »Dienstleistungswissenschaft« zu verstehen ist. Vor dem Hintergrund der Tatsache, dass die Etablierung einer Services Science in Deutschland primär Akteure des Ausbildungs- und nur sekundär Akteure des Forschungssystems betrifft, verzichten wir darauf, das Thema »Dienstleistung als Wissenschaft« im Weiteren als Zukunftsthema zu benennen.

Ausgewählte Zukunftsthemen

Am Ende des Such- und Rechercheprozesses stehen somit folgende Zukunftshemen (siehe Tabelle 14.2):

1. Dienstleistungsinnovation
2. Integration von Dienstleistungen und neuen Technologien
3. Entwicklung neuer Organisations- und Geschäftsmodelle
4. Modellierung und Simulation von Dienstleistungen
5. Service Engineering

14.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick

Die folgende Tabelle 14.2 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Zukunftsthemen im BMBF-Foresight-Prozess. **Themen nach 1. Recherche** sind die Themen aus den Prozessen der Fachreferate (sofern sie nicht aussortiert wurden, weil sie bereits auf der Forschungsagenda stehen) und aus der ersten Literaturanalyse. **Themen nach 1. Workshop** sind diejenigen Themen, die nach dem 1. Workshop besonders verfolgt werden sollten. **Themen Online-Befragung** sind in die Online-Befragung eingegangen, bedeuteten also eine weitere Zusammenfassung der Zwischenergebnisse, die in der Befragung bewertet wurden. Und die **Themen nach Kriterienfilter** sind bereits »Zukunftsthemen«, die in der letzten Phase des Prozesses untersucht wurden. Sie sind in der Regel sehr ähnlich den am Ende des BMBF-Foresight-Prozesses vorgeschlagenen Zukunftsthemen (siehe erste Tabelle dieses Kapitels). Durch letzte Recherchen und Experteninterviews sind jedoch noch einige Zukunftsthemen modifiziert worden.

Themen nach 1. Recherche	Themen aus 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Modellierung und Simulation von Dienstleistungen	**Kernbereich**	**Modellierung und Simulation von Dienstleistungen**	**Modellierung und Simulation von Dienstleistungen (in Modellierung)**
Service orientierte Architekturen (SOA)	Service Plattformen mit semantischen Integrations- und Service-Architekturen	Modellierung und Simulation von Dienstleistungsprozessen	
Modellierungssprachen und -systeme	Transformation Geschäftsmodelle	Modellierung und Simulation von Dienstleistungsinteraktionen	
Integriertes Produkt-/Dienstleistungsdatenmanagement	Service collaboration systems	Modellierung und Simulation von Dienstleistungsumgebungen	**Entwicklung hybrider Produkte (Produkt/ Service Kombinationen) (in PK2.0)**
Simulationstechniken und -modelle	Hybride Wertschöpfungsformen	Neue Modellierungstechniken und Modellierungssprachen	Rolle von Dienstleistungen bei Nachhaltigkeitsstrategien
	Transdisziplinäre Prozesse	Virtualisierung von Leistungsangeboten	
Rahmenbedingungen komplexer Service Systeme	Tranformationsfähigkeit von Organisationen	**Dienstleistung als »Wissenschaft«**	
Theoriebildung für Dienstleistungsinnovationen	Interaktive Wertschöpfung	Entwicklung neuer Dienstleistungsstudiengänge und Weiterbildungsangebote	
Empirische Fundierung	Modellierung und Simulation von Dienstleistungen	Stärkung der interdisziplinären Dienstleistungsforschung	
Erforschung von Stellhebeln der Dienstleistungsinnovation	Personalentwicklung	Erarbeitung der theoretischen Grundlagen für eine eigenständige akademische Disziplin »Services Science«	Dienstleistungen und neue Technologien
Optimierung von Humanressourcen, Arbeitsorganisation und Führungssystem	Service Education	Neue Kooperationsformen zwischen Dienstleistungsforschung und Unternehmen	Dienstleistungsinnovation
Entwicklung des Sozialmodells Deutschland	Service Engineering	Dienstleistungsspezifische Weiterentwicklung bestehender Disziplinen	
Transformation von Organisationsstrukturen und Geschäftsmodellen	Komplexitätsmanagement	**Entwicklung neuer Organisations- und Geschäftsmodelle**	
Erhöhung der Transformationsfähigkeit organisationaler Strukturen	Theorie für Dienstleistungsinnovationen	Entwicklung hybrider Produkte	
Förderung hybrider Wertschöpfungsformen		Entwicklung von Preis- und Erlösmodellen	

Themen nach 1. Recherche	Themen aus 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Förderung einer produktiven und zugleich flexiblen Dienstleistungserbringung (Dienstleistungsindustrialisierung)	**Schnittstellen**	Dienstleistungsspezifische Transformation der Wertschöpfungsprozesse in der Sachgutproduktion	
Service Design	Produktion als Service	Beschreibung und Entwicklungsmodelle zum Aufbau von Service-Kompetenzen	
Beschreibung von Funktionszusammenhängen	Dienstleistungsfabriken	Entwicklung »Serviceorientierter Architekturen« (SOA)	
Infrastrukturen für systematische DL-Innovationen	Service für Open Innovation Prozesse	**Integration von Dienstleistungen und neuer Technologie**	
Integriertes Management von Kundenerwartungen hybrider Produkte	Lab-on-Chip-Systeme	Automatisierung von Dienstleistungen	
	Neue Energiedienstleistungen, neue Geschäftsmodelle, dezentrale Energieversorgung	Individualisierung von Dienstleistungen	
	Mobilitätsdienstleistungen	Standardisierung von Dienstleistungen	
		Dienstleistungen als Treiber für die Technologieentwicklung	
		Vernetzung von Konsummustern und Produktionsprozessen durch den Einsatz neuer Technologien	
		Service Engineering	
		Entwicklung passgenauer Engineering-Konzepte für unterschiedliche Dienstleistungstypen	
		Entwicklung von Instrumenten für die systematische Entwicklung »hybrider« Produkte	
		Entwicklung und Gestaltung von Dienstleistungserlebnissen (Service Experience)	

Themen nach 1. Recherche	Themen aus 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
		Entwicklung neuer Kommunikationsschnittstellen Anbieter/Kunde	
		Entwicklung neuer Kooperationsformen zwischen Anbieter/Kunde	
		Dienstleistungsinnovation	
		Theoriebildung für Dienstleistungsinnovationen	
		Analyse von Wirkungszusammenhängen sozio-ökonomischer Rahmenbedingungen und Dienstleistungsinnovationen	
		Empirische Analyse von Dienstleistungsinnovationen	
		Entwicklung sozio-technischer Dienstleistungssysteme	
		Entwicklung von dienstleistungsspezifischen Methoden und Instrumenten	

Tabelle 14.2: Entstehung der Zukunftsthemen Services Science – Zwischenstände

14.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern

Das Zukunftsfeld Dienstleistungen und neue Wertschöpfungsformen weist als Querschnittsthema vielfältige Verbindungen und Überschneidungen zu anderen Zukunftsfeldern auf. Hervorzuheben sind Verknüpfungen zur Informationstechnik, zur Gesundheitsforschung sowie zur Energie- und Umfeldforschung. Die Potenziale des Zukunftsfeldes Dienstleistungen als Querschnittsthema können an zwei Beispielen verdeutlicht werden:

1. Bezüge zum Zukunftsfeld neuen Zuschnitts ProduzierenKonsumieren2.0: Neue Informations- und Telekommunikationstechnologien (IKT) und neue individuelle und soziale Bedürfnisse spielen eine Schlüsselrolle für die Entwicklung neuer Dienstleistungsangebote und verändern die Art und Weise, wie Dienstleistungen entwickelt, »produziert« und vermarktet werden. Dabei werden Standard-Dienstleistungen zunehmend automatisiert und Kunden durch neue Technologien stärker in den »Produktionsprozess« einbezogen (»self-services«). Zugleich findet eine Transformation der Dienstleistungsarbeit von transaktionsorientierten Tätigkeiten (Verkauf, Datenbearbeitung etc.) in Richtung interaktionsorientierte Tätigkeiten (individuelle Beratung etc.) statt. Die Dienstleistungsforschung liefert die Grundlage für die sozio-technische Systemgestaltung neuer Produktions- und Konsumformen.

2. Bezüge zum Zukunftsfeld Gesundheitsforschung: Ein wesentliches Kennzeichen des Gesundheitssystems der Zukunft findet sich in einer stärkeren Individualisierung medizinischer Versorgungsleistungen. Dies setzt voraus, dass der Patient eine pro-aktivere Rolle im »Wertschöpfungsprozess« einnimmt, z. B. indem er seine individuellen Gesundheitsdaten eigenständig pflegt bzw. sich in den Prozessen des Wertschöpfungssystems kompetent bewegt. Zugleich erfordert dies ein intensiveres Zusammenspiel aller Akteure im Dienstleistungssystem (Ärzte, Medizinproduktehersteller, Pflege etc.). Die Dienstleistungsforschung schafft die theoretischen und konzeptionellen Voraussetzungen für die Entwicklung solcher kooperativer Dienstleistungssysteme.

Abschließend sei darauf verwiesen, dass im Rahmen eines Vertiefungsworkshops die im Foresight-Prozess identifizierten Bezüge von Dienstleistungen zu neuen Technologien mit Vertreterinnen und Vertretern des BMBF diskutiert wurden. Dabei zeichnete sich ab, dass sich das Zukunftsfeld »Gesundheit« hervorragend dazu eignet, um exemplarisch aufzuzeigen, wie sozialer und technologischer Wandel durch innovative Dienstleistungen und Dienstleistungskonzepte vorangetrieben werden.

Themenkoordination:
Walter Ganz, IAO (walter.ganz@iao.fraunhofer.de) und
Bernd Bienzeisler, IAO (bernd.bienzeisler@iao.fraunhofer.de)

15 System- und Komplexitätsforschung

Die System- und Komplexitätsforschung befasst sich mit den Zusammenhängen und Wechselwirkungen in Systemen, insbesondere mit der Analyse, Entwicklung und Steuerung von Systemen sowie der Modellierung und Simulation ihres aktuellen und zukünftigen Verhaltens. Die Systemwissenschaft geht davon aus, dass gleiche Strukturen in verschiedenen Disziplinen auftreten, und ist eine disziplinenübergreifende Wissenschaft. Ihre Themen können aus komplexen Phänomenen aller Wissenschafts- und Lebensbereiche abgeleitet werden. Damit kann sie Ansätze und Werkzeuge zur disziplinenübergreifenden Bearbeitung von gesamtgesellschaftlichen Problemen bereitstellen. Dies können primär technische Probleme wie in der Materialforschung, Bio- und Nanotechnologie, oder primär sozial induzierte wie in der Demoskopie oder im Finanzsektor sein.

Inzwischen wird über nahezu alle Disziplinen von Wissenschaft hinweg, aber auch in Bereichen von Planung und Organisation, dem Paradigma des »Systems« gefolgt. Von traditionellen wissenschaftlichen Ansätzen unterscheiden sich systemische Ansätze dadurch, dass »an die Stelle geradlinig kausaler Erklärungen zirkuläre Betrachtungen treten und dass statt isolierter Objekte Relationen zwischen ihnen betrachtet werden« (Simon 2007: 13). Das Forschen nach »UR-Sachen« tritt gegenüber der Untersuchung von System-/ Umwelt-Relationen zurück. Im Hinblick auf die fokussierten Gegenstände bzw. Teilaspekte und die Positionierung der beobachtenden Instanz sowie diesbezügliche Forschungs- (bzw. disziplinäre) Traditionen lassen sich diverse Strömungen jeweiliger Forschung unterscheiden (z. B. allgemeine und soziologische Systemtheorie, Kybernetik, Komplexität-, Chaos- und Risikoforschung, Evolution u.v.m.).

