



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

ZUKUNFTSFELDER NEUEN ZUSCHNITTS



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	7
1.1	Ausgangslage	7
1.2	Ergebnisse im Überblick	7
1.3	Das methodische Vorgehen	9
2	Zukunftsfelder neuen Zuschnitts – Einleitung	13
3	Mensch-Technik-Kooperationen	15
3.1	Das Zukunftsfeld	16
3.2	Ausgangssituation im Zukunftsfeld heute (2009)	19
3.3	Langfristperspektive des Zukunftsfeldes	23
3.4	Warum ist das Zukunftsfeld relevant?	30
3.5	Akteure im Innovationssystem heute	31
3.6	Zukunftsfähige Akteurskonstellationen	33
3.7	Empfehlungen	38
4	Das Altern entschlüsseln	39
4.1	Das Zukunftsfeld	39
4.2	Ausgangssituation im Zukunftsfeld heute (2009)	40
4.3	Langfristperspektive des Zukunftsfeldes	43
4.4	Warum ist das Zukunftsfeld relevant?	46
4.5	Akteure im Innovationssystem heute	47
4.6	Zukunftsfähige Akteurskonstellationen	48
4.7	Empfehlungen	51
5	Zukunftsfähige Lebensräume	53
5.1	Das Zukunftsfeld	53
5.2	Ausgangssituation im Zukunftsfeld heute (2009)	54
5.3	Langfristperspektive des Zukunftsfeldes	58
5.4	Warum ist das Zukunftsfeld relevant?	63
5.5	Akteure im Innovationssystem heute	64
5.6	Zukunftsfähige Akteurskonstellationen	65
5.7	Empfehlungen	66
6	ProduzierenKonsumieren2.0	68
6.1	Das Zukunftsfeld	68
6.2	Ausgangssituation im Zukunftsfeld heute (2009)	71
6.3	Langfristperspektive des Zukunftsfeldes	72

6.4	Warum ist das Zukunftsfeld relevant?	79
6.5	Akteure im Innovationssystem heute	80
6.6	Zukunftsfähige Akteurskonstellationen	81
6.7	Empfehlungen	82
7	Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation	85
7.1	Das Zukunftsfeld	85
7.2	Ausgangssituation im Zukunftsfeld heute (2009)	86
7.3	Langfristperspektive des Zukunftsfeldes	88
7.4	Warum ist das Zukunftsfeld relevant?	92
7.5	Akteure im Innovationssystem heute	93
7.6	Zukunftsfähige Akteurskonstellationen	94
7.7	Empfehlungen	97
8	Zeitforschung	99
8.1	Das Zukunftsfeld	99
8.2	Ausgangssituation im Zukunftsfeld heute (2009)	100
8.3	Langfristperspektive des Zukunftsfeldes	104
8.4	Warum ist das Zukunftsfeld relevant?	107
8.5	Akteure im Innovationssystem heute	108
8.6	Zukunftsfähige Akteurskonstellationen	111
8.7	Empfehlungen	113
9	Zukunftsfähige Energielösungen	117
9.1	Handlungsfeld Energiekonzert	117
9.1.1	Energiekonzert Motivation	118
9.1.2	Energiekonzert Ansatz	119
9.1.3	Potenzielle Akteure im Energiekonzert	121
9.2	Forschungsfeld Mikro-Energie aus der Umgebung gewinnen	121
9.2.1	Warum Mikro-Energie?	122
9.2.2	Ausgangssituation im Zukunftsfeld heute (2009)	123
9.2.3	Langfristperspektive des Zukunftsfeldes	124
9.2.4	Warum ist das Zukunftsfeld relevant?	127
9.2.5	Akteure im Innovationssystem heute	128
9.2.6	Empfehlungen	129
	Literatur	130

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 High-tech-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, Nanotechnologie, Materialien, Werkstoffe und ihre Herstellungsverfahren, Neurowissenschaften und Lernforschung, Optische Technologie, Service Sciences, System- und Komplexitätsforschung sowie für Wasser-Infrastrukturen die sogenannten **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.

Die Ergebnisse zu den Zukunftsthemen in den etablierten Zukunftsfeldern sind im Bericht »Foresight-Prozess – Im Auftrag des BMBF – Etablierte Zukunftsfelder und ihre Zukunftsthemen« dokumentiert und unter <http://www.isi.fraunhofer.de/bmbf-foresight.php> und <http://www.iao.fraunhofer.de/foresight> nachzulesen.

Mit diesem Bericht liefert der BMBF-Foresight-Prozess differenzierte, bestätigende oder modifizierende Hinweise zur Programmatik innerhalb etablierter Forschungs- und Technologiefelder in Deutschland.

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 Querschnittsaspekten. Die Recherchen in den etablierten Feldern lieferten erste Ansatzpunkte für übergreifende Aktivitäten, um im weiteren Prozessverlauf 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, Inventoren-scouting, Online-Befragung leiteten sich so 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 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.





Die Akteure in den Zukunftsfeldern neuen Zuschnitts

Förderpolitische Stringenz in der weiteren Bearbeitung der potenziellen Zukunftsfelder neuen Zuschnitts erfordert, das jeweilige innovationspolitische Umfeld zu kennen. Deshalb wurden die Untersuchungen zu den Zukunftsfeldern neuen Zuschnitts um einen weiteren Aspekt ergänzt: Eine gesonderte Akteursanalyse zu den jeweiligen Akteuren in jedem Zukunftsfeld gibt wieder, wie sich die Akteurslandschaft zum jetzigen Zeitpunkt darstellt. Dabei ging es zunächst darum, zu messen, ob schon etablierte Forschungsperspektiven und -strukturen bestehen, bereits tragfähige Ansatzpunkte für »strategische Partnerschaften« existieren und wer die relevanten Akteure sind bzw. sein können. Die Informationen hierzu bieten einen möglichen Ausgangspunkt für die weitere Auseinandersetzung mit den Zukunftsfeldern neuen Zuschnitts innerhalb des deutschen Forschungs- und Innovationssystems.

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 Ziele¹ 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 Partnerschaften² 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.

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.

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

Themensuche

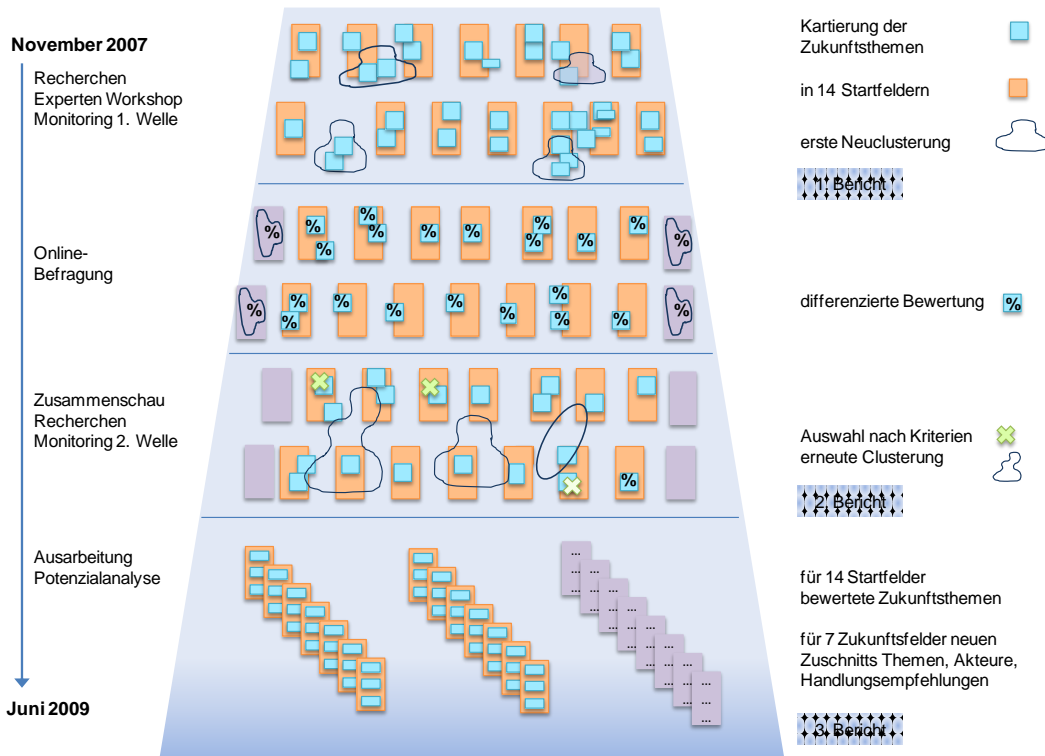


Abbildung 1: Vorgehen bei der Themensuche

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 Forschungs-

feldern nahmen eigens ernannte Themenkoordinatoren und Themenkoordinatorinnen eine ausführliche Kartierung der in den nächsten 10 bis 20 Jahren erwarteten Entwicklungen vor. Dabei wurde eine Kombination sehr unterschiedlicher methodischer Elemente eingesetzt:

- strukturierte fokussierte Experteninteraktion (Workshops und Interviews)
- Innovationssystemanalyse einschließlich einer Sichtung aktueller strategischer Prozesse im BMBF
- Environmental Scanning (Literaturrecherche, 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)
- Inventorensouting (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 zukunfts-fähig 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 sozio-ökonomischen 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.

Bedarfdynamik: 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.

2 Zukunftsfelder neuen Zuschnitts – Einleitung

Die folgenden Kapitel umfassen die Beschreibung der sieben **Zukunftsfelder neuen Zuschnitts**, die neben weiteren 14 Zukunftsfeldern im BMBF-Foresight-Prozess erarbeitet wurden. Die hier vorliegenden Zukunftsfelder sind übergreifende Zukunftsfelder entsprechend Ziel 2 des BMBF-Foresight-Prozesses. Sie speisen sich aus den anderen Zukunftsfeldern und ihren darunter liegenden Zukunftsthemen. Die Zukunftsfelder neuen Zuschnitts weisen eine neue Dynamik auf, die langfristig für die Forschung relevant werden wird. Deshalb sind nur diese Zukunftsfelder hinsichtlich Akteursanalyse zur Identifikation potenziell tragfähiger Akteurskonstellationen sowie Empfehlungen ausgearbeitet worden (Ziele 3 und 4).

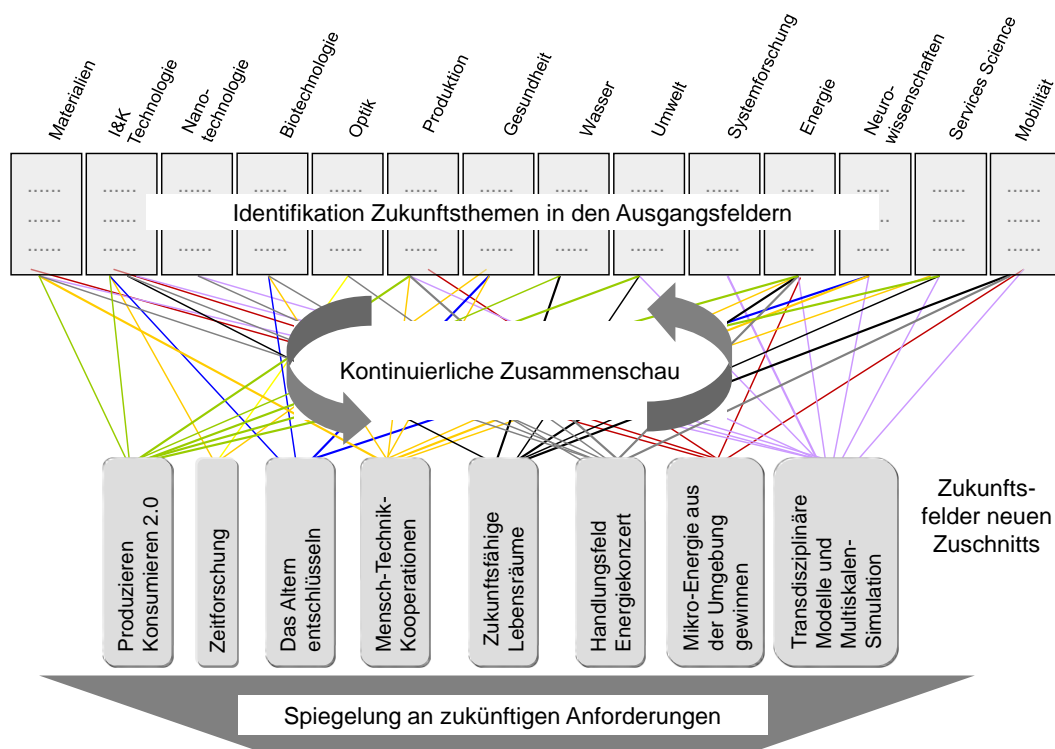


Abbildung 2: Alle Zukunftsfelder des BMBF-Foresight-Prozesses³

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

Einige der Zukunftsfelder adressieren sehr »große« Themen, andere sind eher »Querschnittstechnologien«, die Ausstrahleffekte haben könnten. Entsprechend ist die Anordnung der Zukunftsfelder in diesem Bericht.

Die Zukunftsfelder neuen Zuschnitts wurden in kontinuierlicher Zusammenschau geclustert. Sie sind entstanden, indem aus der »Vogelperspektive« ein Blick auf alle Zukunftsthemen geworfen wurde. Als ganze Felder erfüllen sie daher die Kriterien, die an die Auswahl von Zukunftsfeldern und Zukunftsthemen angelegt wurden. In der Abbildung 3 wurden jeweils die zwei Kriterien angekreuzt, auf welche die Zukunftsthemen neuen Zuschnitts in besonderem Maße antworten. So wird zum Beispiel Das Altern entschlüsseln besonders wichtig für den Erkenntnisgewinn in der Wissenschaft und die Lebensqualität der Menschen werden, was nicht bedeutet, dass es nicht auch für die wirtschaftliche Entwicklung in Zukunft einen Beitrag leisten könnte.

Zukunftsfelder neuen Zuschnitts antworten auf Kriterien

Zukunftsfeld	Erkenntnis- gewinn	Impulsgeber	Wirtschaft	Lebens- qualität	Umwelt
Altern entschlüsseln	X			X	
Energiekonzert			X		X
Mensch-Technik- Kooperationen			X	X	
Mikro-Energie		X	X		
ProduzierenKonsumieren2.0			X		X
Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation	X	X			
Zeitforschung		X		X	
Zukunftsfähige Lebensräume				X	X

Abbildung 3: Zukunftsfelder neuen Zuschnitts antworten auf Kriterien

Die Zukunftsfelder neuen Zuschnitts sind selbstverständlich nicht das einzige Ergebnis des BMBF-Foresight-Prozesses. Auch in den Zukunftsfeldern, mit denen gestartet wurde, finden sich viele Zukunftsthemen.

3 Mensch-Technik-Kooperationen

Vorbemerkung zum Technikbegriff

Technischer Wandel wird hier vor dem Hintergrund sozialwissenschaftlicher Technikgeneseforschung als eine Dimension gesellschaftlichen Wandels verstanden. »Technik und Gesellschaft entwickeln sich nicht isoliert voneinander, sondern sind in vielfältiger Weise miteinander verbunden. Das Verhältnis von Technik und Gesellschaft ist nicht durch eine einseitige Beeinflussung, sondern durch eine »Ko-Evolution« gekennzeichnet« (Grundwald 2003, S. 10). Die in diesem Prozess entstehenden technischen Artefakte strukturieren dann Wahrnehmung und Handlungsmöglichkeiten des Einzelnen. Der einzelne Mensch, die Beziehungen zwischen Menschen und die Gesellschaft verändern sich somit im Zuge der Aneignung von Technik. Die hier behandelten »dichten« Technologien weisen eine spezifische Ausprägung dieses Wechselspiels auf, indem sie sehr grundlegende, etablierte Annahmen über das Zusammenspiel von Mensch und Technik in Frage zu stellen scheinen. Um diesen Prozess in wünschenswerter Weise gestalten zu können, ist, unseren Analysen zufolge, eine reflexive Technikentwicklung erforderlich. Dazu gehört ein intensiver gesellschaftlicher Diskurs über wünschenswerte Entwicklungspfade ebenso wie ein neuer Typ von Forschung, der Wissensbestände von Geistes- und Sozialwissenschaften auf der einen und von Technikwissenschaften auf der anderen Seite integriert, um die erwünschten Pfade zu ermöglichen und den notwendigen Diskurs zu unterlegen. Im Folgenden werden die aus unserer Sicht zentralen Aspekte einer solchen Forschung skizziert. **Dabei wird technischen Artefakten an keiner Stelle der Status von handelnden Subjekten mit eigenem Bewusstsein zugeschrieben.** Es wird lediglich konstatiert, dass Artefakte zunehmend Funktionen übernehmen, die zuvor nur dem Menschen zugemessen wurden und daher immer menschenähnlicher zu werden **scheinen**. Es gilt, in Diskurs und Forschung neue Begriffssysteme zu entwickeln, die es erlauben, die Grenzen und Differenzen ebenso wie neue Typen von Interaktion von Mensch und Technik adäquat zu kennzeichnen. Heute etablierte Sprechweisen können diese neuen Formen nicht angemessen fassen. Die hier verwendeten Bezeichnungen »Mensch-Technik-Teams« und »Mensch-Technik-Kooperation« sind als Platzhalter für die noch zu entwickelnden Begriffe zu verstehen.

Innovationen, die eine neue Qualität von reibungsloser technischer Unterstützung des Menschen ermöglichen, erfordern nicht nur technische Entwicklungen, sondern auch solide Erkenntnisse über das menschliche Denken, Fühlen, Kommunizieren und Verhalten. Das neue Zukunftsfeld liefert die dazu not-



wendige integrierte Forschungsperspektive. Diese legt den Grundstein für die Entwicklung von **Mensch-Technik-Kooperationen (MTK) nach menschlichem Maß** und damit für zukunftsfähige Durchbrüche in zentralen Innovationsfeldern wie Ambient Intelligence, Robotik, kontextsensitive Dienstleistungen und Neuroprothetik.

Konkrete Entwicklungsziele sind beispielsweise:

- Modelle menschlichen Verhaltens und Verhaltensregeln zur Programmierung von adaptiven Assistenzumgebungen
- Konzepte zur gesellschaftlichen Einbettung der personalisierten Interaktion mit dem »Internet der Dinge«.

3.1 Das Zukunftsfeld

Aktuelle Technologien weisen eine neue Nähe zum Menschen, seinem Körper, seinem Gehirn und seinem alltäglichen Leben auf. Dabei haben vor allem folgende Entwicklungen eine neue Innovationsdynamik mit sich gebracht:

- Verfügbarkeit großer Informationsbestände durch Digitalisierung und schnelle Internetzugänge,
- Möglichkeit maschineller Interpretation von Information durch semantische Technologien⁴,
- tiefgreifende Erkenntnisse über das menschliche Gehirn und Entwicklung von Neuroprothesen (siehe auch Bericht zu den etablierten Zukunftsfeldern),
- Echtzeit-Verarbeitung der Informationsmassen in einer Vielzahl technologischer Systeme durch erhebliche Steigerung der Rechenleistung und Miniaturisierung der Schaltkreise,
- breite Anwendungspotenziale dank hoher Integration verschiedenster Komponenten auf kleinstem Raum durch Mikrosystemtechnik,
- drahtlose Vernetzung und ubiquitäre Einbettung der Systeme⁵,
- deutlich verbesserte Algorithmen der Mustererkennung,
- breiter Zugang zu satellitengestützter Positionierung.

Das Potenzial für neuartige Innovationen ergibt sich vor allem durch das Zusammenspiel dieser Durchbrüche in Forschung und Technologie: charakteristi-

⁴ Die Bibliometrie zeigt hier einen sprunghaften Anstieg.

⁵ Entwicklung des Pervasive Computing (bibliometrischer Anstieg).



sche Bereiche mit einer so hervorgerufenen aktuell hohen Dynamik sind »Intelligente Objekte« (siehe acatech 2009a und b) und Prothesen⁶, Telepräsenz-/ Teleaktionstechnologien⁷ und Kognitive Assistenz- und Kooperationssysteme⁸.