15.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld System- und Komplexitätsforschung

System(theoret)ische Grundlagenforschung
Klärung von Fragen der Entstehung und Evolution von komplexen Systemen
Probleme der Systemgenerierung, -Gestaltung und Steuerung
Erkenntnisbezogene Verknüpfung von Theorieansätze a) physikal(ist)ischer (etwa: technische Kybernetik, Operations Research) sowie b) biolog(ist)ischer Tradition (bspw. Autopoiesis, Selbstorganisation, Kybernetik 2. Ordnung)
Diffusion des Systemparadigmas
Förderung der Vermittlung und Verbreitung von Systemansätzen sowie eines grundlegenden systemischen Verständnisses jenseits des Zukunftsfelds ‚System- und Komplexitätsforschung' im engeren Sinne
Betrachtung disziplinenübergreifender (d. h. sich inter- wie ggf. auch transdisziplinär vollziehender) Vernetzung bei systemischen Fragestellungen sowie entsprechend komplexer Sachverhalte

Leben, Wahrnehmung und Kommunikation
Beobachtungen des spezifischen Erkennens, Verarbeitens sowie ‚Verstehens' komplexer Phänomene (bzw. des Reagierens darauf), zu denen soziale, psychische, biotische (lebende) und ggf. technische (künstlich intelligente) Systeme in Wechselwirkung bzw. Abstimmung mit- und untereinander in der Lage sind bzw. befähigt werden (sollten)
Einbeziehung kognitiver Aspekte sowie von Intuition, Intentionalität bzw. Antizipation und von Verkörperung (‚Embodiment')
Formen, Darstellung und Repräsentation
Aspekte von Systemsprachen, Kodifizierung und Simulation als offenen Problemfeldern – Formen, Medien, Modi und Umgebungen der systemischen Darstellung und selektiven Beobachtung
Untersuchungen, wie für Umgebungen mit multiplen, verteilten Konstituenten zu Fragen heterogener Zeit(lichkeits)skalen bzw. von Asynchronizität konzeptionell umgegangen werden kann
Sicherheit und Risiko
Verständnis für nicht zu planende (bzw. vorzusehender) Effekte in natürlichen und artifiziellen Systemen
Erkennen von Anomalien und Kaskadeneffekte

Tabelle 15.1: Identifizierte Zukunftsthemen Systemforschung im Überblick

Im Hinblick auf aktuelle Literatur wie auch Statements von Experten ist festzuhalten, dass selbst zum System*begriff* universell anschlussfähige Konzepte weiterhin ausstehen bzw. diverse – u. a. disziplinär tradierte – Ansätze zur Erfassung des Begriffs parallel gebraucht werden. In der Zukunft scheint es notwendig, die parallel existierenden Definitionen und Konzepte in interdisziplinärer Weise zu entwickeln, vor allem im Hinblick auf selbst- und fremdorganisierte Systeme. Vor allem für transdisziplinäre Fragestellungen (in der Gegenwart und insbesondere in Zukunft) erscheint es geboten, die gegenseitige Übersetzbarkeit, Transformierbarkeit bzw. Konvertibilität deutlich zu verbessern (siehe auch Zukunftsfeld Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation).

Die folgenden Zukunftsthemen (siehe Tabelle 15.1) wurden als langfristig wichtig herausgearbeitet[40]. Diese wurden in Zukunftsfelder neuen Zuschnitts integriert und finden sich daher nicht in den Tabellen 1.1 bis 1.3).

System(theoret)ische Grundlagenforschung bezieht sich vor allem auf die Klärung von Fragen der Entstehung und der Evolution von komplexen Systemen. Diese Fragen betreffen vor allem Probleme der Systemgenerierung, -gestaltung und -steuerung. In diesem Zusammenhang ließen sich auch Möglichkeiten eruieren, um Theorieansätze in a) physikal(ist)ischer (etwa: technische Kybernetik, Operations Research) sowie b) biolog(ist)ischer Tradition (z. B. Autopoiesis, Selbstorganisation, Kybernetik zweiter Ordnung) erkenntnisbezogen fruchtbar miteinander zu verknüpfen.

40 Die dunkelgrau unterlegten Felder sind die Zukunftsthemen, die hellgrau hinterlegten einzelne, besonders wichtige Forschungsaufgaben.

Diffusion des Systemparadigmas meint insbesondere die - Förderung der - Vermittlung und Verbreitung von Systemansätzen sowie eines grundlegenden systemischen Verständnisses jenseits des Zukunftsfelds System- und Komplexitätsforschung im engeren Sinne. Hierzu gehört auch die Betrachtung disziplinenübergreifender (d. h. sich inter- wie ggf. auch transdisziplinär vollziehender) Vernetzung bei systemischen Fragestellungen sowie entsprechend komplexer Sachverhalte.

Leben, Wahrnehmung und Kommunikation bezieht sich auf Beobachtungen des spezifischen Erkennens, Verarbeitens sowie »Verstehens« komplexer Phänomene bzw. des Reagierens darauf. Hierzu sind soziale, psychische, biotische (lebende) und ggf. technische (künstlich intelligente) Systeme in Wechselwirkung bzw. Abstimmung mit- und untereinander in der Lage oder sollten dazu befähigt werden. Von besonderem Interesse ist dabei die Einbeziehung kognitiver Aspekte sowie von Intuition, Intentionalität bzw. Antizipation und der Verkörperung (»Embodiment«).

Daran schließt das Zukunftsthema **Formen, Darstellung und Repräsentation** an, in dem – etwa im Hinblick auf Aspekte von Systemsprachen, Kodifizierung und Simulation als offenen Problemfeldern – Formen, Medien, Modi und Umgebungen der systemischen Darstellung und selektiven Beobachtung zu erforschen bzw. zu entwickeln sind. Erst auf diese Weise werden komplexe Phänomene der Lebenswelt analytisch zugänglich und ggf. technisch, besonders informationstechnisch virtualisiert, handhabbar. Darunter könnten auch Untersuchungen fallen, wie für Umgebungen mit multiplen, verteilten Konstituenten zu Fragen heterogener Zeit(lichkeits)skalen bzw. von Asynchronizität konzeptionell umgegangen werden kann.

Das Thema **Sicherheit und Risiko** greift den Bedarf nach einem besseren Verständnis nicht zu planender oder vorauszusehender systemischer Effekte auf. Dies betrifft das Erkennen von Anomalien und Kaskadeneffekten.

Diese Zukunftsthemen wurden in das Zukunftsfeld neuen Zuschnitts »Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation« integriert, weil sie in Diskussionen als dort besser verortet angesehen wurden.

15.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen

Start des Prozesses und Foresight-Workshop 2007

Für den Foresight-Workshop 2007 wurde eine erste Literatursichtung vorgenommen. Auf dieser Basis starteten die Diskussionen.

Die Ergebnisse des Workshops wurden in Form einer Mindmap visualisiert und strukturiert. Die Experteninterviews im Rahmen der ersten Welle des Monitorings für den BMBF-Foresight-Prozess dienten sowohl der Validierung der bereits eruierten Themenschwerpunkte als auch ihrer weiteren Detaillierung. Zusätzliche Entwicklungen in Forschung und Technologie in frühen Entstehungsphasen konnten durch weitere Recherchen ermittelt werden.

In dem Auftaktworkshop des Projekts 2007 insistierten Experten, dass besonders für Phänomene, in denen »bio-psycho-kogno-techo«-System-Interferenzen konstruktiv zu lösen sind, auch heute weiterhin beträchtlicher Transfer- und spezifischer Anpassungsbedarf für generische Konstrukte aus den Systemforschungscommunities (i.w.S.) in Richtung spezifischer Anwendungsfelder besteht. »Die Systemforschung als eine auf interdisziplinäre Integration gerichtete Wissenschaft soll helfen, Vorgänge in der Wirklichkeit in ihren Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen zu erfassen, um diese dadurch besser zu verstehen, nachahmen und beherrschen zu lernen.« (Sommerlatte 2002, S. 3; Sommerlatte 2006, S. 6f.). In ähnliche Richtung kritisiert Malik (2003) aktuelle, sehr theoretische Diskussionen zur Systemforschung als wenig hilfreich, sowohl für Praktiker als auch für die Weiterentwicklung der Wissenschaft (Malik 2003, S. 5ff.).

Dabei beobachtet man häufig Phänomene, deren Bestandteile als gegeben angenommen werden (Black Box). Solche Systeme können in ihrem Verhalten nicht erklärt werden, wenn man sie isoliert von ihrer Umwelt betrachtet. Sie können nicht zum Gleichgewicht gelangen, sondern sind nur fern vom Gleichgewicht zu beobachten (vgl. Mainzer 1999; Mainzer 2004).

In der Komplexitätsforschung stellt sich generell die Frage nach den Ursprüngen der Ordnung bzw. nach den Treibern und Bestimmungsfaktoren der Selbstorganisation, um das Leben an sich, aber auch die Emergenz von neuen Ideen, zu verstehen (Weaver 1947; Bar-Yam 1997; Baecker 2002; Haken 1999, Kauffman 1993). Diese Fragestellungen sind in vielen unterschiedlichen Fachdisziplinen, z. B. der Evolutionsbiologie, noch vollkommen ungelöst. Hieran ist zu erkennen, dass es in verschiedenen Disziplinen fachspezifische Probleme im Kontext komplexer Systeme gibt, die auch in der Zukunft theoretischer Bearbeitung bedürfen. Allerdings würde eine spezialisierte Aufteilung in ganz unterschiedliche Teildisziplinen zum Nachteil der Forschung gereichen. Ein gewisser Universalismus müsste gewahrt werden. Als erstrebenswert gilt die Entwicklung einer »Universal Science of Complexity« (Gallagher/ Appenzeller 1999, S. 79).

Zukünftige Herausforderungen werden bisweilen ferner in der Forschung zur Erreichung eines gemeinsamen Verständnisses bzw. einer Definition eines eigenen anwendungsorientierten Forschungsfeldes gesehen sowie in einer Erforschung von Phänomenen der Selbstorganisation, Emergenz etc. »The Field of

Complex systems must direct its flight from wonder toward discoveries that make the wonderful and complex understandable and simple.« (Simon 1996, S. 1; Haken 1999; Miller/ Page 2007, S. 4) »Theory is crucial. Serendipity may occasionally yield insights, but is unlikely to be a frequent visitor. Without theory we make endless forays into unchartered badlands.« (Holland 1995, S. 5; Malik 2003, S. 5ff.)

Die angewandte System-, Komplexitäts- und Chaosforschung wird dabei in ganz unterschiedlichen Kontexten genutzt. Ob bei der Entwicklung so genannter Hirnschrittmacher, der Mustererkennung in vielen Bereichen, der Ausbreitung von SARS oder der weitergehenden Planung von Schutzmaßnahmen. Von daher sind hier auch Beiträge zur Sicherheitsforschung zu erwarten (vgl. Fu 1982, S. 2f.; Haken 1999; Duda, Hart/ Stork 2001, S. 1f.; Bishop 2006, S. 2f.; Theodoridis/Koutroumbas 2006, S. 1f.; Frick 2006, S. 98f.).

Vor allem die an den Auftaktworkshop und die Literaturrecherche angeschlossenen Experteninterviews sowie die Online-Befragung (siehe Tabelle 15.2) haben den Handlungsbedarf im Hinblick auf System-, Komplexitäts-, Chaos- u. a. Forschung aufgezeigt. Neuere wissenschaftliche Entwicklungen wie auch Expertenstatements lassen erkennen, dass in der Entwicklung (innovativer) Applikationen unter Einbezug von Schlüssel- und konventionellen Technologien, mit denen globalen Problemen (vgl. Klima, Energie, Ernährung, Gesundheit) begegnet werden soll, jeweilige Phänomene nur noch – bezogen auf traditionelle Strukturen – systemisch, also transdisziplinär (vgl. auch Nano-Bio-Info-Cogno-Konvergenz), bearbeitet werden können.

Erarbeitung von Zukunftsthemen innerhalb des Zukunftsfeldes

Für die Befragung wurden, anknüpfend an die Ergebnisse des ersten Workshops, des Monitorings sowie an weitere Interviews, Aspekte aufgegriffen, die sich an vier Themengebieten orientieren:

Systembegriff und -konzepte: Sowohl Recherchen in aktueller Literatur als auch Experten- und Expertinnenmeinungen ergaben, dass universell anschlussfähige Konzepte zum Systembegriff selbst weiterhin ausstehen bzw. diverse (z. B. disziplinär tradierte) Ansätze parallel angewandt werden. Vor allem scheint eine stärkere Vermittlung von (und zwischen) Systemansätzen über disziplinäre Grenzen hinweg notwendig und geboten.

Systemerkennung und -wiedererkennung: Hier sind Fragen nach den Umständen zu behandeln, die Phänomene als systemisch konstituiert bzw. formal kohärent erscheinen und so beobachten lassen. Erkennung berührt dabei Aspekte des Auftretens bzw. Unterscheidens von Gestalten oder Mustern, ihrer Emergenz oder Immergenz (Kollaps bzw. Verschwinden). Dies berührt einerseits

Fragen des Erkennens und Erfassens von Mustern in diversen Auflösungen, der Konvergenz (vgl. Disziplinen- bzw. Technologienkonvergenz), der Emergenz oder Immergenz (Kollaps bzw. Verschwinden) und andererseits der Berücksichtigung und des Einflusses multipler verteilter Beobachter (bzw. Intelligenz) für Systembeobachtungen.

Systemrepräsentation: Hierzu gehören Ansätze, Methoden und Verfahren, mit denen sich System- bzw. Netzwerk- oder Verbundverhalten und Eigenschaften erfassen und darstellen sowie Konzepte veranschaulichen und testen lassen. Insbesondere im Hinblick auf dissipative Strukturen wird großer Forschungsbedarf für die (z. B. experimentelle) Modellierung und Simulation gesehen. In diesem Untersuchungsbereich werden Möglichkeiten, Methoden und Verfahren zu behandeln sein, mit denen sich System- bzw. Netzwerk- oder Verbundverhalten und Eigenschaften erfassen, Konzepte veranschaulichen und testen lassen.

Systemische Applikation: Sie betreffen den Transfer und Re-Transfer systemischer Erkenntnisrahmen in bzw. aus konkreten Forschungs- und Entwicklungsfeldern. Dieser Bereich eruiert alle Applikationen des systemischen Ansatzes bei der Erfassung und Analyse konkreter Probleme (einschließlich spezifischer Adaption des Ansatzes).

Online-Befragung

Die vier genannten übergeordneten Themenlassen sich jeweils anhand einer Anzahl von Unterthemen fokussieren. Für die Online-Befragung wurden in diesen Themengebieten Forschungsaufgaben formuliert und zur Diskussion gestellt. Dort wurde die Relevanz aller ausgewählten Themen als hoch bis sehr hoch eingeschätzt. Die höchste Forschungsintensität wird laut Interviews und Online-Befragung größtenteils längerfristig (in etwa 10 bis 15 Jahren), zumindest aber mittelfristig (in 5 bis 10 Jahren) erwartet. Die Einschätzung der im Durchschnitt 30 bis 40 Antwortenden aus der Befragung ergab, dass Fortschritte in Anwendungsfeldern erst in relativ ferner Zukunft, Erfolge bei der Klärung von Grundlagenfragen, Definitionen und Konzepten dagegen eher mittelfristig erwartet werden – was die Frage bei den Experten aufkommen ließ, ob die Bereitschaft zu institutionen- und disziplinenübergreifender Kollaboration in der Forschung zu optimistisch bewertet wurde.

Die Befragung hat dazu geführt, die Themengebiete in fünf Zukunftsthemen zu überführen, die den BMBF-Kriterien entsprechen. Um diese unterschiedlichen Ergebnisse besser interpretieren zu können, wurden auch freie Kommentare aus der Online-Befragung in Betracht gezogen. Fünf Zukunftsthemen aus den besonders relevanten und mittel- bis längerfristig eingeschätzten Forschungsaufgaben der Online-Befragung konnten geclustert werden:

- System(theoret)ische Grundlagenforschung
- Diffusion des Systemparadigmas in Forschung und Entwicklung
- Leben, Wahrnehmung und Kommunikation
- Formen, Darstellung und Repräsentation
- Sicherheit und Risiko

Monitoring-Panel zweite Welle – Validierung der Ergebnisse

Im Rahmen der zweiten Monitoring-Welle wurden die bei der Online-Befragung als besonders relevant beurteilten Zukunftsthemen zur Diskussion gestellt. Die Experten bestätigten übereinstimmend die besondere Relevanz der ausgewählten Themen und schätzten die Zeit der höchsten Forschungsintensität in vergleichbarem Rahmen ein.

Besonders »System(theoret)ische Grundlagenforschung« und »Diffusion des Systemparadigmas in Forschung und Entwicklung« versprechen entscheidenden Erkenntnisgewinn in der Zukunft. Die zunehmende Komplexität in Forschung und Wissenschaft verlangt nach neuen Perspektiven und Herangehensweisen bei der Entwicklung und Verbesserung der Systeme und Strukturen.

Von neuen Forschungsergebnissen in den genannten Schwerpunktthemen können somit vor allem andere Forschungsgebiete profitieren. Darüber hinaus ist aus Sicht der Panelmitglieder langfristig ein erheblicher positiver Einfluss auf die wirtschaftliche Entwicklung zu erwarten, da Erkenntnisse der System- und Komplexitätsforschung auch in wirtschaftlichen Modellen Anwendung finden. Neue Perspektiven für Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodelle sind zu erwarten.

Besondere Beachtung wurde in der zweiten Monitoring-Welle dem Thema der Simulation zuteil. Der Einsatz neuer Computertechnologien ermöglicht beispielsweise eine verbesserte Simulation bzw. den Einsatz ganz neuer Simulationsmethoden. Im Hinblick auf die Diffusion von systemischen Ansätzen und Verständnissen werden wesentliche Defizite gesehen. Simulationen und Modelle können hierbei Einsichten in komplexe Zusammenhänge geben und das Verständnis fördern. Dabei sollten Simulationsverfahrensentwicklungen und ihre Anwendungen nicht losgelöst voneinander betrieben werden. Die Förderung sollte sich in Zukunft auf die Unterstützung von interdisziplinären Forschungsansätzen fokussieren.

Das Santa Fe Institute ist hierfür ein gutes Beispiel. Das Zusammenbringen von Forschern mit verschieden gelagerten Fragestellungen, die unterschiedliche

(komplementäre) Methoden bereitstellen können, kann zu fruchtbaren Ergebnissen führen. Es wurde vor allem auf die Potenziale der Übertragung von Methoden in andere Forschungsfelder hingewiesen und auf generische Fragestellungen, die sich in ggf. verschiedenen Disziplinen wiederfinden lassen. Ideen und Techniken sowie Methoden sind nach Einschätzung der Experten durchaus übertragbar. Dies sollte dann allerdings von Forschungsförderern initiiert bzw. zumindest stimuliert werden, da disziplinäre Grenzen wohl als historisch tradiert, gegenstandsbezogen, so die Aussagen der Experten, aber trotzdem weitgehend willkürlich angesehen werden. Zu diesem Themenkomplex siehe auch das Zukunftsfeld neuen Zuschnitts Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation.

Als weiterhin erwünscht erweist sich die Etablierung einer »kohärenten Theorie komplexer Systeme«, die nach Ansicht der Experten fehlt. In diesem Zusammenhang wären auch die Diskussionen zu interdisziplinären Fragestellungen wie »Robustheit, Adaptation und Dezentralisierung« einzubeziehen. Das Ziel sollte die Fähigkeit zum Design robuster komplexer Systeme sein. Simulationsexperimente, insbesondere induktive Ansätze, sollten unterstützen und über alle Skalen hinweg unternommen werden, während die traditionelle mathematische Modellierung (Formalisierung) skalenspezifisch operiert und daher eher deduktive Ansätze umzusetzen hilft.

15.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick

Die folgende Tabelle 15.2 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Zukunftsthemen im BMBF-Foresight-Prozess. **Themen nach 1. Recherche** sind die Themen aus den Prozessen der Fachreferate (sofern sie nicht aussortiert wurden, weil sie bereits auf der Forschungsagenda stehen) und aus der ersten Literaturanalyse. **Themen nach 1. Workshop** sind diejenigen Themen, die nach dem 1. Workshop besonders verfolgt werden sollten. **Themen Online-Befragung** sind in die Online-Befragung eingegangen, bedeuteten also eine weitere Zusammenfassung der Zwischenergebnisse, die in der Befragung bewertet wurden. Und die **Themen nach Kriterienfilter** sind bereits »Zukunftsthemen«, die in der letzten Phase des Prozesses untersucht wurden. Sie sind in der Regel sehr ähnlich den am Ende des BMBF-Foresight-Prozesses vorgeschlagenen Zukunftsthemen (siehe erste Tabelle dieses Kapitels). Durch letzte Recherchen und Experteninterviews sind jedoch noch einige Zukunftsthemen modifiziert worden.

Themen nach 1. Recherche	Themen aus 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Nichtlineare Dynamik	**Kernbereich**	**Systembegriff und -konzepte**	**System(theoret)ische Grundlagenforschung**
Simulationen	Systemansätze in jedem Feld	Vermittlung von Systemansätzen untereinander (konzeptionelle Interfaces)	(weitere Themen übergegangen in Modellierung und Komplexität)
Komplexität	Modellierung und Simulation	Systemsprache; Beschreibungsstrategien, -formen und -mittel	
Kybernetik (1. und 2. Ordnung)	Sicherheit als Anwendungsbeispiel	Wechselwirkungen zwischen beobachteten Phänomenen und Erwartungen beschreibbar machen	
Angewandte Chaosforschung	**Schnittstellen**	Diffusion von Systemansätzen und -konzepten	
Emergenz	Stochastische Auslegung von Bauteilen	Entstehen von neuen Themen in Wissenschaft und Forschung (Emergenz auf Makro-Ebene)	
Systeme	Konvergenz der Naturwissenschaften	Anwendungsorientierte Systemforschung	
Netzwerke	Risikoforschung und Management	Transdisziplinäre Vernetzung zur Ergründung systemischer Zusammenhänge	
	Modellierung komplexer Energiesysteme	Collective Intelligence	
	Steuerung komplexer Systeme, Komplexitätsreduktion	Holistisches System-Verständnis	
	Komplexitätsmanagement für Service-Systeme	Entstehung und Evolution von komplexen Systemen	
		Systemerkennung und -wiedererkennung	
		Konstituierung von Systemen	
		Individuelles Erkennen und Verarbeiten	
		Intuition	
		Systeme und multiple verteilte Beobachter (Mensch, Maschine)	