Komplexe technische Systeme sind in nahezu jeden Lebensbereich vorgedrungen; die Expansion der Technikosphäre sowie die Selbsttechnisierung des Menschen stellen eine neue Herausforderung für Wissenschaft, Politik und Gesellschaft dar. Der Mensch umgibt sich immer dichter mit einer wachsenden Zahl multifunktionaler, miniaturisierter, vernetzter und kontextsensitiver Geräte. Die funktionale Verschränkung dieses zwar fragmentierten aber in enger Kommunikation organisierten technischen Systems macht dieses zu einer Technikhülle, »die den Menschen mehr umfließt, als dass sie ihn noch in irgendeinem starren Sinn umgibt« (Acatech2009a, S. 24). Damit wird ein umfassendes integriertes Wissen über den Menschen, die Technik und ihre Relationen wichtig. Wissensbestände um den Menschen und um die Technik müssen in ihrer ganzen einzeldisziplinären Breite und Vielfalt miteinander verschränkt werden, wenn es gelingen soll, die hohe Dynamik der Entwicklung in einen wünschenswerten Rahmen zu bringen. Komplexität, Eindringtiefe, Wirkmacht und Wirkungsradius des gegenwärtigen und erst recht des sich abzeichnenden Technikkontinuums sind von keiner Einzeldisziplin der heutigen Forschungslandschaft adäquat zu erfassen, geschweige denn aktiv, sinnvoll, langfristig zukunftsfähig und wünschenswert zu gestalten. Die Fundierung eines Diskurses über gesellschaftlich wünschenswerte Formen dieser Technosphäre, ist – neben der Bewahrung eines Gestaltungsspielraumes überhaupt – eine der Hauptaufgaben des vorgeschlagenen Forschungsfeldes.

Vor diesem Hintergrund lässt die Forschungsperspektive »Mensch-Technik-Kooperationen« heute etablierte disziplinäre Abgrenzungen hinter sich und **nimmt neuartige Konstellationen von Mensch und Technik in ihrer ganzen Vielschichtigkeit in den Blick**, indem sie technische und soziale Aspekte von Mensch-Technik-Kooperationen von vornherein in ihrem Gesamtzusammenhang untersucht. Veränderungen etwa in sozialen Beziehungen oder im menschlichen Selbstverständnis werden nicht allein als Folge technischer Neuerungen, sondern, ebenso wie rechtliche und ethische Aspekte, als Dimensionen eines vielschichtigen Wandels verstanden. Gesellschaftlicher Wandel etwa die

⁶ Auch hier ein großer Anstieg in der Bibliometrie.

⁷ Telepräsenz bedeutet, dass ein menschlicher Operator durch technische Mittel mit seinem subjektiven Empfinden in einer anderen, entfernten oder nicht zugänglichen Umgebung präsent ist. Teleaktion bedeutet, dass dieser menschliche Operator nicht nur passiv präsent ist, sondern dass er an dem entfernten Ort auch aktiv eingreifen kann. Wirklichkeitsnah sind diese Eindrücke dann, wenn der menschliche Operator nicht mehr leicht unterscheiden kann, ob seine sensorischen Eindrücke und die Rückmeldungen von seinem Handeln in direkter Wechselwirkung mit der Wirklichkeit oder über technische Mittel entstehen. Siehe SFB 453, Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion, <http://www.sfb453.de/>. Im Interview betont von Prof. Kirchner (DFKI, Robotik)

⁸ Vgl. allein in diesem Bereich drei aktuelle Sonderforschungsbereiche SFB 453, 550 und 588.



Veränderung von Wertvorstellungen ist ebenso Ursache wie Wirkung in diesem Prozess. **Das Zusammenspiel des menschlichen und technischen Wandels rückt in den Mittelpunkt der Betrachtung.** Dazu müssen nicht nur verschiedene Forschungsstränge und wissenschaftliche Akteure, sondern auch verschiedene Wissensformen und Wissensräume gemeinsam weiterentwickelt werden, da Wissen über den Menschen und sein Verhältnis zur Technik oft nur implizit vorliegt⁹. So können Mensch-Maschine-Systeme entwickelt werden, in denen Technik und Mensch sich auf eine Weise »nahtlos« ergänzen, dass menschliche Handlungsmöglichkeiten bedarfsgerecht erweitert werden können.

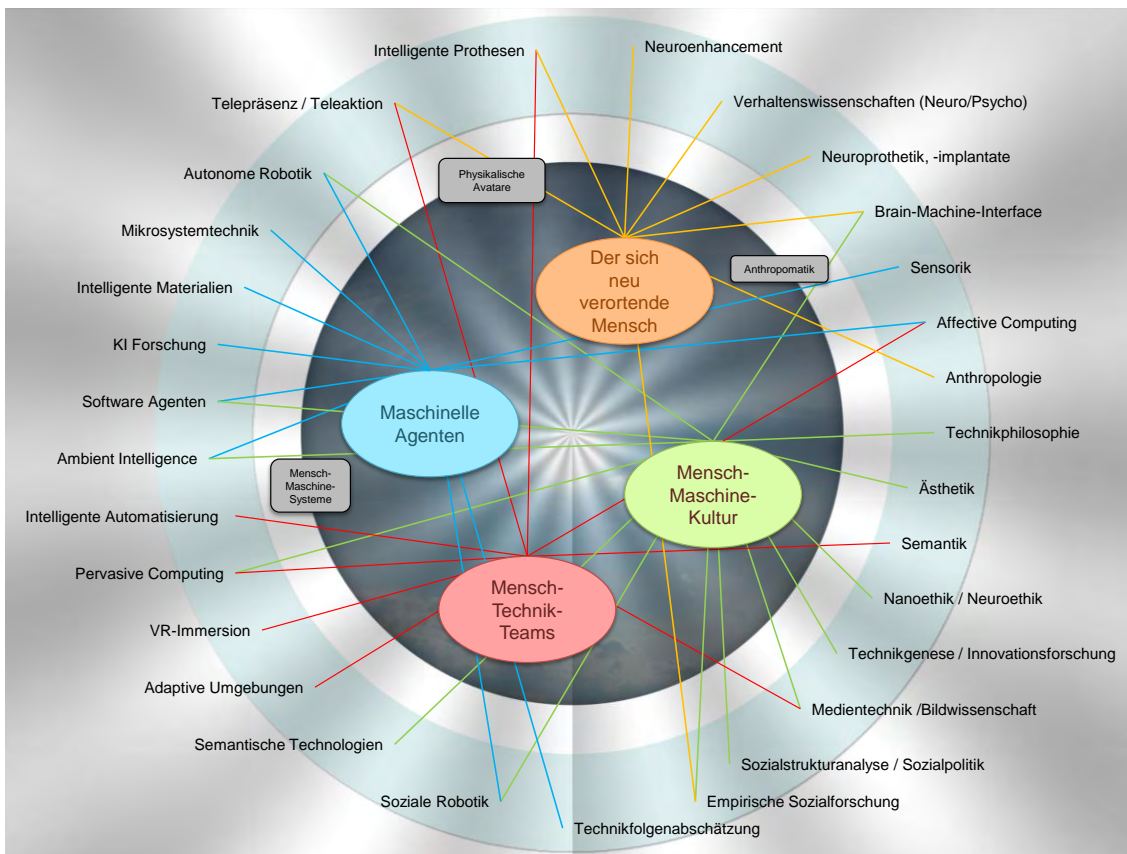


Abbildung 4: Zukünftig beteiligte Forschungsrichtungen

Deutschland ist dank seiner starken Stellung in vielen der relevanten Forschungsbereichen – sowohl in den Ingenieurwissenschaften als auch in den

⁹ Etwa das Wissen von Pflegepersonal als Basis für »Ambient Assisted Living« (siehe Initiative »Ambient Assisted Living for the Aging Population« (AAL), BMBF Hightech Strategie, www.bmbf.de/pub/bmbf_hts_lang.pdf, S. 90).



Geistes- und Sozialwissenschaften – exzellent positioniert, diese Perspektive als Vorreiter zu entwickeln und damit einen zukünftigen Leitmarkt zu erschließen.

Abbildung 4 bietet eine schematische Darstellung des Forschungsfeldes. Der äußere Ring in der Abbildung zeigt die zum jetzigen Stand identifizierten aktuellen Forschungsrichtungen, die das Forschungsfeld MTK speisen sollten. Sie umfassen technische und naturwissenschaftliche ebenso wie sozialwissenschaftliche und kulturwissenschaftliche Aspekte. Der innere Kreis stellt das neue Zukunftsfeld mit vier zentralen Forschungsbereichen dar. Die Verbindungen zeigen an, welche Forschungsrichtungen sich für innovative Weiterentwicklungen und für die schrittweise Realisierung des neuen Feldes verbinden müssten. Im Folgenden werden beispielhaft einige der relevanten technologischen Entwicklungslinien umrissen (»Ausgangssituation im Zukunftsfeld heute«). Danach wird das Zukunftsfeld mit den zentralen Forschungsbereichen (innerer Kreis) dargestellt (»Langfristperspektive des Zukunftsfeldes«).

3.2 Ausgangssituation im Zukunftsfeld heute (2009)

Eine Reihe aktueller Forschungsperspektiven in unterschiedlichen Bereichen richtet sich auf Innovationen, die mit engeren Interaktionen zwischen Mensch und Technik einhergehen. Viele dieser Technologien sind von besonderer Bedeutung für die deutsche Innovationslandschaft. Zum einen, weil sie mit Stärken des deutschen Innovationssystems wie etwa Automatisierungstechnik, Informationstechnologie und Medizintechnik im Zusammenhang stehen, zum anderen, weil ihnen ein hohes Potenzial zur Adressierung zentraler Herausforderungen der Zukunft beigemessen wird¹⁰.

Fortschritte auf dem Gebiet der Telepräsenz und Teleaktion¹¹ etwa verändern grundlegend das Verhältnis des Menschen zu Raum und Distanz und erweitern so den direkten Einflussbereich über Arm- und Sichtweite hinaus. Diese Entwicklung leistet der Vernetzung der Welt zu einem »globalen Dorf« rasant Vorschub. IuK-Technologien haben die Arbeits- und Forschungswelt stark verändert und ermöglichen via Telefon- und Videokonferenz oder webbasierten Arbeitsplattformen interkontinentale Kooperation und die Etablierung globaler »Scientific Communities«.¹² Auch Entwicklungen zur Teleaktion, zur Fernsteuerbarkeit von Maschinen rund um die Welt und darüber hinaus – seien es unbemannte Luftfahrzeuge, Minenräumgeräte oder wissenschaftliche Tiefseeroboter und Marskundschafter – führen zu neuen Möglichkeiten und Gefahren,

¹⁰ Zum Beispiel »Ambient Assisted Living« zur Bewältigung der Herausforderungen des demografischen Wandels.

¹¹ Siehe SFB 453, Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion, <http://www.sfb453.de/>.

¹² Ein Beispiel für Forschung einer globalen »Scientific Community« ist das Großprojekt der Teilchenbeschleuniger bei Genf der Europäischen Organisation für Kernforschung (CERN).



zu neuem Selbst- und Weltverständnis. Teleaktion und Telepräsenz entwickeln über den IuK-Bereich hinaus durch die Kombination mit Fortschritten auf dem Gebiet der Virtuellen Immersion, der Robotik und Mechatronik oder der Psychologie und Medizintechnik ein großes Zukunftspotenzial. Gegenwärtig im Einsatz sind beispielsweise Technologien zur Teleoperation¹³, mit denen Chirurgen Patienten operieren können, die sich Tausende von Kilometern entfernt befinden. Ebenso erweitern »Remote-Manufacturing«-Konzepte die Möglichkeiten der lokalen Infrastruktur, da die Konzeptions-, Steuerungs- und Produktionsorte beliebig weit auseinander liegen können. Die Mehrzahl der aktuellen Entwicklungen im Bereich Telepräsenz ist auf die Lösung der technischen Herausforderungen fokussiert. Um die angestrebte Mensch-Technik-Kooperation nach menschlichem Maß zu erreichen, ist jetzt eine Integration mit Wissen über die »menschlichen« Aspekte dieser Form von Mensch-Technik-Teams, wie etwa Verständnis von Kognitions- und Wahrnehmungsprozessen sowie geeigneter organisatorischer Rahmenbedingungen, erforderlich.

Eine besondere Rolle in der Erforschung von Mensch-Technik-Kooperationen kommt den Schnittstellen zwischen Mensch und Technik zu. So wird zum Beispiel gegenwärtig eine Hirn-Computer-Schnittstelle (BCI) dazu verwendet, Querschnittsgelähmte mittels »mentaler Schreibmaschine«¹⁴ aus ihrer »Locked-In«-Situation zu befreien, da sie so über den »getippten Text« mit der Umwelt kommunizieren können. Dazu werden die Hirnströme mittels Elektroenzephalographie (EEG) gemessen und die dahinterliegenden »Gedanken« als Steuerungssignale für diverse Funktionen interpretiert. Diese Schnittstelle ist nicht-invasiv und bietet daher das Potenzial für nicht-therapeutischen Einsatz, vorausgesetzt, sie wird alltagstauglich; dazu muss sie – derzeit noch eine mit Gel gefüllte »Badekappe« – komfortabler und leicht handhabbar werden, zum Beispiel integriert in einem Helm. Die hierfür nötigen kontaktlosen Elektroden sind bereits als Patent beantragt. Die elektroenzephalografische Überwachung von Aufmerksamkeitsspanne und Fehleranfälligkeit von Kontroll- oder Steuerpersonal im Arbeitsalltag verspricht mehr Sicherheit, weniger Fehler und hirngerechtere Arbeitsbedingungen. Durchbrüche bezüglich der Hirnergonomie von Arbeits-, Wohn-, Lern- und Spielumgebung zeichnen sich ab. Spätestens dann stellen sich essenzielle Fragen zur Identität und Rolle des Menschen im Gesamtkontext, deren Beantwortung ansatzweise in manchen Geistes- und Gesellschaftswissenschaften begonnen wurde. Zudem wirft die Möglichkeit der

¹³ »Mithilfe eines ferngesteuerten Roboters haben Mediziner aus New York einer 68-jährigen Frau in Straßburg die Gallenblase entfernt. Die weltweit erste transatlantische Operation am Menschen hat etwa eine Stunde gedauert und ist ohne Komplikationen verlaufen.« (heise-online, Erste Tele-Operation über den Atlantik (19.09.2001 19:07); <http://www.heise.de/newsticker/Erste-Tele-Operation-ueber-den-Atlantik-/meldung/21182>, 09.07.09, 12:38).

Siehe das DFG Graduiertenkolleg »Intelligente Chirurgie« (<http://www.intelligente-chirurgie.de>).

¹⁴ Siehe das Berlin Brain Computer Interface Projekt (BBCI) von Prof. Curio der Berliner Charité (vom BMBF gefördert), unter www.bbci.de



Fremdsteuerung solcher Schnittstellen rechtliche und ethische Fragestellungen auf. Die Weiterführung dieser Forschungsansätze sowie die Kooperation der Geistes- und Sozialwissenschaften mit den Bereichen der Schnittstellenforschung und der Medizin ist in diesen Fragen unabdingbar.

Auch zunächst aus therapeutischem Druck heraus ist das Feld der Neuroprothetik entstanden. Die Tiefenhirnstimulation (DBS) beispielsweise hilft mittels schwacher Elektroimpulse, den Tremor von Parkinsonpatienten zu unterdrücken, was für diese unter Umständen eine enorme Steigerung der Lebensqualität bedeutet gleichzeitig aber auch erhebliche Nebenwirkungen bis hin zu Persönlichkeitsveränderungen mit sich bringen kann (siehe Clausen 2009). Das komplexe Wirkungsspektrum einer direkten Stimulation des Gehirns beinhaltet auch negative Effekte, die nicht absehbar, nicht voll kontrollierbar und daher möglicherweise ethisch nicht vertretbar sind. Allein die bloße Möglichkeit etwa einer Fremdsteuerung des »freien Willens« macht die frühzeitige Entwicklung angemessener ethisch-rechtlicher Rahmenbedingungen zwingend. Per Schalter steuerbares An und Aus von Gefühlsregungen rührt an den Nerv des menschlichen Selbstverständnisses – umso mehr, da EEG und DBS als Neuroprothese¹⁵ im Körper integriert sind und nicht mehr wie eine Brille abgenommen werden können, wenn sie stören. Neuroprothetik wird mehr noch als gegenwärtige Technologien die heutigen Konzepte von Identität und Souveränität des Menschen grundlegend in Frage stellen.

In Technologien wie autonome Robotik¹⁶, intelligente Software-Agenten¹⁷ oder Systemen intelligenter Umgebungen müssen Erwartungen, Erwartungserwartungen¹⁸, Deutungshintergründe und Auslegungsspielräume implementiert werden, damit sie im Handlungskontext mit dem Menschen funktionieren können. Zu diesem Zweck werden den Artefakten Algorithmen einprogrammiert, anhand derer sie ihre Umgebung einschließlich des menschlichen Verhaltens interpretieren.¹⁹ Die heutigen Umweltmodelle, sind bestenfalls rudimentär und verfehlen daher zwangsläufig den komplexen Menschen, wodurch es zu Unstimmigkeiten in der Interaktion von Mensch und Technik kommt. **Technik »weiß« zu wenig vom Menschen.** Dies wird umso stärker zum Problem je dichter am Menschen eine Technologie operiert und je zentralere Funktionen

¹⁵ Bzw. Fraunhofer-Institut für Biomedizinische Technik IBMT, <http://www.ibmt.fraunhofer.de>

¹⁶ Siehe: Robotics Innovation Center (RIC) des Deutschen Forschungszentrums für Künstliche Intelligenz in Bremen (<http://robotik.dfki-bremen.de>).

¹⁷ Siehe: Forschungsbereich Agenten und Simulierte Realität des Deutschen Forschungszentrums für künstliche Intelligenz in Saarbrücken (http://www.dfki.de/ga/index_de.html).

¹⁸ Während Erwartungen bestimmte Handlungen als möglich oder wahrscheinlich vorwegnehmen, um das eigene Handeln daran zu orientieren, ist dies bei Erwartungserwartungen wiederum in Bezug auf antizipierte Erwartungen (und nicht Handlungen) der Fall. Der »vorausseilende Gehorsam« wäre ein Extrembeispiel für eine Erwartungserwartung.

¹⁹ So interpretieren etwa Fahrerassistenzsysteme das Verhalten des Fahrers und greifen dementsprechend steuernd ein.



auf der Basis dieser Interpretationen ausgeführt werden. Eine interdisziplinäre Forschung zu angemessenen Interaktionsmodellen ist ebenso erforderlich wie ein gesellschaftlicher Dialog über den wünschenswerten Grad der Nähe.

Eine zentrale Rolle spielt die Entwicklung von Semantischen Technologien als Schnittstelle zwischen Mensch- und Technik-Wissensräumen sowie die semantische Erschließung der menschlichen Kommunikation, vor allem auch der non-verbalen, und des menschlichen Verhaltens als Vermittlung in Mensch-Technik-Teams. Das »Semantic Web« ist derzeit noch auf einige eng begrenzte Bereiche reduziert und weit davon entfernt, die menschlichen Ausdrucks- und Wissensformen maschinenverstehbar zu machen. Die Realisierung von bedeutungsinterpretierenden Programmen, die Umsetzung von technischer kontextsensitiver Auslegung und Bewertung von Information wird zunehmend dazu führen, dass Maschinen immer weniger als bloßes Instrument, sondern als eigenständig operierende Entität **wahrgenommen werden**. Die »Semantics« machen klassische und virtuelle Handlungs- und Wissensräume kooperabel (vgl. Hubig 2008, S 12ff). Damit verlagert sich der Ort der Information aus dem Menschen heraus und die Bewertungskompetenz sowie das Zugriffsrecht werden wichtiger als der Besitz von Information. Derzeit ist das einzige funktionierende semantische System der Mensch; wenn sich diese Situation aber scheinbar ändert, indem eine als echt empfundene Nachahmung von intelligentem Verhalten gelingt, dann hat dies Konsequenzen für das Selbstverständnis des Menschen. Der Einsatz von Lernprogrammen kann Vorteile des Lernens, Vermittelns und Beratens bieten. Wenn jedoch technische Tutoren mit Hilfe semantischer Technologien weitgehende Interpretationsleistungen vornehmen können, und dann als »Lehrer« mit Wissens- und Kompetenzvorsprung dargestellt und wahrgenommen werden, und wenn Maschinen durch Nachahmung und Nachvollziehen von Arbeitsprozessen vom menschlichen »Kollegen« lernen²⁰, dann befinden sich Mensch und Maschine zumindest im Lern- und Kooperationskontext **scheinbar** auf gleicher Ebene. Sollten solche »Mensch-Technik-Teams«, in denen etablierte Aufgabenteilungen zwischen Mensch und Technik verschwimmen, sich etablieren, würde dies neuartige Lern- und Arbeitsstrukturen voraussetzen. Diskurs und Forschung zu möglichen Formationen und ihrer Wünschbarkeit sind bisher nur ansatzweise im Gange.