Themen nach 1. Recherche	Themen aus 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
		Embodiment	
		Konzeptuelle Rezeption von Systemverhalten und Grenzen	
		Systemrepräsentation	
		Kodifizierung/Formalisierung/Modellierung und Simulation von systemischen Phänomenen	
		Konzepte für die Nutzung und Deutung von virtuellen Systembefunden (aus Modellen und Simulationen)	
		Bewältigen von Sinnüberschüssen in und aus Datenrepositorien (bspw. IT) in multiplen Kontexten	
		Simulation von Konzeptionen multipler Raum- und Zeit-Schemata	
		Organic Computing	
		System(ische) Applikation	
		Auslegung, Entwicklung und Betrieb von (heterogenen) Netzen sowie Fragen der Wechselwirkungen zwischen diesen	
		Kaskadeneffekte und Simulation (multiple Systeme und Skalen)	
		Anomalieerkennung, Pro- und Reaktionskonzepte und Ursachenforschung	
		Konkrete Abschätzungen von systemisch und sozio-technisch bedingten Risiken und Folgen	
		Behandlung von Raum- und Zeitaspekten, bspw. nicht linearen Dynamik und multiple Skalen	

Themen nach 1. Recherche	Themen aus 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
		Neue, virtuelle und »bessere« Realitäten und Wahrnehmung	
		Detektion »neuer« Anwendungsfelder	
		Immunsystem von Gesellschaften	
		Interventionen in nicht triviale Systeme	
		Vermittlung eines systemischen Verständnisses	
		Systemgenerierung	
		Systemgestaltung	
		Systembegriff und -konzepte	
		Vermittlung von Systemansätzen untereinander (konzeptionelle Interfaces)	
		Systemsprache; Beschreibungsstrategien, -Formen und -Mittel	
		Wechselwirkungen zwischen beobachteten Phänomenen und Erwartungen beschreibbar machen	
		Diffusion von Systemansätzen und -konzepten	
		Entstehen von neuen Themen in Wissenschaft und Forschung (Emergenz auf Makro-Ebene)	
		Anwendungsorientierte Systemforschung	
		Transdisziplinäre Vernetzung zur Ergründung systemischer Zusammenhänge	

Tabelle 15.2: Entstehung der Zukunftsthemen System- und Komplexitätsforschung – Zwischenstände

15.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern

Aktuelle Beobachtungen der Entwicklungen in diversen - vielfach globalen - Problemfeldern (vgl. Klima, Energie, Ernährung, Gesundheit, politische und Finanzkrisen) legen nahe, dass Lösungsversuche in traditionellen disziplinären Strukturen der Wissenschaft und akademischen Professionen häufig scheitern müssen, weil sie unterkomplex sind. Die zumeist komplexen Netzwerkrelationen sind in einfacher Weise nicht zu vermitteln. Gerade hier sind konkrete Anwendungsbezüge für die System- und Komplexitätsforschung nicht zuletzt bei der Verfolgung von Fragen zu erwarten, wie sie die übergreifenden Foresight-Zukunftsfelder neuen Zuschnitts »ProduzierenKonsumieren2.0«, »Zukunftsfähige Lebensräume« sowie »Mensch-Technik-Kooperationen« aufwerfen.

Es gibt Anzeichen, dass sich Organisationen über die Ausgestaltung gesellschaftlicher (z. B. wirtschaftlicher) Rahmenbedingungen stimulieren lassen: Vor allem die NSF (USA) versucht, den Austausch zwischen und das Zusammenwachsen von Disziplinen voranzutreiben (Roco/ Bainbridge 2003, Bainbridge/ Roco 2006, Schunn et al. 2006). Auch Ito (2007) weist auf eine ganze Reihe an internationalen Aktivitäten zur Konvergenzforschung hin. Neben jenen der NSF (USA) gibt es auch seitens der EU Forschungsaktivitäten zum Thema »Converging Technologies«. Vor allem die NSF gibt dabei Schätzungen für Zeithorizonte an, z. B. könne bis 2020 erreicht sein, dass »all kinds of machines and structures will be constructed of materials having desired properties.« (Ito 2007, S. 81) Allerdings: Hinsichtlich solcher Industriekonvergenz würde man eher einem aktuellen Mega-Trend folgen (Bröring 2007, S. 318, siehe aber auch: Service 1999, S. 80). Grenzen beim Zusammenführen von traditionell spezialisierten Fachdisziplinen bzw. der Erreichung eines gemeinsamen Verständnisses über traditionelle Perspektiven hinweg zeigen sich z. B. auch in Deutschland. Sommerlatte (2006) weist darauf hin, dass die Forschung in Deutschland noch stark fachspezifisch organisiert ist und die Forscher isoliert (in den Fachdomänen) arbeiten. Ziel sollte es sein, durch systemische Denkansätze die Spezialisierungsfalle zu überwinden (Canton 2007, S. 71; Sommerlatte 2002, S. 13).

Es gibt bereits Forschungen zu der Entstehung und Entwicklung von komplexen, intelligenten Organisationen und der Weiterentwicklung des Internets mit dem Ziel der stärkeren Vernetzung von Akteuren und der systemisch ganzheitlichen Betrachtung von Problemen (Panellist Heylighen). Dies erscheint unabdingbar zur Lösung aktueller Forschungsfragen. In Bezug auf das Thema »collective intelligence«, also der Kommunikation von vielen Akteuren über entsprechende Medien wird das Phänomen »stigmergy« am Beispiel der Selbstorganisation von Termiten und Ameisen untersucht.

Oben skizzierte Explorationsrichtungen werden einerseits in Kontexten jener Disziplinen zu verfolgen sein, die sich - wie traditionelle naturwissenschaftliche oder techn(olog)ische Grundlagenforschung - notwendigerweise in thematisch »vertikal« spezialisierter Detaillierung entwickeln. Einer der Panellisten weist ausdrücklich auf die fehlende Etablierung einer »coherent theory of complex systems« hin. In diesem Zusammenhang wären auch die Diskussionen zu Fragestellungen wie »Robustness, Adaptation and Decentralization« zu fördern bzw. einzubeziehen. Im Hinblick auf die Diffusion von systemischen Ansätzen und Verständnissen werden wesentliche Defizite gesehen. Simulationen und Modelle können hierbei Einsichten in komplexe Zusammenhänge geben und das entsprechende Verständnis fördern. Das Ziel sollte die Fähigkeit zum Design robuster komplexer Systeme sein. Dies kann nach Ansicht von Prof. Miller vor allem dadurch erreicht werden, dass unterschiedliche Disziplinen miteinander in Interaktion treten und die Grenzen zwischen den Disziplinen minimiert werden.

Ein zukünftiges Forschungsgebiet für die Sicherheitsforschung liegt in der besseren konzeptionellen Integration wissenschaftlich-technischen Fortschritts und jeweils relevanter geistes- und sozialwissenschaftlicher Forschung bei der Entwicklung von nachhaltigen Lösungsangeboten für gesellschaftlich relevante Probleme, wobei deren Betrachtung primär unter (sozial)-systemischen Perspektiven erfolgen sollte. Zusätzlich kann die Komplexitätsforschung helfen, Szenarien zur Reaktion von Systemen zu entwickeln, um Kaskadeneffekte besser verständlich zu machen.

Themenkoordination:
Dr. Daniel J. Koch, ISI (daniel.koch@isi.fraunhofer.de) und
Matthias Stabe, IAO (matthias.stabe@iao.fraunhofer.de)

16 Wasser-Infrastrukturen

Sich verändernde Umweltbedingungen erfordern in wachsendem Maße auch eine erhöhte Anpassungsfähigkeit und Sicherheit von Wasser-Infrastruktursystemen. Die klassische Unterteilung erfolgt in Siedlungswasserwirtschaft (Wassergewinnung und Aufbereitung, Stadtentwässerung und Abwasserreinigung) und Wasserbau (Hochwasserschutz, Wasserenergiegewinnung und Flussbau).

Dank dem Einsatz wassersparender Technologien in Haushalten und Industrie/ Gewerbe ist der Pro-Kopf-Wasserverbrauch stark rückläufig, was eine Anpassung der Technologie und langfristig auch der Systeme (insbesondere der Rohrleitungen) erfordert. Rückläufige Bevölkerungszahlen, die einige Regionen besonders stark betreffen, erfordern flexible Systeme, ggf. dezentrale oder semidezentrale Strukturen. Bestehende Systeme haben Optimierungspotenziale, die durch verbesserte Möglichkeiten in der Simulation und neue Messtechnik, Sensorik, Steuer-, Regel- und Monitoring-Technologie ausgeschöpft werden können. Ein Querschnittsthema zur Energie ist die Verbesserung der Energieeffizienz von Anlagen.

Die Steigerung der Reinigungsleistung lässt sich zukünftig durch neue Verfahrenskonzepte (Stoffstromtrennung, Anaerobbehandlung) realisieren. Zusätzlich wird an weiter gehenden Reinigungsverfahren zur Entfernung von Spurenstoffen gearbeitet. Abkopplung und dezentrale Versickerung von Regenwasser entlastet zum einen die Infrastrukturen im Bereich von Kanal und Kläranlage, hilft aber auch bei der Hochwasservermeidung und wird dadurch zu einem wichtigen Querschnittsthema beider Wasserbereiche. Die Hochwasserrisikoabschätzung und die Steuerung von Bauwerken zum Schutz vor Hochwasser (Talsperren, Polder) sind wichtige Themen im Wasserbau.

16.1 Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Wasser-Infrastruktursysteme

Nutzung der im Abwasser enthaltenen Ressourcen
Nährstoffrückgewinnung
anaerobe Abwasserbehandlung
Biogasgewinnung/ -nutzung
Wärmerückgewinnung aus Grauwasser oder Abwasser
Abwasserbrennstoffzelle
Integration von Stadt- und Infrastrukturplanung

Flexible Wasser-Infrastruktursysteme
Modulare Systeme,
(semi-)dezentrale Systeme
Dezentrale Zwischenspeicherung von Starkniederschlägen
Kanalsysteme mit flexiblem Durchfluss
Adaption der Wasser-Infrastruktur an den demographischen Wandel und den Klimawandel
Wasserwiederverwendung
Wassereffiziente Bewässerungsverfahren
Virtuelles Wasser
Mikroschadstoffe
Risikobewertung der Infrastruktur unter veränderten Bedingungen
Neue Versorgungskonzepte und ihre Finanzierungsstruktur
unterschiedliche Wasserqualitäten (fit for purpose)
Anpassung der Aufbereitung an die Nutzung
Kontrollierte Trinkwasserzapfstellen
Ersatz von Wasser durch andere Medien

Tabelle 16.1: Identifizierte Zukunftsthemen Wasser-Infrastruktursysteme im Überblick

Im Rahmen der Experten-Workshops, Einzelinterviews und Literaturrecherchen wurden klimatische Veränderungen, demografischer Wandel und Ressourcenverknappung als maßgebend für das Zukunftsfeld der Wasser-Infrastrukturen identifiziert. Die identifizierten Zukunftsthemen wie sie in Tabelle 16.1 dargestellt werden[41], sollen daher eine Anpassung ermöglichen.

16.2 Auswahlprozess der Zukunftsthemen

Start des Prozesses und Foresight-Workshop 2007

Auf der Suche nach potenziellen Zukunftsthemen für das Themengebiet Wasser-Infrastrukturen (anfangs noch »Infrastrukturen« genannt) wurde zunächst eine nationale und internationale Recherche aktueller Fachliteratur sowie eine Internetrecherche der für das Jahr 2008 angekündigten nationalen und internationalen Fachtagungen durchgeführt. Hieraus wurden neue Themen sowie Themen von großer Wichtigkeit, die potenziell langfristiger Forschung bedürfen, extrahiert und als Startthemen in einer Mindmap (hier tabellarisch dargestellt, siehe Tabelle 16.2) festgehalten.