Diese Ansätze eines mannigfaltigen Forschungsfeldes mit hohem Zukunftspotenzial zeigen eine schwierige Situation von komplexen Wechselwirkungen und verdeckten Implikationen, die nicht mehr mit dem bisherigen Set an Begriffen und Forschungskonzepten beschreibbar sind. Keine Disziplin in ihrer hoch spezialisierten und damit zwar leistungsfähigen, aber beschränkten Domäne wird

²⁰ Bionische Manipulatoren zur Erschließung neuer Anwendungen der Automatisierungstechnik, der bionische Roboterarm BioRob (vom BMBF gefördert), (<http://www.biorob.de>).



ihre Formulierung allein meistern können. Eine neue Qualität integrierter sozial/geistes- und technikwissenschaftlicher Forschung ist erforderlich, um diese Technologien nach menschlichem Maß zu erschließen.

Aus vielen disziplinären Richtungen von der Neuroethik aus der Philosophie bis hin zum »human centred design« in den Ingenieurwissenschaften werden aktuell Vorstöße in diese Richtung unternommen (vgl. 1.5.). Die Forschungen zu Mensch-Technik-Kooperationen sind jedoch aktuell weitgehend voneinander isoliert. Einige Forschungsrichtungen selbst können innerhalb ihrer Felder nicht voll zur Geltung kommen. Auf allen Ebenen des Innovationssystems von den Universitäten bis hin zur industriellen Entwicklung fehlen Plattformen für gemeinsame Forschung der unterschiedlichen Wissensformen und Disziplinen. Gleichzeitig sind die entsprechenden disziplinen- und technologiefeldübergreifenden Forschungsfragen zu Mensch-Technik-Kooperationen noch kaum ausgebildet. Das Feld stellt sich als Mosaik mit vielen Facetten, jedoch ohne deutlich erkennbare gemeinsame Perspektive dar.

3.3 Langfristperspektive des Zukunftsfeldes

Die neue Forschungsperspektive Mensch-Technik-Kooperationen beginnt gerade dort, wo bisherige einzeldisziplinäre Forschungen an der neuen Komplexität des Forschungsgegenstandes zu scheitern drohen.

Das Zukunftsfeld ist in vier zentrale Forschungsbereiche unterteilt, wobei eine trennscharfe Abgrenzung zwischen den Bereichen weder möglich noch wünschenswert ist. Die Unterteilung dient der Explikation des komplexen Gegenstandsbereiches.



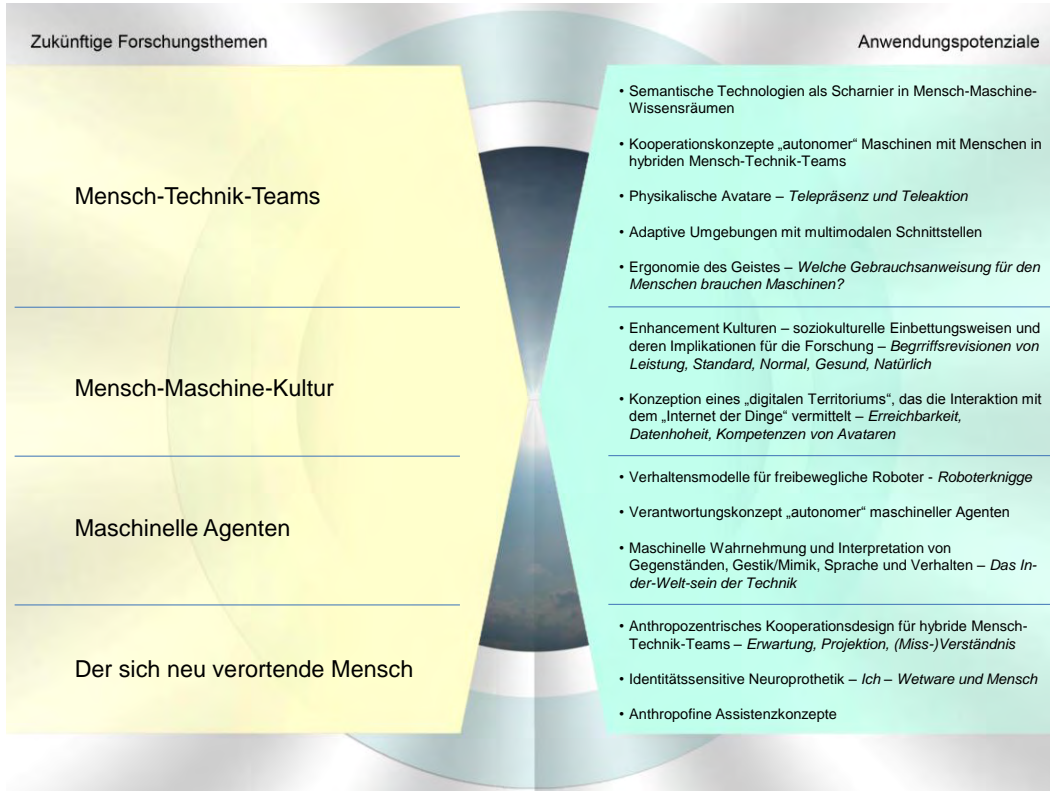


Abbildung 5: Zukünftige Forschungsthemen und Anwendungspotenziale im Zukunftsfeld »Mensch-Technik-Kooperationen«

Der sich neu verortende Mensch

Innerhalb immer dichter anschließender Technikhüllen und angesichts von Maschinen mit dem Anspruch, menschliche Eigenschaften aufzuweisen, muss die Verortung des Menschen gegenüber der von ihm selbst geschaffenen technischen Umgebung neu reflektiert werden. Nur so kann es gelingen die »dichten« Technologien zu einer Erweiterung menschlichen Potenzials zu nutzen und zu vermeiden, dass Menschen im Zuge zukünftiger Entwicklungen ungewollten Technikzwängen jeglicher Art ausgesetzt sind. In der Konfrontation mit den neuen Technologien kommt es zu komplexen Einwirkungen und Wandlungsprozessen am menschlichen Selbst- und Weltverständnis. So wird das Konzept der **Identität** problematisch, wenn Tiefenhirnstimulationen und »Cognitive-Enhancement«-Pharmazeutika in die Intimität von Gedanken und Emotionen eindringen. Potenzielles Tätigkeitsfeld der MTK-Perspektive wäre daher beispielsweise die Erforschung von identitätssensitiver Neuroprothetik, die therapeutische Hilfe und wünschenswerte Verbesserung der Lebensqualität mit dem Schutz des Gesamtkonzeptes Mensch bzw. Person verbindet. Bereits



von der Philosophie oder Psychologie erarbeitetes Wissen über Begriffe bzw. Themen ²¹ wie Identität, Person oder Mensch müssen von Seiten der Technikentwickler aufgenommen und in ständigem Austausch weiterentwickelt werden.

Weitere Anwendungspotenziale wären zum einen anthropozentrische Kooperationsdesigns für Mensch-Technik-Teams, in denen nicht erforscht wird, wie der Mensch sich als Operator inszenieren, sich also der Technik konform verhalten soll, sondern welche Erwartungen und Vorverständnisse des Menschen im Zuge der Entwicklungen auf die Technik projiziert werden sollen und was daraus für die Gestaltung und das Design der Technik folgt. Zum anderen wären dies anthropofine Assistenzkonzepte, die menschengerechte und vor allem menschadaptive Aspekte der Technik in den Mittelpunkt stellen. Ziel wäre es also, die Grundlagen zu liefern, um überhaupt technische Assistenzsysteme entwerfen zu können, die sich in allen Parametern dem individuellen Menschen anpassen.

Maschinelle Agenten

Im Bereich der maschinellen Agenten sind Forschungsfragen angesiedelt, die der Evolution von Maschinen (im weiteren Sinne, also jeglicher Form und Funktion) von alten Zahnrad-Hebel-Gebilden hin zu heutiger Komplexität Rechnung tragen. Dies bedeutet, dass eine Neuverortung der Maschine vorzunehmen ist. Maschinelle Agenten sind beispielsweise Roboter, Software-Agenten, »intelligente« Objekte²² oder Maschinen, virtuelle Avatare.

Konzepte wie **Autonomie** und **Intelligenz**, bisher dem Menschen vorbehalten Eigenschaften, werden immer häufiger unhinterfragt auf Maschinen übertragen. Gleichzeitig erhalten maschinelle Agenten jedoch weitere Bewegungsräume und Aktionsradien. Und wo Handeln zunehmend nahtlos zwischen Mensch und Technik verteilt wird²³, muss auch über Verantwortung und Verhaltensregeln nachgedacht werden. Mögliche Anwendungspotenziale des Forschungsbereiches **Maschinelle Agenten** sind die Entwicklung von Verhaltensmodellen für freibewegliche Roboter²⁴, einer Art **Roboterknigge** sowie

²¹ Die interdisziplinäre Verständigung über Begriffe wurde im Workshop »Mensch-Technik-Grenzverschiebungen« (Karlsruhe, 27.05.2009) als grundlegend und vorrangig für das gesamte Vorhaben hervorgehoben. Konsens der anwesenden Geistes-, Sozial- und Naturwissenschaftler war, auf etablierte Erkenntnisse aus der Philosophie, vor allem bezüglich des Begriffs »Mensch«, zurückzugreifen, um nicht obsoletere Grundsatzdebatten zu wiederholen und dennoch mit einem gemeinsamen Verständnis zu starten.

²² Siehe acatech (2009a).

²³ »Es ist dabei nicht leicht zu sagen, wer zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort »eigentlich« handelt und eine Wirkung hervorbringt: der Schichtleiter selbst oder das Notkühlsystem, der Flugkapitän selbst oder der Fluglotse oder der Autopilot, der Autofahrer selbst oder das Antischleudersystem oder der Ermüdungsassistent – das Handeln ist »verteilt«.« (Acatech 2009a, S. 11)

²⁴ Siehe SFB 588 Humanoide Roboter – Lernende und kooperierende multimodale Roboter (<http://www.sfb588.uni-karlsruhe.de/>).



Konzepte zur Ausgestaltung von Interaktion mit maschinellen Agenten wie etwa Fragen von Verantwortung und Vertrauen z.B. im Umgang mit virtuellen Broker oder Auktionatoren.²⁵ Weiter gibt es dringenden Forschungsbedarf bei der Verbesserung der Wahrnehmungsfähigkeit der Maschinen, vor allem der Fähigkeit, die Komponenten komplexer menschlicher Kommunikation (Sprache, Gestik/ Mimik, Kontext, Verhalten) zu deuten und zu verwenden.

Am Beispiel des verteilten Handelns zeigt sich deutlich die Notwendigkeit von integrierter Forschung zwischen den Geistes- und Sozialwissenschaften und den Technik- und Naturwissenschaften. Dies geht über bloße Begleitforschung hinaus. Nur so können die technisch möglichen Spektren von Interaktion mit maschinellen Agenten sinnvoll ausgeschöpft werden.

Mensch-Technik-Teams

Ein großer Kernbereich der Mensch-Technik-Kooperationen-Forschung ist die Untersuchung der Dynamik von Mensch-Technik-Teams. Wie können Mensch und Maschinen angesichts der erweiterten Möglichkeiten aktueller Technologien besser interagieren? Welche Interaktionsformen sind möglich und wünschenswert? Wie sind einzelne Entwicklungen mit dem Fokus auf eine produktive, für den Menschen entlastende Form zu modulieren?

Es lassen sich drei Interaktionsformen unterscheiden: Zum einen zählen hierzu vom Menschen (fern-)gesteuerte Maschinen aller Art, zum anderen sind dies Systeme und Umgebungen, die sich dem Menschen adaptiv anschmiegen, und schließlich sind dies »eigenständig operierende«, kooperierende Maschinen, wie beispielsweise Kobots²⁶. Dabei sind auch Mischformen möglich. Ab wann ein Assistenzsystem als adaptive Umgebung oder kooperierender Agent gilt, hängt vom spezifischen Funktionsumfang und der zugestandenen Kompetenz des Systems ab.

Eine zentrale Rolle wird die Forschung im Bereich der **Semantischen Technologien** einnehmen, da sie als Scharnier zwischen menschlichen Wissensräumen und formalen, technisch kodierten Algorithmen fungiert. Der Erfolg des Vorhabens, der Technik deutendes, kontextsensitives Verständnis von Informationen »beizubringen«, hängt ganz wesentlich davon ab, dass es gelingt, das Verständnis vom menschlichen Kommunikationsverhalten und sprachlicher sowie außersprachlicher Sinnvermittlung zu verstehen und diese Wissenssphäre dann

²⁵ Vgl. bspw. European Robotics Research Network, <http://www.euron.org/>

²⁶ Die so genannten Kobots (kooperative Roboter) werden u. a. vom Fraunhofer-Institut Produktionsanlagen und Produktionstechnik (FhG IPK) entwickelt. Allerdings sind diese Kobots auf das Produktions- und Arbeitsumfeld beschränkt; ihre »Freilassung« in den Alltag gilt es erst noch zu leisten.



mit jener der technischen Disziplinen zu verschmelzen. Jegliche Kooperation bzw. Interaktion zwischen Mensch und Technik wird wesentlich darauf angewiesen sein, dass die Technik lernt, die menschliche Kommunikation richtig zu interpretieren.

In der Produktion sind Roboter schon fest etabliert. Noch werden Fabrikroboter allerdings in eigenen Bereichen sorgfältig von Menschen abgeschirmt und umgekehrt, da sie ohne entsprechende Wahrnehmungssensorik auf ihre Umgebung nicht interaktiv eingehen können. Hier ist der Raum für zukünftige **Kooperationskonzepte von Maschinen und Menschen**.

Um im Alltag funktionierende Mensch-Technik-Teams bilden zu können, muss die Sensorik der Maschinen auf die Nähe der verletzbaren menschlichen Physis sensibilisiert werden, muss ein Modell von Verhalten und Verfasstheit des Menschen in der Maschine angelegt werden. Darüber hinaus werden die komplexen Aufgaben der maschinellen »Kollegen« nicht mehr a priori programmierbar, sondern nur in direkter Kooperation erlernbar sein. Auch bei dieser Lernfähigkeit der Technik steht die Forschung noch am Anfang. Für erfolgreiche Mensch-Technik-Teams braucht es auch ein Verständnis sinnvoller Aufgabenteilungen und geeigneter Organisations- und Kooperationsstrukturen. Welchen Sinn für welche Aufgabe haben »humanoide« Roboter? Welche Aufgaben belässt man sinnvollerweise in Menschenhand, welche können an Maschinen delegiert werden und welche Strukturen können die typisch menschlichen Fähigkeiten optimal unterstützen?²⁷

Eine weitere Form der Mensch-Technik-Kooperation mit hohem Zukunftspotenzial wird mit **Physikalischen Avataren** adressiert. Physikalische Avatare sind Maschinen, die über virtuelle Immersion ferngesteuert werden. Beispiele Physikalischer Avatare im Einsatz wurden oben genannt. Hier kommt der MTK-Forschung die Aufgabe zu, die Möglichkeiten der Telepräsenz und der Teleaktion zu erweitern und dabei Sicherheit und Wirtschaftlichkeit zu erhalten. Die Weiterentwicklung erfolgreicher Mensch-Avatar-Teams für weitere Aufgaben überall dort, wo z.B. Retter in Gefahr kommen könnten, ist eine zentrale Herausforderung.

Hier kommt der Kombinationsfähigkeit von menschlichem Gehirn und maschineller Physis große Bedeutung zu.²⁸ So muss die Sensordichte der ferngesteuerten Avatare erheblich erhöht werden. Derzeit befinden sich in einer einzelnen

²⁷ Diese Fragen lassen sich am Beispiel des Krankenhauses oder der Pflege gut problematisieren. Be- und Entlastung des Pflegepersonals stehen mit unterschiedlichen Faktoren wie zwischenmenschlicher Nähe oder Wirtschaftlichkeit im Verhältnis.

²⁸ Zu dieser Einschätzung kommt auch Prof. Kirchner, Leiter des Robotics Innovation Center (DFKI Bremen). Er sieht die Roboter des 21. Jahrhunderts hauptsächlich in Form von physikalischen Avataren.



Fingerspitze eines Menschen mehr Sensoren als an allen Robotern Europas zusammen. Darüber hinaus wird die Datenübertragung zwischen »Pilot« und Avatar die enorm wachsende Datenflut der höheren Sensorendichte bewältigen und gleichzeitig hohen Sicherheitsansprüchen genügen müssen. Weiterer Forschungsbedarf besteht im Schnittstellendesign; Joystick, Bildschirm, Maus und Tastatur werden für die komplexe Steuerung von physikalischen Avataren nicht mehr ausreichen. Force-Feedback-Joysticks, Datenanzüge und weitere multimodale Schnittstellen der Virtuellen Immersion sind erste Ansätze; eine effektive Sprachsteuerung wartet auf Durchbrüche in der Semantik. Hier zeigt sich das große Potenzial der Spiele-Industrie, die auf sehr große »Feldversuche« mit neuen Schnittstellen zugreifen kann und deren »Probanden« unermüdlich und in stetig steigender Zahl für eine fruchtbare empirische Basis sorgen, die von der Schnittstellenforschung, der Psychologie und weiteren genutzt werden sollte.

Ein weiteres MTK-Forschungsthema, das in den Bereich fällt, sind **adaptive, assistive Umgebungen**. Im Bereich der »Ambient Intelligence« sind zahlreiche Technologien in der Entwicklung und teilweise schon im Einsatz. Auch hier ist jedoch die Integration von Wissen über den Menschen mit Wissen über die jeweilige Technik essenziell. Assistenzsysteme etwa für das Gehen²⁹, in Fahrzeugen oder in Häusern haben immer die Relation von Mensch und Technik als zentrale Herausforderung. Daher können erfolgreiche Lösungen nicht unilateral von einem der beiden Pole her geschaffen werden. Erst ein umfassendes Verständnis dessen, was und wie viel der Mensch wann an Assistenz braucht – und vor allem auch, was nicht –, kann hier weiterführen.

Kritischer Punkt der »Ambient-Intelligence«-Anwendungen ist das interpretierende Verstehen menschlichen Verhaltens durch die beteiligten »Komponenten«. Komfortablere und sicherere Fahrzeuge, Häuser, Kommunikations- und Informationswege usw. mittels adaptiver Assistenzsysteme sind wesentlich auf die Entwicklung der Semantischen Technologien angewiesen. Sollen die »intelligenten« Umgebungen aber Bedürfnisse feststellen und reagieren, bevor der Nutzer etwas sagt (oder sagen kann) oder gar bewusst denkt³⁰, muss über Sprache und Bedeutung hinausgegangen werden. Daher strebt die MTK-Perspektive eine gesamtheitliche Forschungsinteraktion unter Einbeziehung des in den Geistes- und Sozialwissenschaften vorhandenen Wissens an.

²⁹ Siehe »Bodyweight Support Assist« von Honda (<http://world.honda.com/news/2008/c081107Walking-Assist-Device>).

³⁰ Zum Beispiel überwachen einige Fahrassistenzsysteme den Liedschlag und Puls des Fahrers und weisen diesen auf Ermüdung und Stress hin, bevor er es selbst bemerkt. Die Herausforderung für adaptive Umgebungen besteht darin, weit mehr als nur Müdigkeit zu »erahnen«. So forscht das Institut für Anthropomatik in Karlsruhe an Intentionserkennung (darüber hinaus auch: Bewegungssynchronisation von robotergestützten Operationsinstrumenten; Multimodale Weiträumige Telepräsenz; Erfassung der Bewegung von Personen: Miniaturisierte Laufroboter). Siehe auch das aktuell vom BMBF geförderte Forschungsprojekt: Der Fahrer als Sensor (<http://www.fasor.info>).



Für Fragen der intuitiven Bedienung oder für die Entwicklung von Technik, die sich schnell auf eine große Zahl heterogener Nutzer einstellen muss (etwa »intelligente« Fahrkartenautomaten), rückt die Erforschung der **Ergonomie des Geistes**³¹ ins Blickfeld. Mit Rücksicht auf die Ergebnisse der Kognitions- und Neurowissenschaften muss reflektiert werden, mit welchen formalen Modellen des Menschen die Maschinen arbeiten sollen. Den Maschinen, mit denen interagiert werden soll, muss eine »Vorstellung« davon mitgegeben werden, was Menschen sind, wie sie sich unterscheiden können und was sie gemeinsam haben, welche Logik ihren Handlungen und Aussagen zugrunde liegt. Ergonomie des Geistes meint die Umkehrung der Situation, in der der Mensch sich, um Technik bedienen zu können, auf diese einstellen und ihrer »Sprache« anpassen muss. Zu erforschen ist, wie Technik in Zukunft dem Menschen wirklich dienen kann. Die technische Umsetzung dieses Aspektes ist wiederum eng mit dem Prozess der Neuverortung des Menschen verknüpft.

Mensch-Maschine-Kultur

Mensch-Technik-Kooperationen haben ein hohes Potenzial, in vielen Lebensbereichen menschliche Handlungsräume zu erweitern. Voraussetzung ist jedoch eine adäquate gesellschaftliche Einbettung. Wenn Technik Funktionen zu übernehmen **scheint**, die bisher Menschen vorbehalten waren, wie Tutor, Kollege, Lehrer, Dienstleister, Kommunikationspartner, wenn etablierte Aufgabenteilungen zwischen Mensch und Technik in Frage gestellt werden, dann muss ein gesellschaftlicher Diskurs über das Verhältnis Mensch-Technik stattfinden.³² Dieser Diskurs kann von der Politik gefördert, in der Gesellschaft, von der Forschung und der Wissenschaft geführt und von der Wirtschaft aufgenommen werden. Technologiehypes und -euphorie gilt es vor dem Hintergrund von begründeten Vorbehalten bezüglich der technologischen Entwicklung kritisch zu hinterfragen. Ängste gegenüber Sicherheitstechnologien, Entfremdung oder gar Verdrängung durch Maschinen, wie sie etwa durch Science-Fiction-Dystopien populär werden, müssen differenziert aufgeklärt werden.

Transdisziplinäre Erforschung tatsächlich stattfindender und möglicher soziokultureller Einbettung von »Mensch-Technik-Kooperationen« können einen erheblichen Beitrag zu der Fundierung dieses Diskurses liefern.

Aktuelles Beispiel für eine solche Thematik sind Technologien des kognitiven »Enhancement«. Die Technologien, die unter diesem Begriff diskutiert werden,

³¹ Das Konzept »Ergonomie des Geistes« war ein Ergebnis des Workshops »Mensch-Technik-Grenzverschiebungen« (Karlsruhe, 27.05.2009), das Prof. Martin Gessmann einbrachte. Prof. Gessmann baut bis Herbst 2009 ein interdisziplinäres Zentrum für Phänomenologie und Neurowissenschaften in Heidelberg auf.

³² Vgl. Hubig 2008, vor allem Teil 1; Vgl. Levy 2005



werfen eine Reihe ethischer und rechtlicher Fragestellungen auf, die von Seiten der Ethik und Technikfolgenabschätzung schon des längeren thematisiert werden (Clausen 2009). Diese betreffen nicht nur spezifische Technologien oder Anwendungsfälle. Vielmehr zeichnet sich ein kultureller Wandel ab, für den angemessene institutionelle Rahmenbedingungen erst entwickelt werden müssen. Forschungen zu soziokulturellen Einbettungsweisen dieser Technologien können die nötige Grundlage für eine kritische Diskussionskultur liefern. So muss etwa der mit »Enhancement« Technologien einhergehende Wandel von Begriffen wie Leistung, Standard, normal, gesund und natürlich erforscht und damit einer gesellschaftlichen Diskussion zugänglich gemacht werden. In ähnlicher Weise stellen sich auch zu anderen hier diskutierten Technologien gesamtgesellschaftliche Fragestellungen.

Ein weiteres Forschungsthema das neue Formen der Mensch-Technik Kooperation auf der Makro-Ebene in den Blick nimmt, stellt sich im Zusammenhang mit dem »Internet der Dinge«³³. Zu untersuchen sind hier die kritischen Punkte der Koexistenz einer Gesellschaft von privaten Datensphären und einem System von vernetzten Dingen, der Kontrolle über die eigene Erreichbarkeit und Privatsphäre, der eigenen Datenhoheit und der rechtlichen Konsequenzen des Einsatzes von Avataren, also Agenten, die für uns im Netz z. B. Verträge abschließen. Konzepte wie das **digitale Territorium**³⁴ können hier die Interaktion mit dem Internet der Dinge vermitteln.

Ebenfalls zu erforschen wäre die Verteilung der Effekte neuer Mensch-Technik-Verhältnisse in der Gesellschaft. Dabei kommt dem Feld der Sozialstrukturanalyse und der Sozialpolitik die Aufgabe zu, Perspektiven der Verteilungsgerechtigkeit, der gesellschaftlichen Teilhabe, der gleichberechtigten Zugangs- und Nutzungschancen sowie der angemessenen Risikoverteilung einzubringen.

3.4 Warum ist das Zukunftsfeld relevant?

Das Potenzial von erfolgreichen funktionierenden Mensch-Technik-Teams ist weitreichend. Am Horizont stehen die Versprechen, menschliche Handlungsräume zu erweitern, Orientierung in Informationsräumen zu vereinfachen und den Menschen von Zwängen und Überforderungen zu entlasten. Die verschiedenen möglichen Mensch-Technik-Kooperationen stellen attraktive Lösungen für zahlreiche der drängenden Herausforderungen der Zukunft in Aussicht, bringen aber auch eigene neue Herausforderungen mit sich.

³³ Siehe das Internet der Dinge, BMBF Hightech Strategie, www.bmbf.de/pub/bmbf_hts_lang.pdf, S. 58).

³⁴ »Digital Territory« siehe Daskala, B. und Maghiros, I. (2006).



Wer oder was vermittelt wie zwischen den beiden Sphären? Wo ist mehr, wo weniger und wo gar keine Technik angebracht? Diese und ähnliche hier skizzierte Fragestellungen erfordern neue, integrierte Forschungsansätze, in denen Wissen über technische Prozesse und Wissen über menschliches Denken und Handeln gemeinsam weiterentwickelt wird. Je hybrider, komplexer und multidisziplinärer die Problemstellung ist, desto mehr muss eine potenzielle Lösungsstruktur sich dieser Situation anpassen. Die derzeitige Forschungslandschaft ist jedoch in dieser Hinsicht fragmentiert und daher nur bedingt in der Lage, sich den neuen Herausforderungen zu stellen (vgl. 1.5). Das Zukunftsfeld Mensch-Technik-Kooperationen spannt eine solche Lösungsstruktur auf. Sie bietet die erforderliche Integration von Wissen über den Menschen mit dem über die Technik und ermöglicht so den Eintritt in eine neue Qualität von Mensch-Technik-Kooperationen.

3.5 Akteure im Innovationssystem heute

Die Forschungslandschaft in Deutschland ist dicht besiedelt mit relevanten Akteuren und Gruppen, die in der Lage sind, die Entwicklung auf dem Gebiet der Mensch-Technik-Kooperationen entscheidend voranzubringen. Viele Forschungszweige, die zentral für das Zukunftsfeld sind, gehören zu Deutschlands Stärken, wie beispielsweise Robotik, Neurologie und Psychologie, Automatisierungstechnik und Maschinenbau.

In folgender Tabelle sind die Akteure aufgeführt, die sich derzeit mit Forschungsgegenständen beschäftigen, die auf vielfältige Weise für eine MTK-Forschung von Bedeutung sind. Die Typennummern werden in Abschnitt 3.6 *Zukunftsfähige Akteurskonstellationen* erläutert.

Akteure Mensch-Technik-Kooperationen

- | | |
|--|--|
| - Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. (BITKOM), Berlin (Typ 1) | - European Media Laboratory GmbH, Heidelberg (Intuitive multimodale Benutzerschnittstellen u. a.) (Typ 3) |
| - Charité Universitätsmedizin Berlin, Klinik für Neurologie (Prof. Dr. G. Curio) (Typ 1) | - Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Angewandte Informatik (IAI) (Typ 3) |
| - Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI), Forschungsbereich Sprachtechnologie (Prof. Dr. H. Uszkoreit), Saarbrücken (Typ 1) | - Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung (IITB), Karlsruhe (Typ 3) |
| - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Kommunikation und Navigation, Weßling (Typ 1) | - Fraunhofer-Institut für Integrierte Publikations- und Informationssysteme (IPSI), Darmstadt (Typ 3) |
| - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin ME, Köln (Typ 1) | - Hasso-Plattner-Institut für Softwaresystemtechnik GmbH, Fachbereiche Human Computer Interaction (Prof. Dr. P. Baudisch) (Typ 3) |
| - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Simulations- und Softwaretechnik (SISTEC), Köln (Typ 1) | - Humboldt Universität Berlin, Institut für Informationssysteme, Kognitive Robotik (Typ 3) |
| - Empolis GmbH, Kaiserslautern (Semantische Technologien) (Typ 1) | - Institut für Wissenschaft und Ethik (IWE), Bonn (Typ 3) |
| - Forschungszentrum Informatik (FZI), Karlsruhe (Typ 1) | - Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Abt. Wahrnehmung, Kognition und Handlung (Prof. Dr. H. H. Bülthoff), Tübingen (Typ 3) |
| - Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK), Berlin (Typ 1) | - Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Selbstständige Nachwuchsgruppe: Multisensorische Wahrnehmung und Handlung (Dr. M. Ernst) (Typ 3) |



- Fraunhofer-Institut für Rechnerarchitektur und Softwaretechnik (FIRST), Berlin (Typ 1)
- Fraunhofer-Institut für Software- und Systemtechnik (ISST), Berlin, Dortmund (Typ 1)
- Gesellschaft für Informatik e. V. (GI), Bonn (Typ 1)
- Gesellschaft für Technische Kommunikation e. V. (tekom), Stuttgart (Typ 1)
- Hertie-Institut für klinische Hirnforschung (HIH), Kognitive Neurologie, Tübingen (Typ 1)
- Intelligent Views GmbH, Darmstadt (Semantische Technologien)
- Klinik an der Technischen Universität München, Deutsches Herzzentrum München (DHM) (Typ 1)
- SAP Research Centers (SRC) und Campus-based Engineering Center (CEC); SRC Walldorf, CEC Darmstadt, CEC Dresden, CEC Karlsruhe (Typ 1)
- Technische Universität Braunschweig, Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund (Prof. Dr.-Ing. M. Beigl) (Typ 1)
- Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (Typ 1)
- Technische Universität München, Lehrstuhl für Informatik-anwendungen in der Medizin & Augmented Reality (Prof. Dr. N. Navab) (Typ 1)
- Technische Universität München, Lehrstuhl für Medientechnik (Typ 1)
- Technischen Universität München, Lehrstuhl für Raumfahrttechnik (Typ 1)
- Universität Berlin, Berlin School of Mind and Brain (Geistes-, Verhaltens-, Neurowissenschaften) (Typ 1)
- Universität Bielefeld, Centrum für Biotechnologie (CeBiTec) (Typ 1)
- Universität Karlsruhe, Institut für Sport und Sportwissenschaft (Typ 1)
- Universität Leipzig, Biotechnologisch-Biomedizinisches Zentrum (BBZ) (Typ 1)
- Universität Leipzig, DFG-Forschergruppe 742, Grammatik und Verarbeitung verbaler Argumente (Typ 1)
- Universität Leipzig, Innovation Center Computer Assisted Surgery (ICCAS) (Typ 1)
- Universität Leipzig, Translational Centre for Regenerative Medicine (TRM) (Typ 1)
- Universität Marburg, Fachbereich Mathematik und Informatik (Prof. Dr. B. Freisleben) (Typ 1)
- Universität München, Allgemeine Psychologie I (Typ 1)
- Universität Stuttgart, Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW, Prof. Dr.-Ing. A. Verl) (Typ 1)
- Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin (Typ 2)
- Biotechnologisches Zentrum Dresden, Exzellenzcluster Regenerative Therapien Dresden (CRTD) (Typ 2)
- Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, Halle/ Saale (Typ 2)
- Max-Planck-Institut für Informatik, Exzellenzcluster Multimodal Computing and Interaction, Saarbrücken (Typ 3)
- SFB 550, Erkennen, Lokalisieren, Handeln: Neurokognitive Mechanismen und ihre Flexibilität, Tübingen (Typ 3)
- Technische Universität Berlin, AG Maschinelles Lernen/ Intelligente Datenanalyse (Typ 3)
- Technische Universität München, Institute of Automatic Control Engineering (LSR, Prof. Buss) (Typ 3)
- Technische Universität München, Lehrstuhl für Angewandte Mechanik (Typ 3)
- Technische Universität München, Lehrstuhl für Datenverarbeitung (Typ 3)
- Technische Universität München, Lehrstuhl für Realzeit-Computersysteme (Typ 3)
- Technische Universität München, Robotics and Embedded Systems (Typ 3)
- Transregional Collaborative Research Center 28, Cognitive Automobiles (Typ 3)
- Universität Augsburg, Institut für Informatik, Lehrstuhl für Multimedia-Konzepte und Anwendungen (Prof. Dr. E. André) (Typ 3)
- Universität Bielefeld, Technische Fakultät, AG Angewandte Informatik (Typ 3)
- Universität Bonn, Institut für Informatik, Department of Computer Science III and IV (Typ 3)
- Universität Bremen, Technologie-Zentrum Informatik und Informatik-ontotechnik (TZI, Prof. Dr. R. Malaka) (Typ 3)
- Universität der Bundeswehr München, Institut für Arbeitswissenschaft (IfA), Neubiberg (Typ 3)
- Universität Karlsruhe, Institut für Betriebs- und Dialogsysteme, Dialogsysteme und grafische Datenverarbeitung (Typ 3)
- Universität Karlsruhe, Institut für Produktentwicklung (IPEK, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers) (Typ 3)
- Universität Karlsruhe, Institut für Prozessrechenstechnik, Automation und Robotik (Typ 3)
- Universität Karlsruhe, Institut für Technische Informatik (ITEC), Industrielle Anwendungen der Informatik und Mikrosystemtechnik (IAIM), (Prof. Dr.-Ing. R. Dillmann) (Typ 3)
- Universität Paderborn, Institut für Humanwissenschaften (Typ 3)
- Universität Siegen, Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik und neue Medien (Prof. Dr. V. Wulf) (Typ 3)
- Universität Stuttgart, Institut für Philosophie (Prof. Dr. Ch. Hubig) (Typ 3)
- Universität Tübingen, Fakultät für Biologie, Lehrstuhl für Kognitive Neurowissenschaft (Prof. Dr. H. A. Mallot) (Typ 3)
- Universität Würzburg, Institut für Informatik, Lehrstuhl für Informatik 6, Künstliche Intelligenz und Angewandte Informatik (Prof. Dr. F. Puppe) (Typ 3)
- Universitätsklinikum Bonn, Medizinische Fakultät, Zentrum für Nervenheilkunde, Abteilung für Medizinische Psychologie (Prof. Dr. med. Dr. phil. H. Walter) (Typ 3)
- Deutsche Servicerobotik Initiative (DESIRE) (Typ 4)
- Fraunhofer-Institut für Biomedizinische Technik (IBMT), St. Ingbert (Typ 4)



- Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech), München (Typ 2)	- Fraunhofer-Institut für Grafische Datenverarbeitung (IGD), Darmstadt (Typ 4)
- Deutsches Zentrum für Neurodegenerative Erkrankungen e. V. (DZNE), Bonn (Typ 2)	- ICT&S Center Advanced Studies and Research in Information and Communication Technologies & Society, Universität Salzburg (Typ 4)
- Forschungszentrum Jülich (FZJ) (Typ 2)	- Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Philosophie, New Field Group »Autonome technische Systeme« (Prof. Gutmann) (Typ 4)
- Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) (Typ 2)	- Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Institut für Anthropomatik (IFA), Intelligente Sensor-Aktor-Systeme (ISAS) (Typ 4)
- Georg-Simmel-Zentrum für Metropolenforschung, Berlin (Typ 2)	- SFB 453, Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion, München (Typ 4)
- Hasso-Plattner-Institut für Softwaresystemtechnik GmbH, School of Design Thinking (Prof. U. Weinberg) (Typ 2)	- SFB 588, Humanoide Roboter: Lernende und kooperierende modale Roboter, Karlsruhe (Typ 4)
- Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt, Neuherberg (Typ 2)	- Technische Universität Berlin, Graduiertenkolleg prometei (Prospektive Gestaltung von Mensch-Technik-Interaktion) (Typ 4)
- Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE), German Section (Typ 2)	- Technische Universität Berlin, Institut für Psychologie und Arbeitswissenschaften, Zentrum für Mensch-Maschine-Systeme (ZMMS, Prof. Dr.-Ing. M. Rötting) (Typ 4)
- Internationales Institut für Sozio-Informatik (IISI), Bonn (Typ 2)	- Technische Universität München, Cluster of Excellence Cognition for Technical Systems (CoTeSys) (Typ 4)
- Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, Berlin (Typ 2)	- Universität Bielefeld, Center of Excellence Cognitive Interaction Technology (CITEC) (Typ 4)
- Universität Berlin, Hermann von Helmholtz-Zentrum für Kulturtechnik (Typ 2)	- Universität Bielefeld, Research Institute for Cognition and Robotics (CoR-Lab) (Typ 4)
- Universität Frankfurt am Main, Exzellenzcluster »Die Herausbildung normativer Ordnungen« (Typ 2)	- Universität Heidelberg, Zentrum für Phänomenologie und Neurowissenschaften, im Aufbau bis Anfang 2010 (Prof. Dr. M. Gessmann) (Typ 4)
- Universität Leipzig, Institut für Biologie II, Forschungsbereich Gehirn, Kognition und Sprache (Typ 2)	- Universität Mainz, Philosophisches Seminar, Interdisziplinärer Forschungsschwerpunkt Neurowissenschaften (IFSN) und Arbeitsbereich Neuroethik (Prof. Dr. T. Metzinger) (Typ 4)
- Universität Osnabrück, Institut für Kognitionswissenschaft (Prof. Dr. P. König) (Typ 2)	- Universität Tübingen, Interfakultäres Zentrum für Ethik in den Wissenschaften (IZEW) (Typ 4)
- Universität Stuttgart, Internationales Zentrum für Kultur und Technikforschung (IZKT, Prof. Maag) (Typ 2)	
- Zentrum für Bioinformatik Saar (ZBI), Saarbrücken (Typ 2)	
- Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI), Bremen, Robotics Innovation Center (Prof. Dr. F. Kirchner) (Typ 3)	
- Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI), Saarbrücken, Agenten und Simulierte Realität (Prof. Dr. P. Slussalek) (Typ 3)	
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Robotik und Mechatronik, Weßling (Typ 3)	

Tabelle 1: Akteure Mensch-Technik-Kooperationen im Jahr 2009

3.6 Zukunftsfähige Akteurskonstellationen

Viele der Forschungseinrichtungen sind auf ihrem Gebiet internationale Spitze. Um allerdings die neue Komplexität angehen zu können, wie sie in der Forschungsperspektive der Mensch-Technik-Kooperationen erscheint, müssen einige strukturelle Veränderungen in Angriff genommen werden.

Im Rahmen unserer Potenzialanalyse werden jene Akteure dargestellt, die ein großes Potenzial für tragfähige Kooperationen im Bereich des MTK-Feldes aufweisen. Diese Akteure sind in unterschiedlichem Maße *zukunftsfähig* im spezifischen Kontext einer MTK-Forschung. Um die sachbedingt heterogenen Ergebnisse zu strukturieren, wurde eine Typisierung anhand von zwei Parametern vorgenommen. Diese Typisierung liefert eine Richtschnur für sinnvolle tragfähige



ge Akteurskonstellationen. Schließlich folgen aus Zusammenstellung und Typisierung der Akteure Schlussfolgerungen und Empfehlungen.