Wasserver-/ Abwasserentsorgung
Technologien zur Wasseraufbereitung/ Abwasserbehandlung - Anaerobtechnologie - Separations-/ Filter technologie

41 Die dunkelgrau unterlegten Felder sind die Zukunftsthemen, die hellgrau hinterlegten einzelne, besonders wichtige Forschungsaufgaben.

	- Entfernung von Mikroschadstoffen - Hygiene - Hochselektive Membranwerkstoffe - AOP- und Entsalzungsverfahren - Nährstoffrückgewinnung - Behandlungsverfahren für (Abwasser-) Teilströme - flexible Systeme - Modulare, dezentral einsetzbare Aufbereitungssysteme - Energierückgewinnung aus Abwasser - Energieautarkie der Aufbereitungsprozesse - dezentral/zentral
MSR-Technik	- Fernablesungs- und Remote-Control Technologien - on-line und in-situ Sensor-/Messtechnik
Rohrleitungssysteme	- Infrastrukturkanalsysteme - Anpassungsfähige Rohrsysteme - Dichtheits-/ Zustandsüberwachung - Robotergestützte Sanierungs-, Modernisierungs-, Bauverfahren
Hochwasserschutz, -vermeidung Niedrigwasser	- Systeme zum Regenrückhalt, Versickerungssysteme
Sicherheit/Versorungssicherheit	- Sicherheit gegen Terrorismus, Sabotage und natürliche Katastrophen und Unfälle
Systemadaption	- Adaption im Zusammenhang mit dem demographischen Wandel - Adaption an Klimawandel - Wasserqualität (fit for purpose) - Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser - Energierückgewinnung aus Abwasser - Substitutionsmöglichkeiten von Wasser bei bestimmter Nutzung (Löschmittel) - wassereffiziente Bewässerungstechnik/Verfahren - Wassereffizienz
Abfall	
Energieversorgung	
siehe AG Energie	
Carbon Capture Storage	
Verkehrsinfrastruktur	
siehe AG Mobilität	
IuK-Infrastruktur	
siehe AG IKT	

Tabelle 16.2: Themen Wasser-Infrastruktursysteme im ersten Foresight-Workshop 2007

Die Themen wurden in einem Kurzpapier erläutert und mit einer Einladung zu einem Workshop an sieben Experten verschickt. Im Verlauf des Workshops wurde die Mindmap ergänzt und die Themen auf ihre Relevanz sowie den langfristigen Forschungsbedarf hin, zum Teil kontrovers diskutiert. Im Anschluss an die Diskussion fand eine Bewertung der Themen hinsichtlich ihrer Relevanz als zukünftiges Forschungsthema statt.

Großen Forschungsbedarf sahen die Experten bei dezentralen Systemen. Aus diesem Grund wurden diese in die weitere Befragung aufgenommen. Weiterhin wurde das Thema Adaption an demografischen und Klimawandel als sehr wichtiges und langfristiges Forschungsthema bewertet und daher als potenzielles Zukunftsthema eingestuft. Lediglich die Dichtheit von Kanälen wurde als bereits erforscht aussortiert.

Im Anschluss an den Workshop wurden die als Forschungsthemen und wichtige Themen identifizierten Themen einer tiefer gehenden nationalen und internationalen Recherche unterzogen. Ständig wurde weiter nach neuen Zukunftsthemen recherchiert.

Monitoring-Panel – erste Welle

Im Frühjahr 2008 wurden die Interviews mit den Panellisten durchgeführt. Auf Basis dieser Interviews wurde die Mindmap durch neue, potenzielle Zukunftsthemen ergänzt. Das Thema Wasserwiederverwendung ist besonders im trockenen Australien von zukünftig wachsender Bedeutung. Die internationale Recherche bestätigte selbst für einige Gebiete Europas und vor allem für China diese Einschätzung. Wasserwiederverwendung wurde daher als Zukunftsthema eingestuft. Kreislaufführung und die dezentrale Wiedergewinnung und Nutzung von im Wasser/Abwasser vorhandenen Ressourcen (Energie, Nährstoffe) wurden in die Reihe potenzieller Zukunftsthemen aufgenommen.

Aus den im Workshop und in den Panel-Interviews identifizierten und durch nationale und internationale Recherche verifizierten Themengebieten wurden vier für die Online-Befragung ausgewählt und mit zugehörigen Forschungsfragen zur Diskussion gestellt (siehe Tabelle 16.3).

- Nutzung der im Abwasser enthaltenen Ressourcen
- Flexible Wasser-Infrastruktursysteme
- Adaption der Wasser-Infrastruktur an den demografischen Wandel und den Klimawandel (siehe DWA 2008)
- Unterschiedliche Wasserqualitäten (fit for purpose)

Die jeweilige Beantwortung der Frage nach verschiedenen Aspekten (Relevanz, Wichtigkeit für Wirtschaft, Wichtigkeit für die Lebensqualität usw.) ermöglichte die Auswahl der wichtigsten Zukunftsthemen.

Die Auswahl dieser Themengebiete wurde durch die Angaben der Befragten bestätigt, die alle Themengebiete etwa ähnlich mit einer Relevanz von wichtig bis sehr wichtig einstuften. Abbildung 8: Bewertung der Zukunftsthemen in der Online-Befragung zeigt die Themengebiete mit den drei höchsten Relevanz-

werten und ihre beiden jeweils als besonders relevant eingeschätzten Forschungsfragen.

Die Flexibilität und die Adaption von Wasser-Infrastrukturen bewerteten die Befragten als förderlich für die wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands. In beiden Fällen sei die Forschungsrelevanz über die kommenden zehn Jahre hinaus besonders wichtig. Da die Wassertechnologie in Deutschland weltweit zu den führenden gehört und die rasche Umsetzung globaler Entwicklungsziele (z. B. »Millennium Development Goals«) dringlich ist, bietet sich eine immense Chance für den Technologieexport in Schwellen- und Entwicklungsländern. Die Standortanpassung von Technologien und die Umsetzbarkeit »integrativer« Technologien stellen dabei große Herausforderungen und damit ein wichtiges Forschungsfeld dar – auch in Anbetracht des Ziels, die Lebensqualität der jeweils ansässigen Bevölkerung dauerhaft zu verbessern.

Der Forschungsschwerpunkt wird nach Ansicht der Befragten für alle Themengebiete innerhalb der nächsten zehn Jahre liegen. Diese Einschätzung mag darauf zurückgehen, dass die Aufgaben, die es in der Wasserwirtschaft zu lösen gilt, weitgehend bekannt sind und mit der Umsetzung vieler Ziele bereits begonnen wurde (z. B. »Millennium Development Goals«, EU-Wasserrahmenrichtlinie), wenngleich gerade aus den Erfahrungen bei der Umsetzung immer wieder neuer Anpassungs-, Forschungs- und Förderungsbedarf hervorgeht. Allerdings zeichnet sich ein Trend ab, dass Befragte mit hoher Fachkenntnis die höchste Forschungsintensität zeitlich eher früh ansiedeln, während Befragte mit geringerer Fachkenntnis die forschungsintensivste Phase etwas weiter in der Zukunft sehen.

Generell werden Themen, die mit einer radikalen Änderung des bestehenden Systems einhergehen (Flexibilität, Anpassung von Systemen), von Befragten mit hoher Fachkenntnis eher mit später Forschungsintensität verbunden. Da es sich dabei zumeist nicht um längere Prozesse handelt, bei denen eine Vielzahl von Wechselwirkungen berücksichtigt werden muss, entspricht diese Einschätzung den Erwartungen. Dies trifft auch auf die Forschungsaktivität innerhalb der Forschungsfrage Integration der Stadt- und Infrastrukturplanung zu, deren Schwerpunkt von vielen Experten ebenfalls innerhalb des etwas längeren Zeitraums von 11 bis 15 Jahren gesehen wird.

Interessant ist, dass die **Nutzung der im Abwasser enthaltenen Ressourcen** nach Meinung der Befragten als wichtigster Impulsgeber für andere Forschungsgebiete zu sehen ist. Auch erwarten die Befragten aus diesem Themengebiet die meisten Erkenntnisse für Wissenschaft und Technologie. Diese Einschätzung ist wahrscheinlich durch die Tatsache begründet, dass in diesem Themengebiet viel physikalische und chemische Prozesskenntnis erworben und Verfahrenstechnik erforscht werden muss und es um die Produktion von Stof-

fen geht. In den klassischen Ansätzen zur Wasser-Infrastruktur geht es hingegen viel mehr um neue Konzepte und neue Möglichkeiten durch eine Weiterentwicklung anderer Technikbereiche.

Auch an **flexiblen Wasser-Infrastrukturen** besteht großes Interesse. Deutliche Schwankungen im Abfluss, die beispielsweise durch saisonal, klimatisch oder demografisch bedingt unterschiedliche Auslastungen entstehen, sind für das Unterhalten der Kanalisation, den Betrieb von Abwasserbehandlungsanlagen wie auch für die Sicherung der Wasserqualität problematisch. Eine Möglichkeit, Durchflussunregelmäßigkeiten aufzufangen, ist der Einsatz modularer Systeme, die je nach Erfordernis flexibel zu- oder abgeschaltet werden können.

(Semi-)Dezentrale Infrastrukturen können dank ihres kleinräumigeren Radius dazu beitragen, solche Probleme zu entschärfen. Experten und Expertinnen stufen die (Semi-)Dezentralen Systeme in der Online-Befragung als wichtigste Forschungsfrage dieses Themengebietes ein. Bezogen auf klimatische Faktoren können dezentrale Systeme auch zur Zwischenspeicherung von Starkniederschlägen eingesetzt werden. Befragte, die eine mittlere Fachkenntnis angeben, bewerten z. B. Systeme zur Zwischenspeicherung von Starkniederschlägen als gegenwärtig wichtigste Forschungsfrage unter den flexiblen Wasser-Infrastruktursystemen.

Einig sind sich die Befragten, dass alle Themengebiete relevant für die Verbesserung der Lebensqualität der Menschen sind. Der Anpassung von Wasser-Infrastrukturen an äußere Veränderungen wird entsprechend das größte Wirkungspotenzial beigemessen. Diese Einschätzung ist darauf zurückzuführen, dass aus einer verbesserten Anpassungsfähigkeit der Wasser-Infrastruktur in der Regel eine Verbesserung der Wasserqualität (Trinkwasser, Abwasser, Oberflächengewässer) folgt. Dies geht wiederum unmittelbar mit einer erhöhten Lebensqualität einher.

Insgesamt weichen die Antworten der Befragten trotz unterschiedlicher Fachkompetenz nicht stark voneinander ab. Die »Communities« der teilnehmenden Personen sind vorwiegend im Bereich Wasserversorgung und Abwasserentsorgung sowie Umweltschutz und Hochwasserschutz zu finden. Dies kann aus den Anmerkungen und ergänzten Themengebieten abgeleitet werden.