Die Analyse für potenzielle Partnerschaften in Deutschland für MTK-Forschung hat eine sehr heterogene Gruppe von Akteuren ergeben, die alle in Bezug auf das Thema relevant sind. Aufgelistet werden nur Akteure, die bereits von ihrer disziplinären Vielfalt oder ihren thematischen Schwerpunkten her eine gewisse Nähe zum neuen Zukunftsfeld aufweisen. Natürlich haben darüber hinaus viele weitere Bereiche Einfluss auf die Forschung und Entwicklung der neuen Perspektive; es konnte jedoch nicht Anliegen der Potenzialanalyse sein, eine umfassende Auflistung jeder möglichen Abhängigkeit im deutschen Forschungssystem zu erstellen. Um zu sinnvollen potenziellen Partnerschaften zu gelangen, war es wichtig, nur den **engeren Kreis** an relevanten Akteuren aufzunehmen. Die Forschungsbereiche, in denen diese Akteure agieren, sind auf dem äußeren Ring von Abbildung 4 aufgeführt.

Beispielsweise sind **Autonome Robotik** und **Teleaktion** als Forschungsbereiche aufgeführt, Mechatronik, Maschinenbau und Physik aber nicht. Diese wichtigen, aber allgemeineren Bereiche sind sozusagen auf einem Ring außerhalb der Darstellung zu denken. Genauso sind Akteure dieser Bereiche nicht etwa irrelevant, sondern nur, was die Darstellung in dieser Potenzialanalyse betrifft, nicht mehr innerhalb des dargestellten Bildes.

Clusterung in Akteurstypen

Alle aufgenommenen Akteure wurden nach zwei Parametern geclustert: zum einen nach ihrer **disziplinären Diversität** und zum anderen nach ihrer thematischen **Nähe zur MTK-Perspektive**.

Das Maß der Interdisziplinarität und der Integration verschiedener Wissensbereiche eines Forschungszusammenhangs muss der Vielseitigkeit des Forschungsgegenstandes entsprechen. Wie bereits deutlich wurde, verlangt Mensch-Technik-Forschung per definitionem die Integration von sehr unterschiedlichen Disziplinen. Das Maß der **disziplinären Diversität** ist ein entscheidender Faktor, um sich für das neue Zukunftsfeld zu qualifizieren.

Des Weiteren finden sich in der gegenwärtigen Forschungslandschaft viele Akteure, deren Forschungsgegenstände eine Schlüsselrolle für weitere Entwicklungen auf dem Weg zur neuen Forschungsperspektive einnehmen, ohne jedoch bereits die spezifische Perspektive des MTK-Feldes erkennen zu lassen. So sind etwa Fortschritte auf dem Gebiet der Semantischen Technologien wegbereitend für weite Bereiche der MTK-Forschung; die thematische **Nähe zur MTK-Perspektive** jedoch hängt von weiteren Aspekten ab, von den Auswir-



kungen auf das Verhältnis von Mensch und Technik etwa oder dem Potenzial, das menschliche Selbstverständnis fundamental zu beeinflussen.

→ Nähe zur MTK-Perspektive →	Akteure Typ 3	Akteure Typ 4
	Akteure Typ 1	Akteure Typ 2
	→ Disziplinäre Diversität →	

Abbildung 6: Vier Cluster der Akteurstypen

Abbildung 6 zeigt die vier Cluster, die sich ergeben, wenn diese beiden Parameter als Achsen angelegt werden.

Akteure des Typs 1 weisen eine geringe disziplinäre Diversität auf und haben eine relativ große Distanz zur MTK-Perspektive. Das heißt, Typ-1-Akteure erforschen eher die Grundlagen des Zukunftsfeldes und sind entweder Einzeldisziplinen oder aus sehr benachbarten Disziplinen zusammengesetzt. Beispielsweise sind dies Informatik- oder Technik-Institute, »Semantic-Technology«-Entwickler oder Kliniken.

Akteure des Typs 2 haben eine ähnliche Distanz zur MTK-Perspektive, kooperieren aber stärker mit anderen und weiter entfernten Disziplinen. Hier finden sich – allein schon wegen ihrer Organisationsstruktur – eher Akademien, Zentren, Netzwerke, Exzellenzcluster und Institute, die das Potenzial weiter interdisziplinärer Kooperation erkannt und umgesetzt haben.

Typ-3-Akteure adressieren Forschungsgegenstände, die nahe an den Bereich der MTK-Forschung herankommen und spezifisch an potenziellen Kernbereichen des Zukunftsfeldes arbeiten. Allerdings sind dies wiederum einzeldisziplinäre Akteure oder solche, die in schwacher bzw. enger Interdisziplinarität forschen, nicht die geforderte Perspektivenbreite und neue Qualität an integrierter Forschung umsetzen: Akteure im Bereich Robotik, Software Agenten, Maschinelles Lernen oder »Embedded Systems«

Akteure des Typs 4 schließlich forschen, wie die des Typs 2, in großer disziplinärer Diversität und adressieren, wie die Akteure des Typs 3, ein zentrales Forschungsthema bzw. zentrale Forschungsthemen des Zukunftsfeldes.



Die vier Akteurstypen lassen sich in der oben verwendeten Darstellung (Abbildung 6) verorten. In Abbildung 7 sind sie mit den entsprechenden Ziffern 1 bis 4 eingetragen, wobei »1« die Typ-1-Akteure lokalisiert, die einem einzelnen Forschungsgebiet zugeordnet werden können, »2« die interdisziplinäre Kooperation mehrerer Forschungsgebiete anzeigt (Typ-2-Akteure), »3« auf eine konkrete Verbindung einer Einzeldisziplin mit einem der Kernthemen im Zentrum verweist (Typ-3-Akteure) und »4« interdisziplinär angegangene Forschungsvorhaben mit hohem Zukunftspotenzial für die MTK-Perspektive anzeigt (Typ-4-Akteure).

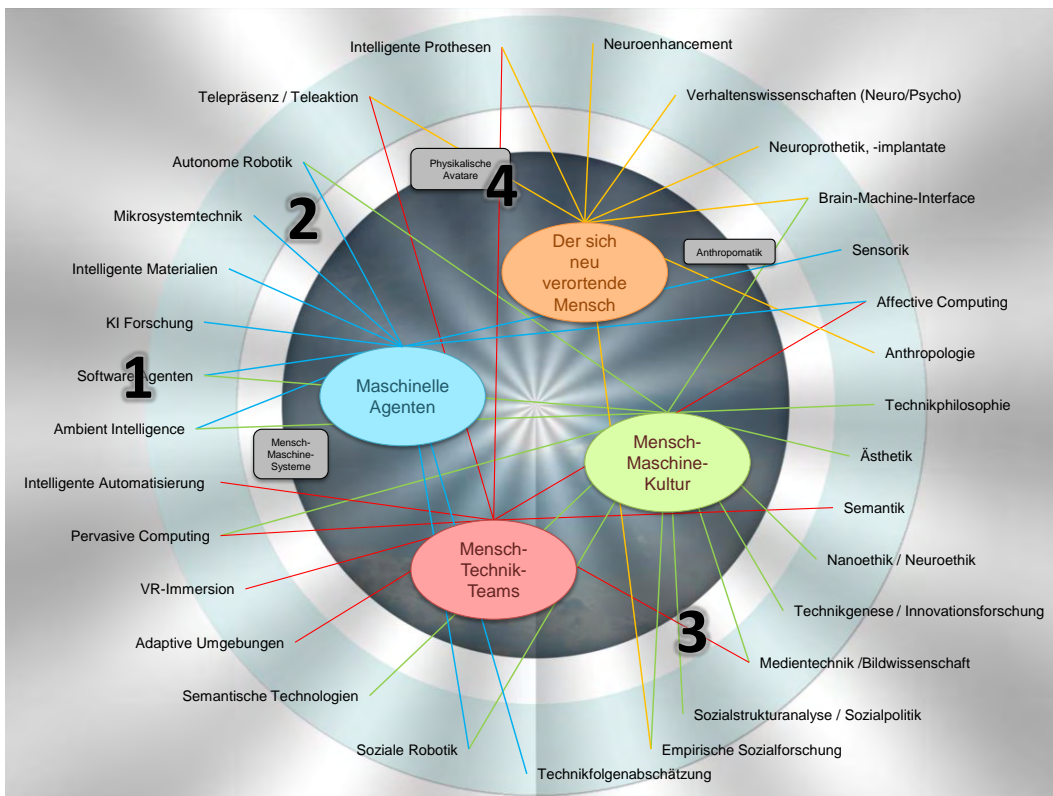


Abbildung 7: Akteurstypen, den zukünftigen Forschungsrichtungen zugeordnet

Schlussfolgerungen

Die unterschiedliche Anzahl der Akteure der einzelnen Typen lässt einige Aussagen über die Forschungslandschaft in Deutschland in Bezug auf das Zukunftsfeld zu.

Die Gruppe mit geringerer disziplinärer Diversität (Typ 1 und 3) ist fast dreimal so groß wie die Gruppe der interdisziplinär forschenden. Dabei handelt es sich bei allen Akteuren bereits um den engeren Kreis der nach thematischen Kriteri-



en ausgewählten Akteure. Die Forderung der Wissensintegration als Bedingung für Spitzenforschung in neuen komplexen Gebieten ist also noch nicht auf breiter Basis in der Forschungsstruktur verankert, auch wenn sich zumindest ein Bewusstsein für die Notwendigkeit fachübergreifender Forschung durchzusetzen scheint. Dennoch ist es nach Einschätzung sämtlicher im Rahmen des Foresight-Prozesses befragter Akteure nach wie vor äußerst schwierig, gegen gewachsene Grenzen zu agieren und den zunächst hohen Mehraufwand an Integration und Kommunikation zu leisten.³⁵ Vor allem die beiden großen Wissensbereiche der Technikwissenschaften und der Sozial- und Geisteswissenschaften müssen in der Praxis näher zusammenrücken.

Auch die Aufteilung anhand der Nähe zur MTK-Perspektive zeigt, wie weit der Weg zum beschriebenen neuen Zukunftsfeld noch ist. Es zeigt sich, dass selbst unter jenen Akteuren, die nah genug am Thema sind, um in der Liste der identifizierten Akteure zu erscheinen, der deutlich größere Teil im Vergleich zu einigen Vorreitern immer noch weit von zentralen Fragestellungen des MTK-Feldes entfernt ist.

Die wenigen Akteure des Typs 4 zeigen am ehesten das Potenzial, in den Kern des Feldes Mensch-Technik-Kooperationen mit seinen zentralen Forschungsbereichen (Abbildung 7, Kreis in der Mitte) vorzudringen. Aber diese Gruppe ist verhältnismäßig klein und auch noch wesentliche Schritte davon entfernt, im Sinne einer neuen Qualität von integrierter Forschung im komplexen Zukunftsfeld aktiv und kreativ werden zu können.

Es ist zur Umsetzung des MTK-Forschungsbedarfs Grundlegenderes nötig als die reine Erhöhung der disziplinären Diversität. Einige mögliche Schritte, anstehende Aufgaben und weiterführende Empfehlungen folgen daher in Abschnitt 3.7.

³⁵ Beispielhaft sei auf die jüngste Veröffentlichung der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften acatech (2009) zu »Intelligenten Objekten« (ein Teilbereich der MTK-Forschung) verwiesen. Dort lautet eine Empfehlung **Verstärkte Interdisziplinarität** (S. 34). Folgende Aussage über Intelligente Objekte gilt auch für den Gesamtbereich MTK:

»Die Entwicklung von Intelligenten Objekten wird typischerweise nicht von einer einzigen Fachdisziplin geleistet. Kenntnisse und Kompetenzen einer Vielzahl von Fachrichtungen müssen zusammenfließen. An vielen Entwicklungsprojekten sind allerdings ausschließlich technische Disziplinen beteiligt, die zudem häufig verwandt oder benachbart sind.

> acatech empfiehlt: Die besondere gesellschaftliche Relevanz der Entwicklungen im Bereich der Intelligenten Objekte macht eine verstärkte sozial- und geisteswissenschaftliche Begleitung notwendig. Es ist insbesondere eine möglichst direkte Beteiligung der nicht-technischen Disziplinen an der Produktentwicklung im Sinne eines nutzerorientierten Designs wünschenswert. Sozial- und Geisteswissenschaften sollten gemeinsam mit den Technikwissenschaften an der Produktentstehung und der Produkterprobung mitwirken. Das Mühevollste solcher Auseinandersetzungen und Projekte ist bekannt. Trotzdem ist diese interdisziplinäre Integration die beste Möglichkeit, eine unreflektiert betriebene Technikentwicklung zu vermeiden, die an den Wünschen, Bedürfnissen und kulturellen Werten vorbeigeht und damit letztlich auch zu wirtschaftlichen Verlusten führen kann.« (Acatech 2009a, S. 34)

In der Diskussion am acatech-Forum vom 28.05.2009 brachten alle Referenten (siehe Quellen) das Bedürfnis nach und die Probleme im Umgang mit Interdisziplinarität zur Sprache.



3.7 Empfehlungen

Im Sinne der hier vorgenommenen Strukturierung des komplexen Akteursfeldes zeichnen sich aus Sicht der Themenkoordinatoren folgende Aufgaben ab:

- Akteure des Typs 1, 2 und 3 auf dem Weg zu einer Ausprägung des Typs 4 systematisch unterstützen,
- Vordringen der Typ-4-Akteure zu den Kernbereichen des Zukunftsfeldes ermöglichen,
- Akteure jeden Typs für den direkten Sprung auf die neue Forschungsebene vorbereiten,
- Gründung neuer Institutionen und Integration jener Akteure, die noch außerhalb des hier dargestellten Rahmens liegen und sich noch weniger als die Gruppe Typ 1 und 2 an der MTK-Forschung beteiligen, hier aber dringend gebraucht werden.

Um allen Akteuren die Grenze zum inneren Kreis des Zukunftsfeldes zu öffnen, müssen aus Sicht der Themenkoordinatoren Vermittlungsprozesse koordiniert, Integration gefördert, Institutionen, Strukturen, Organisationen reorganisiert und – wo nötig – neu gegründet werden. Folgende Punkte sind nach Auffassung von Experten die Bedingungen für eine neue Qualität an Forschung:

- weitere und breitere Vernetzung über eine Vielzahl von Disziplinen (technische und nicht technische) hinweg,
- gänzlichliches Auflösen einiger Fachgrenzen, um die Fusion neuer, adäquater Disziplinen herbeizuführen,
- institutionelle und strukturelle Weichenstellung, um Wissensintegration aus bisher separaten und inkompatiblen Wissenssphären zu ermöglichen,
- Diffusion der speziellen Perspektive, die das Zusammenspiel des menschlichen und technischen Wandels in den Mittelpunkt rückt, damit Einzelentwicklungen im Bezug auf ihren Mensch-Technik-Gesamtzusammenhang begriffen werden.

Strategische Dialoge könnten aus Sicht der Themenkoordinatoren wichtige Verständigungsprozesse leisten. Die allgemein als unentbehrlich bewerteten grundsätzlichen Begriffsdebatten, die eine gelingende Wissensintegration bedingen, könnten hier geführt werden.

Themenkoordination:

Dr. Philine Warnke, ISI (philine.warnke@isi.fraunhofer.de) und
Bruno Gransche, ISI (bruno.gransche@isi.fraunhofer.de)



4 Das Altern entschlüsseln

Altern bezieht sich auf die gesamte Lebensspanne und ist ein multifaktorielles Geschehen. Einige der Alternsprozesse bilden die Ursache für Störungen oder Krankheiten. Bisher sind die biologischen Prozesse des Alterns und der Entwicklung des Gehirns (z. B. Änderungen in der Neuroplastizität) im Verlauf des Lebens nur in Ansätzen geklärt. Erkenntnisse aus der zellulären und molekularen Entwicklungsbiologie werden neue Einblicke in kognitive, emotionale und psychomotorische Abläufe liefern.

Da sich derzeit neue Institutionen im Aufbau befinden, ist zu erwarten, dass in 15 Jahren Forschungsergebnisse vorliegen, die in neue Produkte und Dienstleistungen umgesetzt werden: z. B. innovative Pharmazeutika (Simulation einer Kalorienreduzierung u. a.), Absicherung von Langlebigkeitsrisiken oder lebensphasengerechte Lernprodukte. Möglicherweise werden auch Reparaturmechanismen auf DNA-Ebene entdeckt und therapeutisch (z. B. zur Krebsbehandlung) genutzt.

4.1 Das Zukunftsfeld

Die Alternsforschung hat bereits eine lange wissenschaftliche Tradition, vor allem in den Disziplinen der Psychologie und Soziologie (Lehr 2007). Durch die rasanten Entwicklungen in den Biowissenschaften hat die Alternsforschung jedoch neue Impulse erhalten (Gruss 2007). Dabei geht es weniger um den demografischen Wandel als vielmehr um die biologischen Prozesse des Alterns, die Auswirkungen dieser Alterungsprozesse in allen Phasen des Lebens und die Innovationspotenziale, die sich aus diesen Entwicklungen ergeben können. Die Untersuchung der wissenschaftlichen Fundierung dieser Entwicklungen ergab jedoch, dass viele Grundlagenfragen noch nicht geklärt sind. Das betrifft insbesondere die Frage, wie Alterungsprozesse tatsächlich ablaufen – hierauf legt die biogerontologische Forschung ihren Schwerpunkt.

Die **Biogerontologie** stellt ein Teilgebiet der Entwicklungsbiologie dar, das sich mit der Erforschung der Ursachen und Mechanismen des biologischen Alterns und deren Folgen beschäftigt (Ahlert 1999). Sie ist eine wichtige Grundlagendisziplin der **Gerontologie**, daher findet sich auch der Name »biologische Gerontologie«. Daneben existieren drei weitere Hauptforschungsbereiche in der Gerontologie: die Gerontopsychologie, die Gerontosoziologie und die Geriatrie (Rieber 2005). Letztere stellt die Lehre von den Krankheiten des alternden Menschen dar, auch als Alters- oder Altenmedizin bezeichnet.



Der **Unterschied zwischen Altern und Alter** ist für die Altersforschung von großer Bedeutung (Kruse 2007): **Altern** beschreibt einen lebenslangen Prozess, der von kontinuierlich verlaufenden Veränderungen des Organismus und fortschreitender Wandlung bestimmt ist; **Alter** stellt eine eigene Lebensphase dar. In welchem Lebensalter diese Lebensphase erreicht wird, ist nicht nur von den Veränderungen abhängig, die im Prozess des Alterns auftreten, sondern ist auch das Ergebnis gesellschaftlicher Konventionen.

Die Analyse des Zukunftsfeldes hat gezeigt, dass eine Reduktion und Zuspitzung des Phänomens Altern nur auf das höhere Lebensalter nicht zielführend ist: Sowohl Wissenschaft als auch Politik haben den demografischen Wandel und dessen Auswirkungen als einen gesellschaftlichen Megatrend erkannt, sodass in den letzten Jahren vermehrt Forschungsaktivitäten zur Lebensphase »Alter« zu beobachten sind. In Expertengesprächen wurde angeregt, dass in dem Zukunftsfeld »Das Altern entschlüsseln« die gesamten Lebens- und Alterungsprozesse mittels einer multiperspektivischen und transdisziplinären Sichtweise erforscht werden sollten. Im Vordergrund sollten hierbei die **Entwicklungsprozesse von jung zu alt** stehen und nicht ausschließlich »ältere Menschen«.

Das Zukunftsfeld »Altersforschung« bzw. »Das Altern entschlüsseln« wird treffend und knapp durch die programmatische Äußerung des Präsidenten der Max-Planck-Gesellschaft Prof. Gruss beschrieben: **Die Altersforschung untersucht mithilfe eines systemischen und interdisziplinären Ansatzes die Ursachen und Mechanismen des Alterns** (Gruss 2007). Dabei sollte der Fokus möglichst breit angelegt sein und neben molekular- und zellbiologischen Disziplinen auch Wissenschaftsgebiete und Forschungsfelder wie beispielsweise die Epigenetik, die Lebenslaufforschung und die Kognitionswissenschaften berücksichtigen.

Eine Sonderstellung innerhalb der Altersforschung nimmt die **Entwicklung des Gehirns** und seiner Plastizität in verschiedenen Lebensphasen ein, deren molekulare und biologische Grundlagen (**Entwicklungsneurobiologie**) und die daraus erwachsenden Konsequenzen für Lehren und Lernen. Dies ist auf die besondere Bedeutung der Kognition und des menschlichen Bewusstseins für die »Alltagskompetenz« des Menschen zurückzuführen, wobei dem Funktionserhalt von der vorgeburtlichen Entwicklung bis ins hohe Lebensalter eine große Bedeutung zukommt.