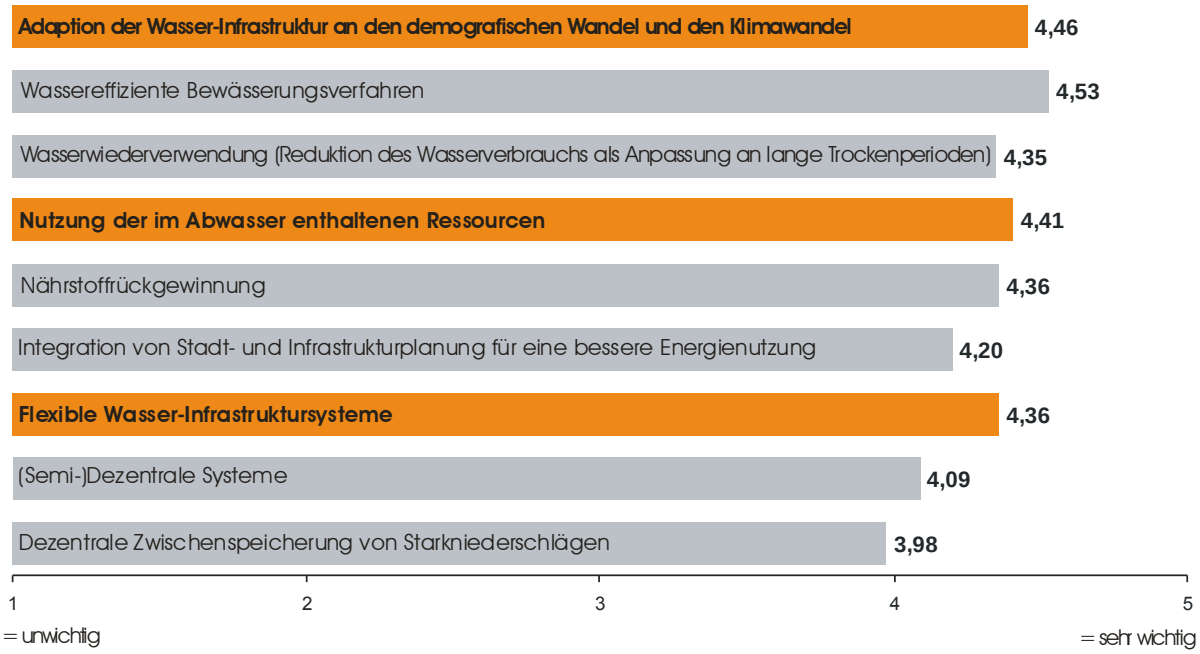

Abbildung 8: Bewertung der Zukunftsthemen in der Online-Befragung

Monitoring-Panel – zweite Welle

Ein Jahr nach dem ersten Interview gab es ein zweites Panel-Interview, in dem die Ergebnisse der Online-Befragung diskutiert und wiederum nach neuen Themen gefragt wurde. Es ergaben sich keine neuen Themen. Die als Zukunftsthemen ausgewählten Themen sind aktuell und bedürfen langfristiger Forschungsaktivitäten. Es wurde darauf hingewiesen, dass die Umsetzung von Innovationen in der Praxis Forschung bedarf, da gerade die momentane Marktsituation Wasser/Abwassersektor ein Hemmnis für Innovationen darstellt.

Als **Ergebnis der Suche** nach Zukunftsthemen im Zukunftsfeld Wasser-Infrastrukturen bleiben die in der Online-Befragung hoch bewerteten Themen aktuell (Tabelle 16.3). Bis auf die Integrierte Planung waren alle Themen bereits in der Start-Mindmap enthalten. Die Zukunftsthemen im Bereich der Wasser-Infrastrukturen waren also sehr eindeutig.

Alle Zukunftsthemen sind internationale Themen. Unterschiede gibt es besonders beim Grad der Technisierung. Während in Entwicklungs- und Schwellenländern häufig Low-tech-Varianten für dünn besiedelte Gebiete zum Einsatz kommen, werden in Industrieländern High-Tech-Lösungen entwickelt, die auch für stark besiedelte Räume geeignet sind. Technologieentwicklung findet demnach hauptsächlich in Industrieländern statt und wird dann in den meisten Fällen im Rahmen von Entwicklungsprojekten in Entwicklungsländern eingeführt.

Da in Entwicklungsländern noch keine Infrastruktur vorhanden ist, ist die Möglichkeit, Innovationen umzusetzen, besser als in Industrieländern. Zudem ist hier der Innovationsdruck durch extreme klimatische Bedingungen häufig noch höher als in Deutschland. Ein hohes Innovationspotenzial bieten »Megacities«. Hier ist der Bedarf an Infrastruktur immens. Die Randbedingungen sind in diesen Städten schwierig, herkömmliche Technologie ist nicht adäquat.

International ist die Computersimulation ein verbreitetes Forschungsthema im Bereich der Wasser-Infrastrukturen, wird aber im Rahmen des Foresight-Prozesses nicht als Zukunftsthema angesehen, da das Innovationspotenzial und der wirtschaftliche Nutzen, der sich aus dieser Forschung ergibt, als gering eingeschätzt wird. Auch machte die Literaturrecherche deutlich, dass viele Arbeiten zu wasserchemischen und hygienischen Forschungsansätzen vorliegen. Diese Forschung ist jedoch sehr speziell. Für ein Zukunftsthema fehlt diesen Ansätzen die breite Anwendbarkeit.

16.3 Entstehung der Zukunftsthemen im Überblick

Die folgende Tabelle 16.3 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Zukunftsthemen im BMBF-Foresight-Prozess. **Themen nach 1. Recherche** sind die Themen aus den Prozessen der Fachreferate (sofern sie nicht aussortiert wurden, weil sie bereits auf der Forschungsagenda stehen) und aus der ersten Literaturanalyse. **Themen nach 1. Workshop** sind diejenigen Themen, die nach dem 1. Workshop besonders verfolgt werden sollten. Die Tabelle 16.2 im vorangegangenen Abschnitt ist der auf dem Workshop bearbeitete Stand und damit zwischen den Themen nach erster Recherche und den Themen nach dem ersten Workshop anzusiedeln. **Themen Online-Befragung** sind in die Online-Befragung eingegangen, bedeuteten also eine weitere Zusammenfassung der Zwischenergebnisse, die in der Befragung bewertet wurden. Und die **Themen nach Kriterienfilter** sind bereits »Zukunftsthemen«, die in der letzten Phase des Prozesses untersucht wurden. Sie sind in der Regel sehr ähnlich den am Ende des BMBF-Foresight-Prozesses vorgeschlagenen Zukunftsthemen (siehe erste Tabelle dieses Kapitels). Durch letzte Recherchen und Experteninterviews sind jedoch noch einige Zukunftsthemen modifiziert worden.

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
Technologien zur Wasseraufbereitung/ Abwasserbehandlung	**Kernbereich**	**Nutzung der im Abwasser enthaltenen Ressourcen**	**Nutzung der im Abwasser enthaltenen Ressourcen**
Anaerobtechnologie	Wasser (wassersparende Bewässerungsverfahren, modulare/dezentrale Wasseraufbereitungssysteme, Wasserhygiene, Entfernung Mikroschadstoffe, zentral vs. dezentrale Wasser-Infrastruktur, Fernüberwachung, Mikroverfahrenstechnik)	Anaerobe Abwasserbehandlung mit Biogasgewinnung/-nutzung	Nährstoffrückgewinnung
Separations-/Filtertechnologie	Infrastruktursynergien	Wärmerückgewinnung aus Grauwasser oder Abwasser	Anaerobe Abwasserbehandlung
Entfernung von Mikroschadstoffen	Flexible anpassbare Systeme	Abwasserbrennstoffzelle	Biogasgewinnung/ -nutzung
AOP- und Entsalzungsverfahren	Demand-Response-Forschung (Kosteneffizienz, Verhaltensbeeinflussung, integrierte Prognose, integrale Bewertung, Anpassungsszenarien)	Integration von Stadt- und Infrastrukturplanung für eine bessere Energienutzung	Wärmerückgewinnung aus Grauwasser oder Abwasser
Nährstoffrückgewinnung	Umweltrelevanzprüfung	Nährstoffrückgewinnung	Abwasserbrennstoffzelle
Behandlungsverfahren für (Abwasser-) Teilströme	**Schnittstellen**	**Flexible Wasser-Infrastruktursysteme**	Integration von Stadt- und Infrastrukturplanung
Modulare, dezentral einsetzbare Aufbereitungssysteme	Integrierte Versorgungssysteme und Netze	Einsatz modularer Systeme	**Flexible Wasser-Infrastruktursysteme**
MSR-Technik	Sicherung Energietransportzweige: Virtuelle Kraftwerke	(Semi-)Dezentrale Systeme	Modulare Systeme,
Fernablesungs- und Remote-Control Technologien	Globale Stromnetze	Dezentrale Zwischenspeicherung von Starkniederschlägen	(semi-)dezentrale Systeme
on-line und in-situ Sensor-/ Messtechnik	Energieoptimierung Gesamtsystem inklusive Haus und Mobilität (Elektroauto)	Kanalsysteme mit flexiblem Durchfluss	Dezentrale Zwischenspeicherung von Starkniederschlägen
	Bulk-Biomaterialien mit langer Lebensdauer (z. B. Gentech-Holzhaus, Holzautobahn, Rapsölasphalt)		Kanalsysteme mit flexiblem Durchfluss
			Adaption der Wasser-Infrastruktur an den

Themen nach 1. Recherche	Themen nach 1. Workshop	Themen Online-Befragung	Themen nach Kriterienfilter
			demographischen Wandel und den Klimawandel
Systemadaption		**Adaption der Wasser-Infrastruktur an den demografischen Wandel und den Klimawandel**	Wasserwiederverwendung
Sicherheit gegen Terrorismus, Sabotage und natürliche Katastrophen		Risikobewertung der Infrastruktur unter veränderten Bedingungen	Wassereffiziente Bewässerungsverfahren
Adaption im Zusammenhang mit dem demographischen Wandel		Neue Versorgungskonzepte und ihre Finanzierungsstruktur	Virtuelles Wasser
Adaption an Klimawandel		Mikroschadstoffe	Mikroschadstoffe
Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser		Wasserwiederverwendung (Reduktion des Wasserverbrauchs als Anpassung an lange Trockenperioden)	Risikobewertung der Infrastruktur unter veränderten Bedingungen
Energierückgewinnung aus Abwasser		Wassereffiziente Bewässerungsverfahren	Neue Versorgungskonzepte und ihre Finanzierungsstruktur
Rohrleitungssysteme		Virtuelles Wasser	
Infrastrukturkanalsysteme		**Unterschiedliche Wasserqualitäten (fit for purpose)**	**unterschiedliche Wasserqualitäten (fit for purpose)**
Anpassungsfähige Rohrsysteme		Anpassung der Aufbereitung an die Nutzung	Anpassung der Aufbereitung an die Nutzung
Dichtheits-/ Zustandsüberwachung		Kontrollierte Trinkwasserzapfstellen	Kontrollierte Trinkwasserzapfstellen
Robotergestützte Sanierungs-, Modernisierungs-, Bauverfahren		Ersatz von Wasser durch andere Medien	Ersatz von Wasser durch andere Medien
Hochwasserschutz, -vermeidung			
Systeme zum Regenrückhalt, Versickerungssysteme			

Tabelle 16.3: Entstehung der Zukunftsthemen Wasser- Infrastruktursysteme – Zwischenstände

16.4 Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern

Das Zukunftsfeld Wasser-Infrastrukturen startete mit einem breiten Infrastruktur-Ansatz. Um aber auch anderen Aspekten zukünftiger Lebensräume gerecht zu werden, wurde das Feld aufgeteilt, sodass weiterhin nur die Wasser-Infrastrukturen betrachtet wurden und ein Zukunftsfeld neuen Zuschnitts hinzukam: Zukunftsfähige Lebensräume.

Für das Zukunftsfeld Wasser-Infrastrukturen wurde bereits auf dem Experten-Workshop das Zukunftsfeld Nanotechnologie als wichtigstes Bezugsthema identifiziert. Besonders für die in verschiedenen Aufbereitungsverfahren immer häufiger eingesetzten Membranen ist die Nanotechnologie ein Innovationstreiber.

Dass der Bereich Gesundheit eine Verbindung zum Zukunftsfeld Wasser-Infrastrukturen hat, ist so naheliegend, dass man diesen Bezug schon fast nicht mehr bedenkt. Die Versorgung mit sauberem Wasser ist die Grundlage der Infrastruktur, so wie sauberes Wasser die Grundlage für eine gute Gesundheit ist. In der aktuellen Forschung sind die Mikroschadstoffe ein Überschneidungsbereich beider Forschungsgebiete.

Ein drittes für das Gebiet Wasser-Infrastrukturen wichtiges Zukunftsfeld ist Services Science. Neue Contracting-/Betreibermodelle bzw. Geschäftsmodelle sind ein aktuelles Thema in der Wasser-Infrastruktur. Ein neues Verständnis als Dienstleister ist bei den Ver- und Entsorgungsunternehmen zu etablieren und auszubauen, sodass neue Geschäftsmöglichkeiten (z. B. der Verkauf von Wasser unterschiedlicher Qualitäten) die Wirtschaftlichkeit der Unternehmen erhalten bzw. erhöhen.

Die dezentrale Wasser-Infrastruktur hat einen engen Bezug zur (dezentralen) Energiewirtschaft. Innerhalb von dezentralen Wasser-Infrastruktursystemen ist es möglich, Stoffströme zu trennen und Teilströme in die Energieerzeugung einzuleiten. Ein Beispiel ist die Verwertung von Schwarzwasser und organischen Abfällen in (ebenfalls dezentralen) Biogasanlagen. Die dort erzeugte Energie kann im dezentralen System wiederum zum Betrieb von Wasser-Infrastrukturen eingesetzt werden (Aufbereitungsanlagen, Vakuumkanalisation o. a.).

Bezüge zu anderen Zukunftsfeldern ergeben sich überdies bei der Adaption der Wasser-Infrastrukturen. Gerade bei der Anpassung an den Klimawandel wird die Frage des »virtuellen Wassers« immer bedeutender werden. Diese Frage ist nicht allein durch angepasste Wasser-Infrastrukturen lösbar, sondern muss mit einer standortangepassten Agrarwirtschaft und -politik einhergehen. »Virtuelles Wasser« (auch »latentes Wasser«) bezeichnet die Wassermenge, die als tatsächlich verbrauchte Menge für die Produktion von landwirtschaftlichen oder

industriellen Gütern, einschließlich aller notwendigen Vorprozesse, anfällt. Der Ausdruck wurde in den 1990er-Jahren von dem Geografen John Anthony Allan geprägt. Mit der Bilanzierung befasst sich u. a. das Institute for Water Education der UNESCO (UNESCO-IHE). Bisher wird bei der Bilanzierung von virtuellem Wasser in aller Regel lediglich die Menge des verbrauchten Wassers betrachtet, ohne die Herkunft und die im Anschluss an den Produktionsprozess vorhandene Wasserqualität zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist bisher keine weitergehende Implementierung in politische oder unternehmerische Strategien oder eine andere Form der Umsetzung von Erkenntnissen aus der Bilanzierung virtuellen Wassers erfolgt (siehe auch Smolka, 2008).

Bis auf das Zukunftsfeld Neurowissenschaften konnte zu allen Zukunftsfeldern ein Bezug gefunden werden. Da die Wasser-Infrastrukturforschung anwendungsorientiert ist, war die Vielzahl der Verbindungen zu anderen Themen zu erwarten. Fortschritte in anderen Forschungsgebieten führen aber nicht von selbst zu Fortschritten in der Wasser-Infrastruktur. Die Integration neuer Erkenntnisse in bisherige Verfahren oder sogar die Entwicklung ganz neuer Systeme bedarf nach Auffassung der Themenkoordinatoren eigener Forschungsprogramme, in die im besten Falle Fachleute jener Bereiche, aus denen Innovationen kommen (z. B. Nanotechnologie), integriert werden.

Themenkoordination:
Jana von Horn, ISI (jana.von.horn@isi.fraunhofer.de)

Literatur

Aarts, E.; Encarnaçao, J. L. (Hrsg.) (2005): True Visions: The Emergence of Ambient Intelligence. Berlin, Heidelberg: Springer.

Abdeldayem, H.; Frazier, D. O. (2007): Optical computing: Need and challenge. In: Communications of the ACM 50, Nr. 9, S. 60-62.

Akademiengruppe Altern in Deutschland (2009): Gewonnene Jahre: Empfehlungen der Akademiengruppe Altern in Deutschland. Band 9. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH.

Aono, M.; Hara, M.; Aihara, K. (2007): Amoeba-based neurocomputing with chaotic dynamics. In: Communications of the ACM 50, Nr. 9, S. 69-72.

Bacon, D.; Leung, D. (2007): Toward a World with Quantum Computers. In: Communications of the ACM 50, Nr. 9, S. 55-59.

Bainbridge, M.S.; Roco, M.C. (2006): Managing Nano-Bio-Info-Cogno Innovations. Converging Technologies in Society, Springer, Dordrecht (NL), 2006.

Baker, G.; Danquah, S.; Flack, J.; Jackson, A.; McDougall, C.; Scurry, A.; Yarrington, M. (2006): Intelligent Infrastructure Futures. Project Overview, Office of Science and Technology (Hrsg.), London: Department of Trade and Industry.

Bar-Yam, Yaneer (1997): Dynamics of complex Systems, Addison-Wesley, Reading, 1997.

Beckert, Bernd; Roloff, Nils, Friedewald, Michael (2006): R&D Trends in Converging Technologies. Deliverable 1.3 of the CONTECS Project. August: Fraunhofer ISI, Online: www.contecs.fraunhofer.de.

Bishop (2006): Pattern Recognition and Machine Learning, Springer.

BMBF (2006): Bernstein Zentren – Forschung für die Zukunft. Bonn, Berlin: BMBF. Online: http://www.bmbf.de/pub/bernsteinzentren_hirnforschung.pdf

BMBF (2009): 20 Gewinner im BMBF-Wettbewerb „Gesundheitsregionen der Zukunft" URL: http://www.gesundheitsforschung-bmbf.de/de/1979.php

BMBF; Schulenburg, M. (2005). Einsteins unverhoffte Erben – Quanteninformationstechnologie. Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung.

Bröring, Stefanie (2007): Die frühe Innovationsphase im Kontext von Konvergenz, in: Herrstatt, Cornelius/Verworn, Birgit (2007): Management der frühen Innovationsphasen, Gabler, Wiesbaden, 2007, S. 317-338.

Butter, M.; Rensma, A.; van Boxsel, J. et al. (2008): Robotics for Healthcare. Final report for the European Commission, DG Information Society. Brussels.

Canton, James (2007): The extreme Future: The Top Trends that will reshape the world in the next 20 years, Plume, London, 2007.

Capgemini (2007): Regenerationstechnologien für Medizin und Biologie – Beiträge für ein strategisches Förderkonzept.

Chong, C. Y.; Kumar, S. P. (2003): Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges. In: Proceedings of the IEEE 91, Nr. 8, S. 1247-1256.

Dazzi, F.; Horwood, N.J. (2007): Potential of mesenchymal stem cell therapy. In: Current Opinion in Oncology 19(6), S. 650-655.

De Silva, A. P.; Uchiyama, S. (2007): Molecular logic and computing. In: Nature Nanotechnology 2, Nr. 7, S. 399-410.

Dehof, A. K., Lenhof, H.-P., Hildebrandt, A., Hoffmann, H. & Jochem, R. (2009). BALLView-VR: Wirkstoffentwicklung als Virtual Reality Anwendung mit Multi-Touch Displays. Poster im Rahmen der Foresight-Tagung des BMBF in Bonn.

Dohmen, G. (2001): Das informelle Lernen: Die internationale Erschließung einer bisher vernachlässigten Grundform menschlichen Lernens für das lebenslange Lernen aller. Bonn: BMBF Publik.

Duda, Richard O.; Hart, Peter E.; Stork, David G. (2001): Pattern Classification, second Edition, John Wiley, New York, 2001.

EFI (Expertenkommission Forschung und Innovation) (2009): Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit. Berlin: Expertenkommission Forschung und Innovation.

Ezziane, Z. (2006): DNA computing: applications and challenges. In: Nanotechnology 17, Nr. 2, S. R27-R39.

Fejtová, M.; Figueiredo, L.; Novák, P. et al. (2009): Hands-free interaction with a computer and other technologies. In: Universal Access in the Information Society 8, Im Erscheinen.

Foster, I.; Kesselman, C.; Tuecke, S. (2001): The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations. In: International Journal of High Performance Computing Applications 15, Nr. 3, S. 200–222.

Frick, Frank (2006): Formeln für alles, in: Bild der Wissenschaft, 3, 2006, S. 98-99.

Fu (1982): Syntactic Pattern Recognition and Applications, Prentice-Hall.

Gallagher/Appenzeller 1999, Beyond Reductionism, Science, 2 April 1999, Vol. 284. no. 5411, S. 79.

Gesundheitsforschungsrat (GFR) des BMBF (2007): Roadmap für das Gesundheitsforschungsprogramm der Bundesregierung.

Grünwald, H. (2006): Perspektiven eines CO_2- und Emissionsarmen Verkehrs - Kraftstoffe und Antriebe im Überblick (Vorstudie zum TA-Projekt), Berlin: Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB).

Grünwald, R. (2006): Perspektiven eines CO^2- und emissionsarmen Verkehrs- Kraftsstoffe und Antriebe im Überblick. Vorstudie zum TA-Projekt, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim deutschen Bundestag (TAB) – Forschungszentrum Karlsruhe (Hrsg.), Berlin.

Guadagno, R. E. & Allmendinger, K. (2008): Virtual collaboration in immersive and non-immersive virtual environments. In S. Kelsey & K. St.Amant (Eds.), *Handbook of Research on Computer Mediated Communication* (S. 401-410). Hershey: Information Science Reference.

Haken (1999): Die Selbstorganisation komplexer Systeme, Picus Verlag GmbH.

Häring, J.; Legler, H.; Heine, C. et al. (2007): Informations- und Kommunikationstechnologien in Deutschland: Innovationsindikatoren zur IuK-Wirtschaft und Einsatz von IuK als Querschnittstechnologie. Studien zum deutschen Innovationssystem 19-2007. Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung. www.technologische-leistungsfaehigkeit.de

Holland, John H. (1995): Hidden Order: How Adaption Builds Complexity, Addison-Wesley, Reading, 1995.

Hüsing, B., Hartig, J.; Bührlen, B.; Reiß, T.; Gaisser, S. (2008): Individualisierte Medizin und Gesundheitssystem. TAB Arbeitsbericht Nr. 126. Berlin.

Ising, H.; Maschke, C. (Hrsg.) (2000): Beeinträchtigung der Gesundheit durch Verkehrslärm. http://www.aefusch.de/literatur/laerm.pdf

Ito, Yuko (2007): Trends in Policies for Promoting Converging Technologies Expected to bring Innovation, in: Quarterly Review, No. 24, July 2007, S. 81-90.

ITRS (2008): International Technology Roadmap for Semiconductors, 2008 Update. Austin, TX: SEMATECH. http://public.itrs.net.

John, M. (2006): Semantische Technologien in der betrieblichen Anwendung: Ergebnisse einer Anwenderstudie. Bericht an das Bundesministerium für Bildung und Forschung. Berlin: Fraunhofer-Institut für Rechenarchitektur und Softwaretechnik (FIRST).

Jonoska, N. (2004): Trends in computing with DNA. In: Journal of Computer Science and Technology 19, Nr. 1, S. 98-113.

Kauffman, Stuart A. (1993): The Origins of Ordern, Self-Organization and Selection in Evolution, Oxford University Press, New York, 1993.

King, J. (2007): The King Review of Low Carbon Cars. Part I: the Potential for CO^2 Reduction, London: HM Treasury.

Kirchmeyer, S. (2006): Polymer electronics - between materials and processes. In: Nachrichten Aus Der Chemie 54, Nr. 10, S. 971-977.