4.2 Ausgangssituation im Zukunftsfeld heute (2009)

Trotz zunehmender Kenntnis über **biologische Alterungsprozesse** – meist bei Modellorganismen – besteht weiterhin Unklarheit über die genauen Ursachen des Alterns. Die Klärung der zugrunde liegenden Mechanismen des Alterns hat **Implikationen** sowohl für das Verständnis der **frühkindlichen Ent-**



wicklungsphasen (z. B. Unterstützung der Reifungsprozesse) und die **gerontologische Forschung** (z. B. aktives Altern und Präventivmedizin) als auch für die **Gesellschaft** (z. B. gesellschaftliche Implikationen der Langlebigkeit und Beschleunigung des demografischen Wandels).

Es existieren mehrere Hundert Theorien über das Altern, die meistens genetische, zellbiologische oder evolutionsbezogene Erklärungsmuster sowie Abnutzungs- und Verschleißerscheinungen als Ursache postulieren (Bengtson et al. 2009; Medvedev 1990). Altern lässt sich nach dem heutigen Stand des Wissens nicht mit einer Theorie allein erklären, vielmehr scheint es sich um einen multifaktoriellen, komplexen Prozess zu handeln, bei dem individuelle Faktoren eine Rolle spielen (Wickens 2001).

Die Individualität des Alterns beruht auf der genetischen Ausstattung, den Umweltbedingungen und der Variation der intrinsischen stochastischen Schädigung, bei der Schäden innerhalb der Zelle akkumulieren (Brosche, Sieber 2003). Die experimentelle Biogerontologie befasst sich mit den molekularen Mechanismen des Alterns. Hierzu zählen u. a. die Suche nach Langlebigkeitsgenen, die Identifizierung von Reparaturmechanismen innerhalb der Zelle oder die Potenziale von pluripotenten Stammzellen. Mittlerweile werden Interventionen in den biologischen Alterungsprozess als reale Möglichkeit anerkannt und wissenschaftlich diskutiert (Baltes 2002; Gruss 2007; Knell, Weber 2009; Lucke, Hall 2005; The President's Council on Bioethics, Kass L. R. 2003). Für die Entwicklung von biologischen Techniken zur Beeinflussung von Alterungsprozessen wird der Begriff der **Biogerontechnologie** vorgeschlagen (Juengst et al. 2003; SRI Consulting Business Intelligence 2008). Dies ist nicht zu verwechseln mit der Gerontechnologie, die sich mit Produkten und Dienstleistungen beschäftigt, die speziell für die Bedürfnisse älterer Menschen konzipiert werden (Gassmann, Reepmeyer 2004). Zum gegenwärtigen Zeitpunkt bleibt das Projekt einer signifikanten Verlängerung der menschlichen Lebensspanne durch eine mögliche High-Tech-Medizin der Zukunft noch weitgehend spekulativ (Knell, Weber 2009). Seine Realisierungschancen sind unter Biowissenschaftlern umstritten und werden von etlichen Forschern nach wie vor skeptisch gesehen (Olshansky et al. 2002). Bisher wird die Debatte über die möglichen Implikationen, die sich daraus ergäben, vorwiegend in den angelsächsischen Ländern geführt (Knell, Weber 2009; The President's Council on Bioethics, Kass L. R. 2003). Bereits jetzt ist deutlich, dass sich viele ethische, religiöse, sogar wirtschaftliche Fragen stellen werden.

Die **Prävalenz vieler Erkrankungen** ist oftmals mit einem höheren Lebensalter gekoppelt («Alter und Krankheit sind zwei Seiten der gleichen Medaille»). Es besteht also die berechtigte Hoffnung, dass mit einem besseren Verständnis der Alterungsprozesse im menschlichen Organismus auch neue Erkenntnisse über



die Pathomechanismen von unterschiedlichen Leiden gewonnen werden können.

Ausgewählte Erkrankungen, bei denen ein höheres Alter einen Risikofaktor darstellt, und Alterserscheinungen sind:

- Arthrose
- Stoffwechselstörungen, z. B. Diabetes mellitus Typ II
- Hörstörungen
- Katarakt, Makuladegeneration
- Hautalterung, Wundheilungsstörungen
- Kardiovaskuläre Erkrankungen (Herzinfarkt, Schlaganfall)
- Krebserkrankungen
- Neurodegenerative Erkrankungen, z. B. Alzheimer Demenz, Morbus Parkinson

Im Zusammenhang mit den chronischen Erkrankungen, die in allen Industrieländern zunehmen, machen sich Morbidität und Mortalität erst über einen längeren Zeitraum bemerkbar. Deshalb scheinen jene Strategien zur Prävention am erfolgversprechendsten, die möglichst früh beginnen (Sachverständigenrat zur Begutachtung der Entwicklung im Gesundheitswesen 2009). Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass in bestimmten Lebensphasen – durchaus schon prä- und perinatal – in Kombination mit der genetischen Ausstattung und äußeren Einflüssen Weichen für bestimmte Erkrankungen gestellt werden.

Da es sich zumeist um Erkrankungen handelt, die die Lebensqualität sehr stark einschränken können und/ oder eine immense epidemiologische Bedeutung haben, ist zu erwarten, dass die Erkenntnisse aus der Altersforschung auch zeitnah in therapeutische Produkte und Dienstleistungen überführt werden.

Die Entwicklungsneurobiologie des menschlichen Gehirns zeigt, dass dessen Plastizität über die Lebensspanne hinweg erhalten bleiben kann, worunter die Neurowissenschaft die Fähigkeit des menschlichen Gehirns versteht, sich an wandelnde Umwelanforderungen durch 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 kritischen Entwicklungsphase des Gehirns für möglich. Neuere Forschungsergebnisse zeigen jedoch, dass diese Aussage so pauschal nicht haltbar ist (Dinse, Eysel 2003). Zwar zeigt sich zum Teil eine Abnahme kognitiver Leistungen mit zunehmendem Alter. Prozessorientierte Fähigkeiten, die so genannte fluide Intelligenz, werden



vor allem 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 (kristalline Intelligenz), desto leichter kann aber auch einem möglichen Abbau der Hirnleistung entgegen gewirkt werden. Voraussetzung ist, dass keine neurodegenerative Erkrankung, wie z. B. eine Alzheimer-Demenz, auftritt (Anderton 2002). Generell beschäftigt sich die Entwicklungsneurobiologie mit der Entstehung und Reifung von Nervensystemen (Neurogenese). Hauptkenntnisse der institutionalisierten Entwicklungsneurobiologie beziehen sich auf die Produktion und Funktion von Botenstoffen im Gehirn.

4.3 Langfristperspektive des Zukunftsfeldes

Eine Verlängerung der Lebens- und Gesundheitsspanne³⁶ kann auf dreierlei Weise erfolgen (Knell, Weber 2009; The President's Council on Bioethics, Kass L. R. 2003):

1. durch Maßnahmen, die die Todesursachen bei jungen Menschen und bei Menschen mittleren Alters bekämpfen (z. B. Senkung der Säuglingssterblichkeit, Erhöhung der Impfraten). Diese Maßnahmen haben in den letzten hundert Jahren zu einem deutlichen Anstieg der Lebenserwartung insbesondere in den Industrieländern geführt.
 2. indem man das Auftreten sowie die Schwere der Erkrankung und Beeinträchtigung älterer Menschen reduziert und ggf. Gewebe und Organe ersetzt oder Substanzen substituiert (z. B. Gelenkersatz, Dialysebehandlung, Insulinsubstitution bei Diabetes mellitus). Dies geschieht zurzeit in der Medizin und führt ebenfalls zu einer Erhöhung der durchschnittlichen Lebenserwartung.
 3. durch eine Vorgehensweise, bei der die Auswirkungen der Seneszenz in allgemeinerer Form abgemildert oder verzögert werden, indem man **in den generellen Prozess oder in die Prozesse des Alterns eingreift** und dabei potenziell nicht nur die durchschnittliche, sondern auch die maximale Lebens- und Gesundheitsspanne verlängert. Die hierfür eingesetzte **Biogerontechnologie** wurde auf einer 2008 stattfindenden Konferenz des National Intelligence Council der USA als eine von sechs disruptiven Technologien für das Jahr 2025 identifiziert (SRI Consulting Business Intelligence 2008).
- Obwohl auch bei den ersten beiden Punkten weitere Fortschritte mit erwartbaren Folgen zu erwarten sind, so wird primär der dritte Punkt zu weitreichenden Konsequenzen führen, sobald der Forschung in diesem Be-

³⁶ Zeitspanne, die ein Mensch weitgehend unbehindert von Krankheiten verbringt.

reich substantielle Durchbrüche gelingen. Denn dann werden sich Fragen auf individueller und kollektiver Ebene stellen (z. B. wer in den Genuss derartiger Behandlungen kommen darf, wer sie sich leisten kann, wie die gesamte demografische Veränderung aussehen wird usw.). Insgesamt werden in dem Zukunftsfeld »Das Altern entschlüsseln« u. a. folgende Forschungsfragen in den nächsten Jahr(zehnt)en zu klären sein:

- Wie läuft der individuelle Alterungsprozess ab und wie ist er zu beeinflussen?
- In welchem Zusammenhang stehen Altern und Krankheit? Können Erkenntnisse in einem Gebiet andere Forschungsbereiche befruchten (z. B. bei neurodegenerativen Erkrankungen)? Welche Erkenntnisse ergeben sich aus diesem Zusammenhang für die Prävention?
- Was sind – neben Umweltfaktoren und z. B. dem Rauchverhalten – die Ursachen dafür, dass es beim Alterungsprozess erhebliche Unterschiede zwischen den Geschlechtern gibt?
- Können Reparaturmechanismen auf DNA-Ebene aufgeklärt und präventiv oder therapeutisch (z. B. zur Krebsbehandlung) genutzt werden?
- Wird lediglich die Lebensspanne verlängert oder kann ggf. auch die Gesundheitsspanne signifikant verlängert werden?
- Welche innovativen Produkte und Dienstleistungen werden sich aus den Forschungsergebnissen ableiten lassen (z. B. Pharmazeutika, die eine kalorische Restriktion simulieren; Absicherung von Langlebkeitsrisiken)?
- Welche ökonomischen und gesellschaftlichen Auswirkungen hat die Langlebigkeit, insbesondere, wenn es gelingen sollte, die Lebens- und Gesundheitsspanne relevant zu strecken?³⁷ Welche weiteren gesellschaftlichen Fragen ergeben sich im Zusammenhang mit der Entschlüsselung des Alterns?
- Wie verändern sich Arbeitsprozesse und Altersbilder als Folge einer verlängerten Lebens- und Gesundheitsspanne (individuell, betrieblich, gesellschaftlich)?
- In welcher Weise ist das Gehirn in der Lage, auf veränderte Lebensumstände in unterschiedlichen Lebensphasen zu reagieren? Welche entwicklungsphysiologischen Korrelate liegen dem zugrunde?
- Welche Mechanismen des Lernens können die Neurowissenschaften identifizieren? Wie kann lebenslanges Lernen stimuliert werden und wie sollten sinnvolle Lernsettings aussehen (z. B. frühkindliche Lernprodukte; Geragogik zur Unterstützung des Lernens im höheren Alter)?

³⁷ Diesem Thema wurde in der Online-Befragung eine besonders hohe Relevanz (auch für die Wirtschaft) bescheinigt.



- Wie kann Lernen unter den Bedingungen zunehmender Belastung (»Verdichtung« von Arbeitsprozessen, Informationsflut) gefördert werden?
- Was kann die Politik tun, um den Transfer von neuem Wissen über (gesundes) Altern in die Praxis der Kinderbetreuung bis hin zur Altenpflege nachhaltig zu verbessern?

Neben diesen Forschungsfragen ergeben sich auch neue ethische Debatten und politische Diskurse sowie Forschungsfragen zu den ökonomischen, juristischen und gesellschaftlichen Auswirkungen der Langlebigkeit. Es existieren Überlappungen mit den neuen Zukunftsfeldern Mensch-Technik-Kooperationen und Zeitforschung (siehe Abbildung 8).

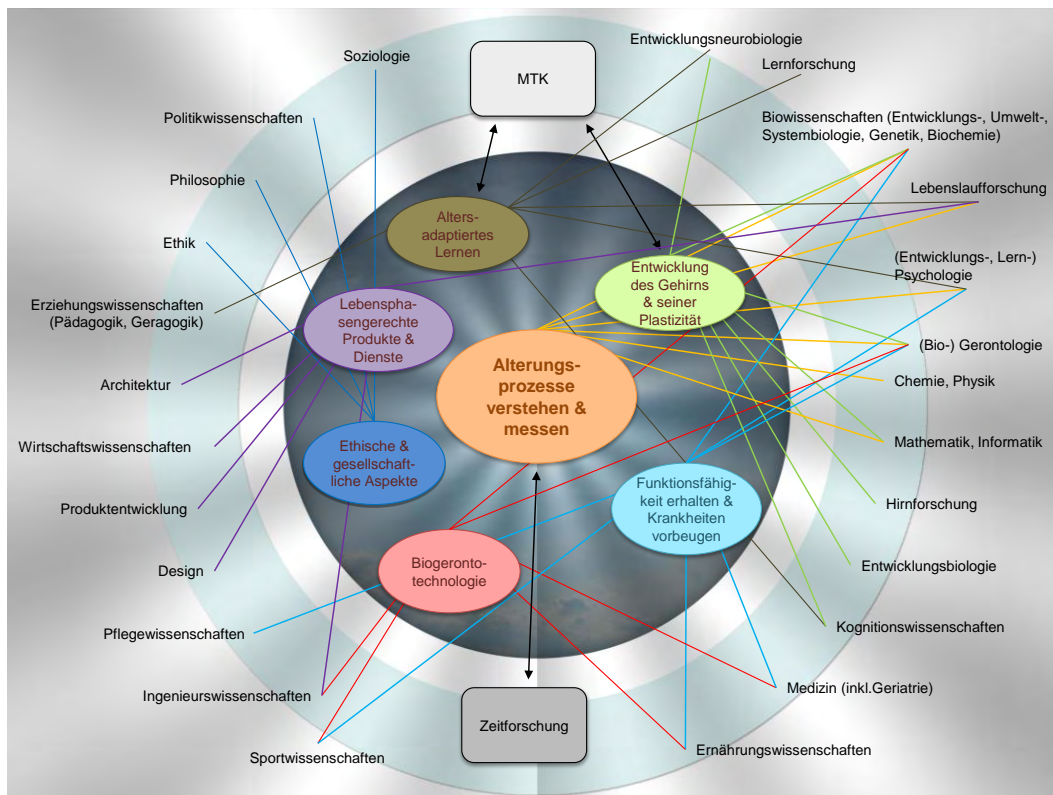


Abbildung 8: Zukünftig beteiligte Forschungsrichtungen

Abbildung 9 zeigt zukünftige Forschungsfelder und Anwendungspotenziale der Altersforschung. Daneben wird Altersforschung Auswirkungen auf die Erkennung und Behandlung von Krebs- und neurodegenerativen Erkrankungen haben. Neben Gender-Aspekten und spezifischen Genkonstellationen wird das biologische Alter einen wichtigen Indikator in der individualisierten Medizin darstellen. Auf dem Weg der Entschlüsselung des Alterns werden viele sozialwissenschaftliche, politische und ethische Fragestellungen aufkommen.

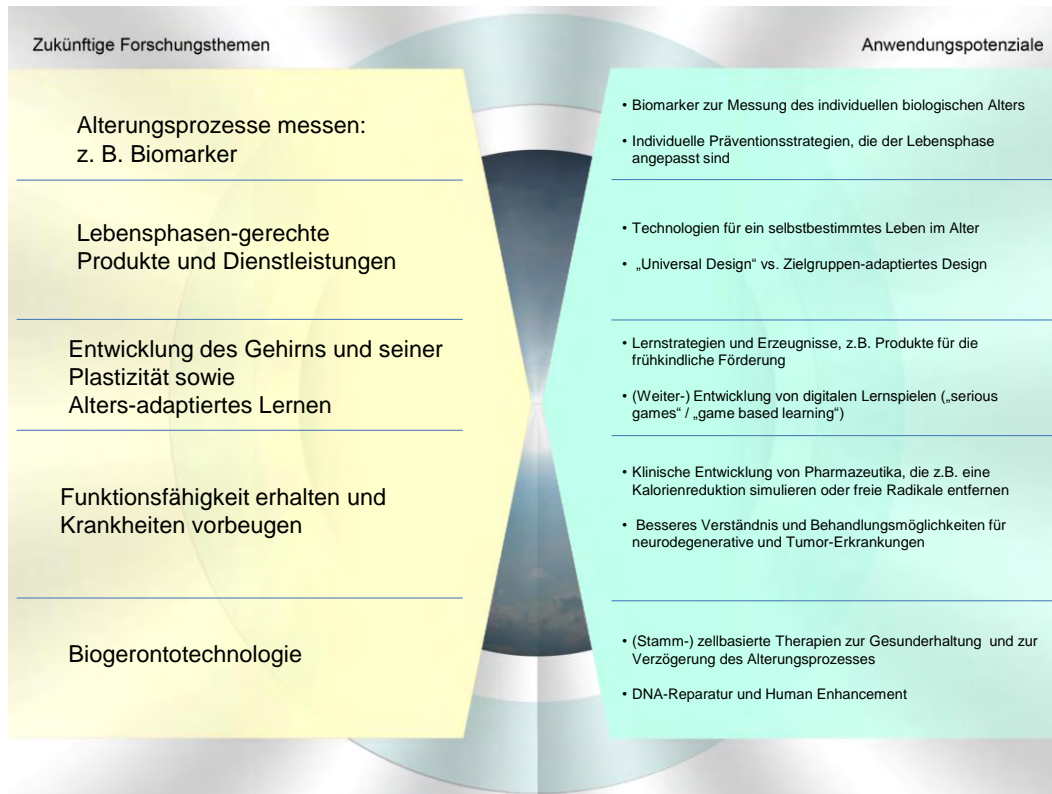


Abbildung 9: Zukünftige Forschungsthemen und Anwendungspotenziale im Zukunftsfeld »Altern entschlüsseln«

4.4 Warum ist das Zukunftsfeld relevant?

Das Zukunftsfeld »Altern entschlüsseln« mit seiner hier vorgestellten breiten Ausrichtung wird für die nächsten Jahrzehnte ein wirtschaftlich und gesellschaftlich relevantes Forschungsthema bleiben. Durch erwartete Ergebnisse aus der Grundlagenforschung wird die Dynamik eher noch zunehmen.

Es entsteht ein besseres Verständnis der Alterungsprozesse und der Entwicklung von biogerontologischen Techniken zu ihrer Beeinflussung, die zu einer Verlängerung der individuellen Lebens-/ Gesundheitsspanne (SRI Consulting Business Intelligence 2008) oder auch zur Erklärung von Erkrankungen (z. B. Krebsentstehung) führen können. Durch gesünderes Älterwerden – also nicht eine bloße Verlängerung der Lebensspanne – werden wahrscheinlich geringere oder gleiche Kosten im Bereich der Kranken- und Pflegekassen entstehen, bei gleichzeitiger Steigerung der wirtschaftlichen Produktivität.



»Anti-Aging-Maßnahmen« zählen bereits heute zu den Wachstumsfeldern innerhalb der Gesundheitswirtschaft, ohne dass für die meisten Anwendungen ein Wirkungsnachweis existiert (Oswald et al. 2006; Juengst et al. 2003; Kruse 2007). Bei besserer wissenschaftlicher Fundierung könnte dieser Markt ausgebaut und zugleich könnten positive Public-Health-Effekte erzielt werden.

Erkenntnisse aus der zellulären und molekularen Entwicklungsneurobiologie können helfen, kognitive, emotionale und psychomotorische Prozesse besser zu verstehen und bessere Lernprozesse zu ermöglichen.

Die interdisziplinär zusammengetragenen Erkenntnisse in der »Altersforschung« können einen wichtigen Beitrag zum Auf- und Ausbau einer altersgerechten Gesellschaft mit entsprechenden Produkten, Dienstleistungen, Versorgungskonzepten und Infrastrukturen etc. leisten.

Aufgrund der demografischen Entwicklung in den Industrieländern werden Erkenntnisse, die das Altern betreffen, immer wichtiger. Zurzeit liegt ein Schwerpunkt der Forschung auf den pathologischen Auswirkungen des Alterns. In dem Maße, in dem Alterungsprozesse aber bis zu einem gewissen Grad reversibel werden, kommt Strategien zum kognitiven Funktionserhalt eine wachsende Bedeutung zu: Ziel ist es, sowohl die körperliche Gesundheit als auch das kognitive Potenzial in der immer größer werdenden Gruppe der Menschen höheren Alters zu erhalten.

Im Zukunftsthema Altern und Lernen könnte - so die Ansicht der Themenkoordinatoren - eine Zusammenführung der Diskussionen (Lernen in unterschiedlichen Lebensphasen) und damit der Akteure in einem strategischen Dialog große Ausstrahlkraft in unterschiedliche Akteursgruppen hinein haben.

Synergieeffekte sind durch die Verknüpfung mit den Feldern Gesundheitsforschung, Informations- und Kommunikationstechnologien, den Bio- und Lebenswissenschaften sowie dem Zukunftsfeld Mensch-Technik-Kooperationen und Zeitforschung zu erwarten.

4.5 Akteure im Innovationssystem heute

Folgende ausgewählte Institutionen, Gesellschaften, Initiativen und Netzwerke sind in Deutschland mit Aspekten der Altersforschung (im weiteren Sinne) beschäftigt und erscheinen aus Sicht der befragten Experten und den bibliometrischen Analysen relevant (die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit). Einige Institutionen – vor allem aus dem biowissenschaftlichen Bereich – wurden von den Experten als besonders relevant eingestuft. Hierzu zählen insbesondere das im Aufbau befindliche Max-Planck-Institut für Biologie des Alterns und das Helmholtz-Zentrum für Neurodegenerative Erkrankungen. Eine



wichtige Frage wird sein, inwieweit es gelingen kann, die bestehenden und zu etablierenden Institutionen zu vernetzen und zu koordinieren, sodass Synergien genutzt werden können.

Akteure Das Altern entschlüsseln

Deutsche Forschungseinrichtungen

- Max-Planck-Forschungsgruppe für Stammzellalterung in Ulm
- Max-Planck-Institut für demografische Forschung, Rostock
- DFG Sonderforschungsbereich 728 »Umweltinduzierte Alterungsprozesse« in Düsseldorf
- DFG Sonderforschungsbereich 488 »Molekulare und zelluläre Grundlagen neuraler Entwicklungsprozesse«, Heidelberg
- Leibniz-Institut für Altersforschung – Fritz-Lipmann-Institut e. V. (FLI) in Jena
- Max-Planck-Institut für die Biologie des Alterns in Köln in Kombination mit dem Exzellenzcluster CECAD

Tabelle 2: Akteure Das Altern entschlüsseln im Jahr 2009

Bisher fehlen laut Analyse noch einige Institutionen. Die Themenkoordinatoren folgern daher, dass eher pathologisch ausgerichtete Institutionen der Helmholtz-Gemeinschaft, wie z. B. das deutsche Krebsforschungszentrum in Heidelberg oder das neu gegründete Deutsche Zentrum für neurodegenerative Erkrankungen in Bonn, ebenso einzubeziehen sind wie das Max-Planck-Institut für Bildungsforschung in Berlin, das Jacobs Center on Lifelong Learning and Institutional Development in Bremen oder die Fraunhofer-Allianz Ambient Assisted Living.

4.6 Zukunftsfähige Akteurskonstellationen

Die zukünftigen Akteure der Altersforschung gehen aus den bereits heute bestehenden hervor, werden aber stärker interdisziplinär arbeiten und langfristig auch die Industrie einbeziehen. Das Altern entschlüsseln ist jedoch noch längerfristig ein wissenschaftlicher Ansatz.

Akteure Das Altern entschlüsseln

- Max-Planck-Institut für Biologie des Alterns, Köln
 - Max-Planck-Institut für demografische Forschung, Rostock
 - Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie, Tübingen
 - Max-Planck-Institut für für molekulare Zellbiologie und Genetik, Dresden
 - Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, Berlin
 - Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie – Karl-Friedrich-Bonhoeffer-Institut, Göttingen
 - Helmholtz-Gemeinschaft: Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin, Berlin
 - Helmholtz-Gemeinschaft: Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Heidelberg
 - Helmholtz-Gemeinschaft: Deutsches Zentrum für Neurodegenerative Erkrankungen (DZNE), Bonn, mit sechs Partnerstandorten (Göttingen, Greifswald/ Rostock, Magdeburg, München, Tübingen, Witten/ Herdecke; als siebter Standort ist Dresden geplant)
 - Universität Konstanz
 - CECAD Cologne (Exzellenzcluster zur zellulären Stressantwort bei alters-assoziierten Erkrankungen, Universität zu Köln)
 - DFG Sonderforschungsbereich 728 »Umweltinduzierte Alterungsprozesse«, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
 - Forschungsgruppe Gesundes Altern, Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Kiel
 - Jacobs Center on Lifelong Learning and Institutional Development, Jacobs University, Bremen
 - Interdisziplinäres Zentrum für Altern, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
 - Entwicklungsneurobiologie am Institut für Biologie der Ruhr-Universität Bochum
- Forschungsverbünde**
- Max-Planck International Research Network on Aging (MaxNetAging)
 - Fraunhofer-Allianz Ambient Assisted Living



<ul style="list-style-type: none"> - Leibniz-Institut für Altersforschung – Fritz-Lipmann-Institut e. V. (FLI), Jena - Leibniz-Institut für Neurobiologie, Magdeburg - Fraunhofer-Institut für Zelltherapie und Immunologie (IZI), Leipzig <p>Universitäre Forschungseinrichtungen bzw. -gruppen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ludwig-Maximilians-Universität München - Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg <ul style="list-style-type: none"> - Netzwerk Altersforschung (NAR), versteht sich als Nachfolger des Deutschen Zentrums für Altersforschung (DZFA) - DFG Sonderforschungsbereich 488 »Molekulare und zelluläre Grundlagen neuraler Entwicklungsprozesse«, Heidelberg - Technische Universität München - Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn - Universität Leipzig - Eberhard Karls Universität Tübingen – Hertie-Institut für klinische Hirnforschung am Universitätsklinikum Tübingen - Georg-August-Universität Göttingen - Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main - Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg - Universität Ulm <ul style="list-style-type: none"> - Max-Planck-Forschungsgruppe Stammzellalterung, Ulm - Transferzentrum für Neurowissenschaft und Lernen an der Universität Ulm 	<p>Betroffene Fachgesellschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> - Deutsche Gesellschaft für Altersforschung (DGfA) - Deutsche Gesellschaft für Gerontologie und Geriatrie (DGGG) - Deutsche Gesellschaft für Neurogenetik (DGNG) - Deutsche Gesellschaft Neuropathologie und Neuroanatomie (DGNN) - Deutsche Krebsgesellschaft (DKG) - Gesellschaft für Entwicklungsbiologie (GfE) - Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie (GBM) - Gesellschaft für Neuropädiatrie (GNP) - Deutsche Gesellschaft für Perinatale Medizin (DGPM) - Deutsche Gesellschaft für Zellbiologie (DGZ) - Gesellschaft für Humangenetik (GfH) - Neurowissenschaftliche Gesellschaft (NWG) - Deutsche Gesellschaft für Geriatrie (DGG) - Deutsche Gesellschaft für Neurologie (DGN) - Gesellschaft für Regenerative Medizin (GRM) - Deutsche Gesellschaft für Prävention und Anti-Aging-Medizin (GSAAM)
---	--

Tabelle 3: Zukünftige Akteure Das Altern entschlüsseln im Jahr 2009

Mehrere der befragten Experten bemängelten, dass es zwei konkurrierende Fachgesellschaften gebe, die beide die Altersforschung für sich reklamierten (DGfA und DGGG). Dies erschwere zum einen den interdisziplinären Dialog, zum anderen sei es mangels einer abgestimmten Meinung kaum möglich, sich in die forschungspolitische Debatte einzubringen.

Weitere Einrichtungen

- Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech); Nationale Akademie der Naturforscher Leopoldina; Jacobs Foundation, Zürich; »Akademien-gruppe Altern in Deutschland« (2006-2009)
- Deutsches Zentrum für Altersfragen e. V. (DZA), Berlin, gefördert durch das Bundesministerium für Familie, Senioren, Frauen und Jugend (BMFSFJ)

Förderprogramme

- **VolkswagenStiftung**
Forschungsinitiative »Perspektiven des Alterns« der VolkswagenStiftung mit einem Gesamtvolumen von insgesamt rund 3,6 Mio Euro für zwölf Projekte,



an denen Wissenschaftler aus insgesamt 17 Universitäten und Forschungseinrichtungen beteiligt sind. Die Forschungsprojekte, die im Oktober 2008 gestartet sind, haben eine Laufzeit von drei Jahren.

- **BMBF GerontoSys –Systembiologie des Alterns**

Drei Projekte mit insgesamt 12 Mio Euro Fördersumme, in denen Alterungsprozesse interdisziplinär erforscht werden, weitere Ausschreibungsrunde(n) geplant.

Viele bestehende Förderprogramme insbesondere des BMBF beschäftigen sich mit Teilbereichen der Altersforschung (z. B. Förderung der Neurowissenschaften, der Erforschung des demografischen Wandels oder der Kompetenznetze in der Medizin inklusive der intensivierten Forschungsförderung im Bereich neurodegenerativer Erkrankungen) (Roloff, Beckert 2006).

Projekte oder Förderprogramme auf europäischer Ebene

Auch hier handelt es sich nur um einen kleinen Ausschnitt, viele weitere Förderprogramme weisen einen Bezug zur Altersforschung auf.

- **ERA-AGE**

Im März 2004 wurde ein ERA-NET gestartet, das sich die Vernetzung der Altersforschungsförderung zum Ziel gesetzt hat: das ERA-AGE Network («European Research Area in Ageing Research» oder Europäischer Forschungsraum in der Altersforschung) (Walker 2009). Das ERA-AGE-Projekt folgt einem strukturbildenden Schema innerhalb der EU-Forschungsförderung. Es soll erstens als Forschungsförderungsschiene den Forschungsbereich Altersforschung weiterentwickeln helfen. Zweitens will das Netzwerk durch die Festlegung der zukünftigen Prioritäten bei Forschungsförderungsprogrammen selbst gestaltend in diese Entwicklung eingreifen. Drittens will es den gesellschaftlichen Nutzen der Altersforschung durch intensiven Kontakt mit Politikern und Anwendern hervorheben und auf deren Forschungsbedarf konkret eingehen (Geyer 2008). Unter der Leitung von europäischen Wissenschaftlern («Future Leaders of Ageing Research», FLARE) wurde eine entsprechende Förderung initiiert.

- **AGEACTION**

Im Rahmen des 6. Forschungsrahmenprogramms fand am 23. April 2007 an der Universität Newcastle eine Konferenz mit dem Thema »AGEACTION – Changing Expectations of Life« statt (Denley, Bell 2007). Ziel war, die Altersforschung auf europäischer Ebene voranzubringen. Hierzu wurden in insgesamt fünf Panel-Sitzungen (Biologie, Finanzen & Industrie, Technologie, Medizin und Sozialwissenschaften) unterschiedlichste Themen diskutiert und entsprechende Empfehlungen formuliert.



- **INNOGRIPS**

Vom 18.-19. Dezember 2008 fand der dritte »Innovation Policy Workshop« im Rahmen der Initiative PRO INNO EUROPE statt. Er stand unter dem Motto »Innovation in an ageing society« (Basset 2009).

- **SHARE**

Ebenfalls auf europäischer Ebene wurde das Projekt SHARE (»Survey of Health, Ageing and Retirement in Europe«) ins Leben gerufen (Börsch-Supan, SHARE-Project team 2009). Hierbei handelt es sich um eine Langzeiterhebung von Daten zur gesundheitlichen, sozialen und ökonomischen Situation von Menschen über 50. Dieses Projekt wird ab 2009 von den einzelnen beteiligten Staaten weitergeführt.

4.7 Empfehlungen

In der Altersforschung sind viele unterschiedliche Akteure aktiv, die in Zukunft besser vernetzt und koordiniert werden sollten. Gegenwärtig überwiegt in der Gerontologie die Multidisziplinarität: die altersforschenden Disziplinen arbeiten weitgehend parallel. »Interdisziplinäre« Projekte bedeuten häufig nicht, dass auch tatsächlich eine Integration von Methoden und Theorien stattfindet (Geyer 2008). Eine weiter gehende Forschung zur Integration von Methoden und Theorien der Altersforschung könnte einen wichtigen Beitrag leisten, um die Möglichkeiten der Zusammenarbeit zu verbessern (Baltes 2002). Eine entwickelte interdisziplinäre und schließlich transdisziplinäre Zusammenarbeit birgt für die Altersforschung ein großes Potenzial im Hinblick auf die Bedeutung der erzielten Forschungsergebnisse (Baltes 2002; Geyer 2008).

Auch eine Zusammenführung der Diskussionen um das Lernen und das Altern (Lernen in unterschiedlichen Lebensphasen) in einem strategischen Dialog würde bereits heute Ausstrahlkraft in die unterschiedlichen Akteursgruppen hinein haben.

Ähnlich wie im Zukunftsfeld Gesundheit wird von den Experten auch im Bereich Altersforschung eine Verstärkung der translationalen Forschung empfohlen. Erst durch einen zeitnahen und wissenschaftlich begleiteten Transfer der Erkenntnisse der Grundlagenwissenschaften in Anwendungen kann sich ein sichtbarer Nutzen für die Menschen entfalten. Es besteht weiterhin der Bedarf, in der Grundlagenforschung Mechanismen von Alternsprozessen auf molekularer, zellulärer, Gewebe- und Organ- sowie Organismenebene an Modellsystemen und Tiermodellen aufzuklären. Zusätzlich müsste aber der Fokus stärker darauf gerichtet werden, die grundlegenden Forschungsarbeiten konzeptionell und organisatorisch so auszurichten, dass sie unmittelbare Beiträge für den Transfer der Erkenntnisse auf den Menschen sowie die Überführung in die klinische Forschung und die Versorgungsforschung liefern können.



Selbstverständlich ergeben sich durch die Altersforschung viele ethische, religiöse und auch Regulierungsfragen, deren Erforschung möglichst zeitgleich erfolgen sollte, so eine Folgerung der Themenkoordinatoren. Dies geht über klassische »Begleitforschung« hinaus, da elementare Bereiche des Lebens wie die Lebensverlängerung oder Immortalität (siehe auch Mensch-Technik-Kooperationen) angesprochen werden.

Die Themen der Altersforschung wurden sowohl in der Online-Befragung als auch vom Monitoring-Panel für sehr wichtig erachtet. Immortalität und Lebensverlängerung wurden jedoch eher kritisch gesehen und als Forschungsziele weitgehend abgelehnt. Diese zwiespältige Haltung zeigt sich auch in der deutschen Bevölkerung: In der aktuellen Befragung »Vision Deutschland – Neue Wege in die Welt von morgen« spiegelt sich die gleiche Ambivalenz wider, die auch die befragten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Foresight-Prozess gezeigt haben (Opaschowski 2009). In der zitierten Umfrage gaben 96 Prozent der Befragten an, dass sie Therapien von Alzheimer bis Aids als »die« Zukunftsinnovation Nr. 1 ansehen. Dagegen sahen nur 31 Prozent die Nutzung gentechnologischer Erkenntnisse zur bloßen Erhöhung der Lebenserwartung bis zu hundert Jahren als relevant an (noch schlechter schnitten Medikamente zur Intelligenzsteigerung mit 20 Prozent ab) (Opaschowski 2009). Dennoch wird mit den Erkenntnissen über die Mechanismen des Alterns eine Wissens- und Technologiebasis geschaffen werden, die genau solche Interventionen zur Lebensverlängerung möglich machen wird. Objektiv wird häufig eine Lebensverlängerung abgelehnt, doch ist das eigene Leben oder das eines Angehörigen betroffen, ändern sich die Einschätzungen durchaus (Cuhls et al. 2007). Eine ähnliche Situation ist auch in dem Zukunftsfeld Mensch-Technik-Kooperationen zu beobachten. Auch dort wird die Behandlung von neurologischen Erkrankungen (z. B. »Lock-in-Syndrom«) befürwortet, »Hirndoping« oder Implantate zur Leistungssteigerung werden aber abgelehnt.

Insgesamt bedarf es daher aus Sicht der Themenkoordinatoren einer sozialwissenschaftlichen Begleitung sowie der ethischen, gesellschaftlichen und politischen Reflexion der altersbiologischen Forschung, welche Formen der Lebensverlängerung als gesellschaftlich wünschenswert oder aber nicht akzeptabel bewertet werden. Diese Diskussion setzt in Deutschland erst langsam ein (von Bredow 2005). Notwendig wäre ein breiter ethisch-gesellschaftlicher Diskurs, wie er in den USA bereits geführt wird (Knell, Weber 2009; The President's Council on Bioethics, Kass L. R. 2003).

Themenkoordination:

Dr. Horst Christian Vollmar, ISI und

Dr. Kerstin Cuhls, ISI (kerstin.cuhls@isi.fraunhofer.de)



5 Zukunftsfähige Lebensräume

Die Lebensräume der Zukunft werden sich strukturell und organisatorisch verändern. Getrieben durch die Neuordnung von Lebensentwürfen und technologische Möglichkeiten verändern sich zeitliche und räumliche Muster von Wohnen und Leben. Zusammen mit den Anforderungen an eine nachhaltige Raumentwicklung erfordern diese Entwicklungen Innovationen und Adaption in verschiedenen Forschungsthemen.

Um auf anhaltende gesellschaftliche Trends langfristig reagieren zu können, ist es notwendig, siedlungsstrukturelle Konzepte dynamischer zu gestalten, um den sich ändernden Rahmenbedingungen besser gewachsen zu sein. Dazu gehört beispielsweise die Etablierung von flexiblen und klimagerechten Raum- und Siedlungsstrukturen. Diesen im Fluss befindlichen Anforderungen stehen die heutigen Siedlungs- und Infrastrukturen entgegen, die sich kurz- und mittelfristig nur mit hohem Kosten- und Ressourcenaufwand verändern lassen. Daher müssen auf der technischen Ebene sämtliche Infrastrukturen von Energie über Verkehr und Wasser bis hin zu Information und Kommunikation flexibler werden und einen künftigen Umbau bzw. Rückbau bei ihrer Implementierung mit berücksichtigen.

Eine nachhaltige Siedlungsentwicklung erfordert zudem andere Planungs- und Governance-Strukturen, die insbesondere auf ein integriertes Infrastrukturmanagement und eine stärkere Bedeutung von Lebenszyklen der bebauten Umwelt abzielen. Bei der Implementierung und Etablierung von nachhaltigen Siedlungs- und Dienstleistungskonzepten spielen Akteursstrukturen und neue Formen der Zusammenarbeit eine wichtige Rolle, nicht nur bei der technischen Infrastruktur, sondern auch bei sozialen Dienstleistungen.

Um in diesem Spannungsfeld agieren zu können, sind in Zukunft gut koordinierte Anstrengungen verschiedener Forschungsfelder notwendig. Es ergeben sich Potenziale für strukturelle und technische Innovationen, die heute noch gar nicht abzusehen sind. Zuvor wird jedoch ein grundlegendes Verständnis der Zusammenhänge benötigt. Nicht zu vernachlässigen ist auch die wichtige Rolle des Staates in der Entwicklung und im Aufbau neuer großer Infrastrukturen.

5.1 Das Zukunftsfeld

Einerseits sind Lebensräume weltweit einem ständigen strukturellen Wandel unterworfen. Andererseits stehen ihnen Siedlungs- und Infrastrukturen entgegen, die sich kurz- und mittelfristig nur mit hohem Kosten- und Ressourcen-



aufwand verändern lassen (vgl. u. a. Koziol/ Walter 2006; Siedentop et al. 2006, Schiller et al. 2009). Obwohl die aktive Gestaltung von hoher gesellschaftlicher und praktischer Relevanz ist, sind viele aktuelle Technologien und Forschungsansätze an den bisherigen Siedlungs- und Lebensformen ausgerichtet. Daher bedarf es einer Forschungsperspektive, die sich einerseits an dem Leitbild einer nachhaltigen Raumentwicklung orientiert und andererseits der Herausforderung einer größeren Flexibilität und Dynamik der Raumnutzung sowie der Infrastruktur Rechnung trägt. Erste Ansätze dafür gibt es bereits im Rahmen des Forschungsprogramms Stadtumbau Ost (vgl. Koziol et al. 2006) Darüber hinaus werden die Ausgestaltung und Gewährleistung von öffentlichen und privaten Dienstleistungen sowie Fragen des »Governance« von Lebensräumen künftig in den Fokus des Forschungsinteresses rücken (z.B. im Zusammenhang mit lokalen Nachhaltigkeitsstrategien).