Kornbluh, R. (2004): Dielectric elastomer artificial muscle for actuation, sensing, generation and intelligent structures. In: Materials Technology 19, S. 216-224.

Krämer, N. C. (2008). Soziale Wirkungen virtueller Helfer: Gestaltung und Evaluation von Mensch-Computer-Interaktion. Stuttgart: Kohlhammer.

Letan, V.; Keen, B. (2007): Interactive Content and Convergence: Implications for the Information Society. A Study for the European Commission, DG Information Society and Media. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.

Linnhoff-Popien, C.; Strang, T. (2007): [Special issue on location and context awareness]. In: Personal and Ubiquitous Computing 11, Nr. 6.

Lusch, Robert F. / Vargo, Stephen L. (Hg.) (2006): The Service-Dominant Logic of Marketing. Digalog, Debate and Directions. Armonk: M.E. Sharpe.

Mainzer, Klaus (1999): Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Geselslchaft, in Mainzer, Klaus ,(Hrsg.) (1999): Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Geselslchaft, Springer, 1999, S. 3-28.

Mainzer, Klaus (2004): Thinking in Complexity: The computational Dynamics of Matter, Mind and Mankind, Springer, 2004.

Malik, F. (2003): Strategie des Managements komplexer Systeme, Bern 2003.

Malwitz-Schütte, M. (2006): Lebenslanges Lernen (auch) im Alter? Selbstgesteuertes Lernen, Medienkompetenz und Zugang zu Informations- und Kommunikationstechnologien älterer Erwachsener im Kontext wissenschaftlicher Weiterbildung. In B. Schmidt (Hrsg.): Bildungsforschung, Schwerpunkt „Bildung Älterer" (Jahrgang 3, Ausgabe 2). URL: http://www.bildungsforschung.org/Archiv/2006-02/lebenslang/

Markowitsch, H. J.; Welzer, H. (2005): Das autobiographische Gedächtnis. Hirnorganische Grundlagen und biosoziale Entwicklung. Stuttgart: Klett-Cotta.

McCormick, T.; Martin, K.; Hehenberger, M. (2007a): Advancing the utility of imaging biomarkers: Insights from the second Imaging Biomarker Summit, Without place: IBM Institute for Business Value.

McCormick, T.; Martin, K.; Hehenberger, M. (2007b): The evolving role of biomarkers: Focusing on patients from research to clinical practice, without place: IBM Institute for Business Value.

McKinsey (2008): Pathways to a Low Carbon Economy. Verxsion 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve.

Miller, John H.; Page, Scott E. (2007): Complex adaptive system – An introduction to computational models of social life, Princeton University Press, Princeton, 2007.

Mitcheson, P. D.; Green, T. C.; Yeatman, E. M.; Holmes, A. S. (2004): Architectures for Vibration-Driven Micropower Generators. In: IEEE Journal of Electromechanical Systems 13, Nr. 3, S. 429-440.

Monyer, Hannah; Rösler, Frank; Roth, Gerhard et al. (2004): Das Manifest. Elf führende Neurowissenschaftler über Gegenwart und Zukunft der Hirnforschung. In: Gehirn und Geist 6/2004, S. 30-37.

Nathan, A.; Chalamala, B. R. (2005): [Special Issue on Flexible Electronics Technology, Part 2: Materials and Devices]. In: Proceedings of the IEEE 93, Nr. 8, S. 1391-1510.

O'Brien, D. C.; Zengl, L.; Le-Minh, H. et al. (2008): Visible light communications: Challenges and possibilities. In: Proceedings of the IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. 15-18 September 2008, Cannes, French Riviera, France. IEEE.

OECD, ITF (2009): Transport Outlook 2009: Globalisation, Crisis and Transport.. OCED, International Transport Forum Joint Research Centre. Discussion Paper 2009-12, Mai 2009.

Paradiso, J. A.; Starner, T. E. (2005): Energy scavenging for mobile and wireless electronics. In: IEEE Pervasive Computing 4, Nr. 1, S. 18-27.

Peter, M.; Keusgen, W.; Böck, G. (2008): Kleine Wellen ganz groß - Neue alte Technik für den drahtlosen Datenhighway. In: NET - Zeitschrift für Kommunikationsmanagement 11/2008, S. 28-29.

Picot, A.; Eberspächer, J.; Braun, G. (Hrsg.) (2007): eHealth: Innovations- und Wachstumsmotor für Europa. Potenziale in einem vernetzten Gesundheitsmarkt. Berlin: Springer.

Reif, J. H.; LaBean, T. H. (2007): Autonomous Programmable Biomolecular Devices using Self-Assembled DNA Nanostructures. In: Communications of the ACM 50, Nr. 9, S. 46-53.

Ritzert, Barbara (2006): Der Kosmos im Fokus der Forschung. In: Innovationsreport, 6.7. 2006. Bericht von der Tagung des Forums der Förderung der europäischen neurowissenschaftlichen Gesellschaften (FENS) in Wien vom 8. bis 12. Juni 2006.

Roco, M. C.; Bainbridge, W.S. (2003): Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science, Kluwer, Dordrecht (NL), 2003.

Roloff, Nils; Beckert, Bernd (2006): Staatliche Förderstrategien für die Neurowissenschaften. Programme und Projekte im internationalen Vergleich. TAB Hintergrundpapier Nr. 15, April. Berlin: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB).

Sachverständigenrat zur Begutachtung der Entwicklung im Gesundheitswesen (2009): Koordination und Integration – Gesundheitsversorgung in einer Gesellschaft des längeren Lebens. http://www.svr-gesundheit.de/Startseite/Startseite.htm

Schunn, Christian D. et al. (2006): Final Report from the NSF Innovation and discovery Workshop: The Scientific Basis of Individual and Team Innovation and Discovrery, National Science Foundation, 2006.

Service, Robert F. (1999): Exploring the Systems of Life, Science Special Issue on Compex Systems, in: Science, April 1999, 284, S. 80-83.

Shannon, S. (2006): Trends in quantum computing research. New York: Nova Science Publishers.

Silberglitt, R., Antón, P.S., Howell, D.R., Wong, A. et al. (2006): The Global Technology Revolution 2020, In-Depth Analyses: Bio/Nano/ Materials/Information - Trends, Drivers, Barriers, and Social Implications. Technical Report TR 303. Santa Monica, CA. http://www.rand.org/pubs/technical_reports/2006/RAND_TR303.pdf

Simon, Fritz B, (2007): Einführung in die Systemtheorie und Konstruktivismus, Carl-Auer, Heidelberg, 2007.

Simon, H. A. (1996): The Sciences of the Artificial, third edition, MIT Press, Cambridge, 1996.

Sommerlatte, Tom (2002): Systemisch denken, handeln und gestalten – der gemeinsame Nenner einer situationsgerechten Universalität, in: Sommerlatte, Tom (Hrsg. (2002): Angewandte Systemforschung – ein interdisziplinärer Ansatz, Gabler, Wiesbaden, 2002, S. 1-22.

Sommerlatte, Tom (2006): Angewandte Systemforschung: Design sozio-technischer Innovationen, Mitteilungen der Anhaltischen Deutschen Gesellschaft Nr. 2, Funkt Verlag, Dessau, 2006.

Spath, D., Ganz, W. (Hg.) (2008): The Future of Services. Trends and Perspectives. München: Hanser.

Spohrer, J., Maglio, P. P., Bailey, J. & Gruhl, D. (2007): Steps Toward a Science of Service Systems. Computer, 01/2007, 71-77.

Stadler, R. (2007): Molecular, chemical, and organic computing. In: Communications of the ACM 50, Nr. 9, S. 43-45.

Stauss, B. et al. (Hg.) (2007): Services Science. Fundamentals, Challenges and Future Developments. Berlin: Springer.

Stieglitz, T.; Rosahl, S. (2005): Neuro-elektrische Schnittstellen zum zentralen Nervensystem des Menschen. Wissenschaftliches Gutachten im Auftrag des Deutschen Bundestages im Rahmen der TAB-Vorstudie: Hirnforschung – Themenfeld 5: Medizinisch-technische Anwendungen der Hirnforschung – Neuroprothetik, Neurobionik, Neuroinformatik.

Stobbe, L.; Schlomann, B.; Friedewald, M. et al. (2009): Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft. Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Berlin, Karlsruhe: Fraunhofer IZM; Fraunhofer ISI.

Stoltz, J.F.; Bensoussan, D.; Decot, V.; Netter, P.; Ciree, A.; Gillet, P. (2006): Cell and tissue engineering and clinical applications: An overview. In: Bio-Medical Materials and Engineering 16 (4 SUPPL.).

TAB (2007): Perspektiven eines CO_2- und emissionsarmen Verkehrs – Kraftstoffe und Antriebe der Zukunft. Vorstudie zum TA-Projekt. Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB).

TAB (Hrsg.) (2007): TA-Projekt Hirnforschung. Endbericht. Arbeitsbericht. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). Berlin.

Theodoridis, Segios; Koutroumbas, Konstantinos (2006): Pattern Recognition, third edition, Elsevier, Boston, 2006.

TNO, INFRAS, IVL, IFEU, TU Graz (2008): Cost-Effectiveness of Greenhouse Gases Emission Reductions in various Sectors – Final Report – Framework Service Contract No Entr/05/18. Delft, Zürich, Heidelberg, Stockholm, Graz.

Trusheim, Mark R., Ernst R. Berndt, and Frank L. Douglas (2007): „Stratified medicine: strategic and economic implications of combining drugs and clinical biomarkers." Nature Reviews Drug Discovery 6.4 (2007): 287-93.

TU Darmstadt (2008): Der Verkehr im Jahr 2030. Thema Forschung 1/2008. Wissenschaftsmagazin der Technischen Universität Darmstadt.

TU Darmstadt (2008): International 'Workshop Traffic and Transport 2030 - Internationaler Workshop 27.-29.2.2008, Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

UBA (2008): Umweltforschungsplan 2008, Dessau-Roßlau 2008-06-12.

Warneke, B.; Last, M.; Liebowitz, B.; Pister, K. S. J. (2001): Smart Dust: Communicating with a Cubic-Millimeter Computer. In: IEEE Computer 34, Nr. 1, S. 44-51.

WBCSD (2004): Mobilität 2030 – die Herausforderung der Nachhaltigkeit meistern. The Sustainable Mobility Project, Overview 2004. World Business Council for Sustainable Development.

Weaver, W. (1947): Science and Complexity, American Scientist, 36 (1948): 536 ff. (Download: http://www.ceptualinstitute.com/genre/weaver/weaver-1947b.htm, 25.10.2007)

Ye, W.; Heidemann, J.; Estrin, D. (2004): Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. In: IEEE/ACM Transactions on Networking 12, Nr. 3, S. 493-506.

Bildrechte:

© Andrzej - Fotolia.com
© blacksock - Fotolia.com
© Ewe Degiampietro - Fotolia.com
© Franck Boston - Fotolia.com
© iStock.com/bedo
© iStock.com/Bim
© iStock.com/clu
© iStock.com/Eraxion
© iStock.com/Inok
© iStock.com/Juanmonino
© iStock.com/Kemter
© iStock.com/Maliketh
© iStock.com/manwolste
© iStock.com/MichaelSvoboda
© iStock.com/Mlenny
© iStock.com/Nikada
© iStock.com/Raycat
© iStock.com/webphotographeer
© iStockphoto.com/fpm
© iStockphoto.com/viorika
© Jörg Vollmer - Fotolia.com
© marc hericher - Fotolia.com
© smu - Fotolia.com
© smu - Fotolia.com
© way4arer - Fotolia.com
© Yurok Aleksandrovich - Fotolia.com