Dies erfordert die interdisziplinäre Kooperation und Vernetzung quer über verschiedene Forschungs- und Technologiefelder wie Raumentwicklung, Mobilität, Materialien, Energie, Wasser, Informations- und Kommunikationstechnik, Produktionskonzepte, Biotechnologie, Architektur und Bauforschung.

Zentrale Aspekte des Forschungsfeldes sind:

- Strukturen und Konzepte zur Ermöglichung einer größeren **Dynamik** bei der Erweiterung und der Umnutzung oder Renaturierung menschlicher Lebensräume
- Technologien und Konzepte für größere **Flexibilität der Ver- und Entsorgungssysteme** (mit den Handlungsfeldern: Energie, Ver- und Entsorgung, Information und Kommunikation, Wasser, integrierte Verkehrs- und Logistiksysteme, zeitgenössische Architektur, Bauforschung)
- **»Governance«-Konzepte**³⁸ zur Ermöglichung eines nachhaltigen Siedlungsmanagements sowie Innovationen für zukunftsfähige Dienstleistungskonzepte im Wohn- und Lebensumfeld, durch Neudefinition der Rolle der räumlichen Planung und Neukonstellation der Akteure.

5.2 Ausgangssituation im Zukunftsfeld heute (2009)

Trotz zahlreicher raumordnerischer und stadtplanerischer Ansätze für eine kompakte, nachhaltige Stadt ist der Trend zur flächenverbrauchenden, zu den Rändern der urbanen Räume orientierten Siedlungsentwicklung (Außenent-

³⁸ »Governance« bezeichnet das Steuerungs- und Regelungssystem von Institutionen und Organisationen. Dazu gehört v. a. der Staat – in seiner Hierarchie in Bund, Länder und Gemeinden. Aber auch andere, private und öffentliche, Organisationen können in »Governance«-Konzepte involviert sein.



wicklung) ungebrochen, und das bei einer stagnierenden oder schrumpfenden Bevölkerungsentwicklung. Diese flächenhafte Ausbreitung der Siedlungsstruktur geht mit einer noch größeren Ausdehnung der Aktionsradien einher, die trotz aller Bemühungen zur kompakten Siedlungsentwicklung noch anhält (vgl. BBR 2005).

Die Raumforschung (Stadt- und Regionalforschung) befasst sich schon seit längerer Zeit mit nicht nachhaltigen räumlichen Entwicklungsprozessen wie Suburbanisierung und Zersiedlung und deren Wechselwirkungen mit der Entwicklung des Verkehrsaufkommens – ausgehend von Bevölkerungswachstum und Zuwanderung. Es gibt zahlreiche Modellprojekte und Forschungsprogramme, die zum Ziel haben, anwendungsorientierte, wissenschaftliche und praktische Erkenntnisse für die Entscheidungsträger in den Bereichen Raumordnung, Stadtplanung und Verkehr zu erarbeiten und zur Verfügung zu stellen.³⁹ Dabei geht es zunehmend auch um den Aspekt der Infrastruktur, der mit der räumlichen Entwicklung einhergeht und diese bedingt. Insbesondere aus staatlicher Sicht ist das von besonderer Bedeutung, da sich öffentliche Infrastruktur, die der Daseinsvorsorge dient – trotz der anhaltenden EU-weiten Tendenz zur Liberalisierung – oft in staatlichem Eigentum befindet bzw. vom Staat stark reguliert wird.

In letzter Zeit stehen allerdings die Auswirkungen von Megatrends, besonders des demografischen und gesellschaftlichen Wandels (z. B. ambivalente Entwicklung der Regionen hinsichtlich der demografischen Entwicklung) sowie des klimatischen Wandels, im Vordergrund des Forschungsinteresses. In Verbindung mit der angespannten Finanzsituation des öffentlichen Sektors spielt auch der Aspekt der Kostenoptimierung eine besondere Rolle, insbesondere in dezentral suburbanen oder peripher gelegenen ländlichen Siedlungsräumen (vgl. z. B. Reidenbach et al. 2005).

Um auf diese langfristigen Trends ressourcen- und kosteneffizient reagieren zu können, bedeutet **Flexibilisierung von Ver- und Entsorgungssystemen**, die durch lange Lebensdauern gekennzeichnet sind, wichtigen Forschungs- und Handlungsbedarf auf der technologischen Ebene. Zurzeit gibt es einige Modell- und Demonstrationsprojekte, in denen zentrale Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen durch dezentrale innovative Konzepte ersetzt werden, die aufgrund ihrer Kostenvorteile und Flexibilität künftigen Anforderungen besser gerecht

³⁹ Dazu gehört z. B. das Forschungsprogramm Stadtverkehr (FoPS) zur Verbesserung der Verkehrsverhältnisse in den Gemeinden sowie das Aktionsprogramm MORO (Modellvorhaben der Raumordnung) und das Forschungsprogramm ExWoSt (Experimenteller Wohnungs- und Städtebau), alle vom BMVBS und betreut durch das BBR. Darüber hinaus gibt es auch Forschungsprogramme, die den globalen raumrelevanten Veränderungen Rechnung tragen, wie der BMBF-Förderschwerpunkt »nachhaltige Entwicklung der Megastädte von morgen« oder der BMBF-Fördermaßnahme »Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen« (klimazwei).



werden.⁴⁰ Neben den technischen Erschließungssystemen steht aber auch die soziale Infrastruktur, die der Versorgung dient und die zivile Sicherheit der Bevölkerung gewährleisten soll (Schulen, Feuerwehr, Polizei), unter Veränderungsdruck. Bisher gibt es einige Konzepte zu kleinräumigen Stoffkreisläufen, die im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion sowie der Forschung zur Lebenszyklusanalyse entwickelt wurden.

Über den rein technologischen Aspekt hinaus ist es außerdem notwendig, die statischen Raum- und Siedlungsstrukturen konzeptionell zu verändern. Demzufolge stellt die **Dynamik** innerhalb von **Siedlungskonzepten** ein Forschungsthema dar. Dies erfordert den Einsatz öffentlicher Finanzmittel, z. B. durch die Förderung von Modellprojekten u. a. zu den Auswirkungen des Klimawandels, vor allem aber in Bezug auf die Veränderungen im Umgang mit Wasser innerhalb von Lebensräumen. Im Rahmen der gerade abgeschlossenen Fördermaßnahme »Klimazwei – Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen« (www.klimazwei.de) wurde beispielsweise das Projekt »Wassersensible Stadtentwicklung« unter Federführung der RWTH Aachen erarbeitet, das in Kooperation mit drei Ruhrgebietsstädten räumlich konkrete Maßnahmen für eine nachhaltige Anpassung der Siedlungswasserwirtschaft an Klimatrends und Extremwetter entwickelt hat. Darauf baut der gerade angelaufene BMBF-Förderschwerpunkt Klimazug (www.klimazug.de) auf, welcher die Entwicklung innovativer regionaler Ansätze zur Anpassung an den Klimawandel und eine Integration der zu erwartenden Klimaänderungen in regionale Planungs- und Entwicklungsprozesse fördert. Darüber hinaus erkennt die Forschungsgemeinschaft im Hinblick auf die Wettbewerbsfähigkeit im europäischen Binnenmarkt Defizite im Bereich technischer, baukultureller und organisatorischer Innovationen im deutschen Bauwesen, denen mit der Forschungsinitiative Zukunft BAU des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) entgegengetreten werden soll. Dabei geht es u. a. um Energieeffizienz, neue Materialien und Optimierung von Kosten.

Um zu einer Implementierung der oben genannten Themen zu gelangen, ist die Frage der politischen Steuerung und Planung essenziell, was auch vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR 2009) betont wird. Es gibt bereits einige Forschungsansätze, wie durch Innovationen im Bereich **Governance** ein **nachhaltiges Siedlungsmanagement** bzw. zukunftsfähige **Dienstleistungskonzepte** gefördert werden können. Dazu gehören alle Optimierungsansätze, die sich durch neue Planungsansätze bzw. neue Akteurskonstellationen und das Einwirken der Politik erreichen lassen. Ein Beispiel ist die neue Herausforderung zur Abstimmung zwischen den Planungsträgern und Infrastrukturbetrei-

⁴⁰ Als Beispiel sei das durch die WestLB-Stiftung Zukunft NRW geförderte Forschungsprojekt »AKWA 2100 – Alternativen der kommunalen Wasserversorgung und Abwasserentsorgung« (Hiessl et al. 2005) genannt.



bern in schrumpfenden Räumen, wie im Experteninterview deutlich wurde (siehe auch Siedentop et al. 2006). Es gibt derzeit zudem zahlreiche andere Ansätze zur Bestimmung und Anlastung der Kosten für die Siedlungsentwicklung. Im Rahmen des REFINA-Förderschwerpunkts des BMBF⁴¹ wurde unter anderem ein auf einem geografischen Informationssystem (GIS) basierendes Werkzeug entwickelt, mit dem die Auswirkungen von Wohnbauland-Entwicklungsstrategien unter Berücksichtigung der Bevölkerungsentwicklung auf den kommunalen Haushalt prognostiziert werden können (vgl. u.a. Koziol/ Walter 2006; Siedentop et al. 2006, Schiller et al. 2009).

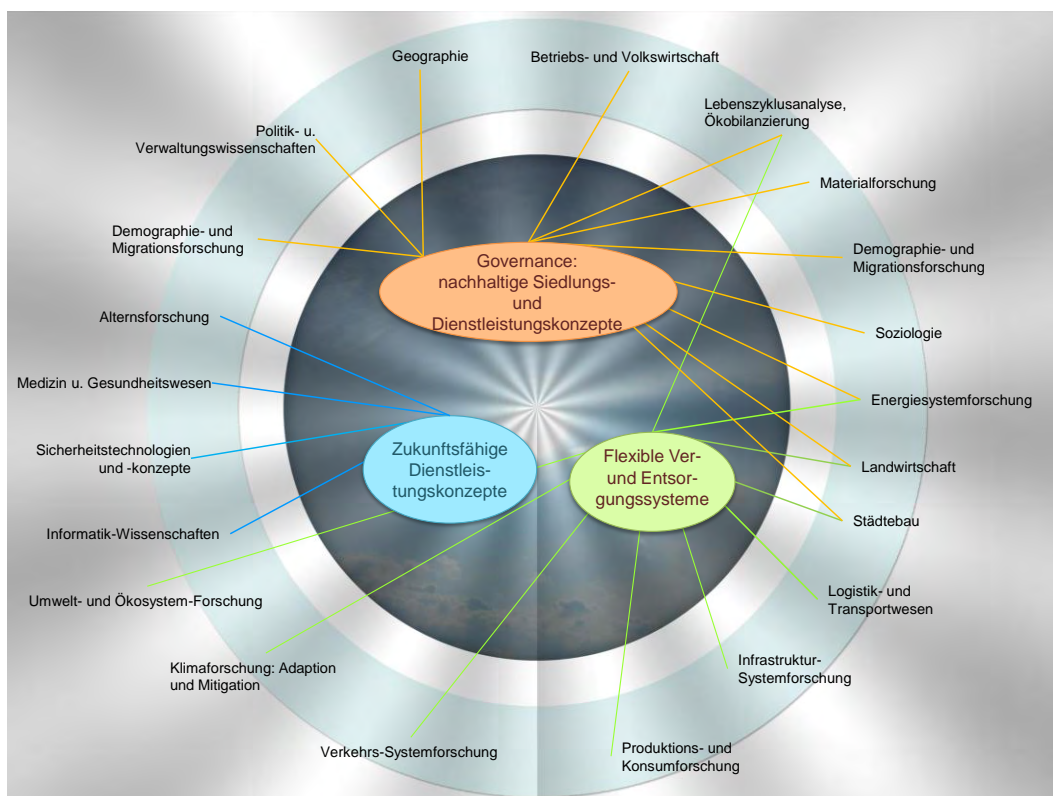


Abbildung 10: Zukünftig beteiligte Forschungsrichtungen

Ein wichtiger Bestandteil der Ausgangssituation des Zukunftsfelds ist die Einbindung der einzelnen Forschungsthemen in andere Forschungsgebiete und Disziplinen, wie sie in Abbildung 10 im äußeren Kreis dargestellt sind.

⁴¹ = Forschung für die Reduzierung der Flächeninanspruchnahme und ein nachhaltiges Flächenmanagement, in Kooperation mit dem BMVBS und dem BMUNR.

5.3 Langfristspektive des Zukunftsfeldes

Das vorangegangene Kapitel hat gezeigt, dass es bereits viele Ansätze gibt, um den sich gegenwärtig abzeichnenden Problemen im Bereich Infrastrukturen und Lebensräume zu begegnen. Allerdings haben die meisten der erwähnten Projekte zur Bewältigung der künftigen Herausforderungen Modellcharakter und resultieren auch nur zum Teil in allgemein gültigen Empfehlungen für die Akteure. Ein häufiger Aufhänger für gegenwärtige Projekte ist der demografische Wandel, der zu kleinräumigen Veränderungen in der Siedlungsdichte und Altersstruktur und damit häufig zu technischen und ökonomischen Problemen der Unterauslastung der vorhandenen Netzinfrastruktur führt. Neben diesen raumrelevanten Veränderungen gibt es auch zahlreiche andere Abhängigkeiten von topografischen, ökologischen, sozialen, kulturellen und technischen Bedingungen des jeweiligen Lebensumfeldes, die bislang noch nicht Gegenstand wissenschaftlicher Betrachtungen waren. Aus diesem Grunde stellen Fragen nach der Dynamik von Konzepten und der Flexibilität von technischem System und räumlicher Nutzung im Neubau und Bestand auch in der kommenden Dekade ein wichtiges Forschungsfeld dar.

Zur Darstellung der langfristigen Perspektive der beschriebenen Forschungsthemen wurden diese in verschiedene Anwendungspotenziale untergliedert:

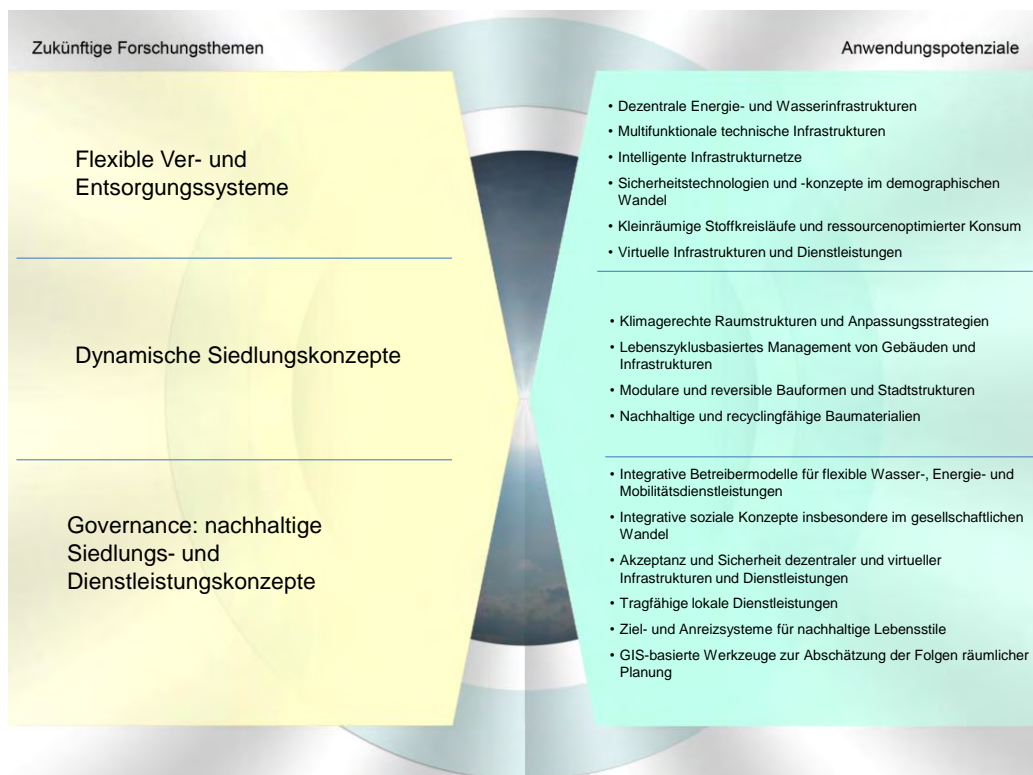


Abbildung 11: Zukünftige Forschungsthemen und Anwendungspotenziale im Zukunftsfeld »Lebensräume der Zukunft«



Flexible Ver- und Entsorgungssysteme

Ein Großteil der vorhandenen netzgebundenen Infrastrukturen, vor allem der im Untergrund verlegte Teil, hat eine sehr lange Lebensdauer von bis zu 80 Jahren. Demgegenüber stehen veränderte Rahmenbedingungen, die vor allem mit den Megatrends in der Demografie sowie des Klimawandels im Zusammenhang stehen. Von zentraler Bedeutung für eine nachhaltige Infrastrukturplanung ist die Frage, wie Netze, Anlagen und Einrichtungen künftig geschaffen sein müssen, damit sie mit minimalem Aufwand an sich verändernde Bedingungen angepasst bzw. rückgebaut werden können. Wie können vorhandene Netze sukzessive in diese Richtung umgebaut werden? Ansätze reichen von der Recyclingfähigkeit einzelner Infrastruktur-Komponenten bis zur schonenden Rückbaufähigkeit größerer Strukturen. Als spezifischer Teilaspekt stellt sich die Frage nach nachhaltigen Anwendungen dezentraler, kleinräumig angepasster Konzepte, wie z. B. die Weiterentwicklung der Membrantechnologie zur Erhöhung der Zuverlässigkeit lokaler Klärsysteme bei wechselnden Einträgen und Umweltbedingungen. Während bei der Abwasserreinigung tragfähige technologische Konzepte bestehen, birgt das Feld der dezentralen Wasserversorgung noch erhebliche Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten (vgl. Ausführungen zum Thema »Wasser«).

Mit Blick auf zukünftig angespanntere öffentliche Finanzlagen stellen sich wichtige Forschungsfragen zu einem möglichst effizienten Management leitungsgebundener Infrastrukturen: Wie kann eine Integration der Systeme hin zu multifunktionalen Einheiten gelingen, sodass sowohl die Investitions- als auch die Wartungstätigkeit effizienter gestaltet werden kann? Beispiele hierfür sind integrierte Energie- und Informationsnetze oder modulare und standardisierte Leitungsinfrastrukturen mit synchronisierten Wartungszyklen. Weiter gehend sind modulare Straßeninfrastruktur-Konzepte mit standardisierten Anlagen für Wasser-, Telekommunikations- und Energieversorgung denkbar.

Neue Dienstleistungen wie die Elektromobilität, die dynamische Steuerung und Bemaßung von Verkehrsströmen auf großen Netzteilen, flexible Wasser- und Stromtarife und die Einspeisung fluktuierender erneuerbarer Energien erfordern den Aufbau »intelligenter Netze«. Hier liegt eine besondere Herausforderung, aber auch Potenzial in Bezug auf technologische Innovationen. Lösungsansätze zeichnen sich in der Verschmelzung von Energie- und Kommunikationsnetzen ab. Die Nutzung von Energie wird sich unter anderem durch die Verbreitung von Elektrofahrzeugen und ihrer Bedeutung als mobile Energiespeicher (»Vehicle-to-Grid«-Konzepte) wandeln. Hier stellt sich die Frage, wie die Ladestationen technisch so gestaltet und verortet werden können, dass die Reichweitenproblematik elektrischer Fahrzeuge gelöst ist.



Im Bereich der Verkehrsinfrastrukturen bedient die »Intelligenz der Netze« die Ziele Sicherheit und Komfort. Zukünftige Forschungsthemen sind die Standardisierung von Schnittstellen insbesondere für die Verbindung von Individualverkehr und öffentlichem Verkehr sowie die Einfachheit und Kosteneffizienz der Systeme (vgl. acatech 2006). Speziell bei City-Maut- und Verkehrsleitsystemen besteht in Deutschland, gemessen an internationalen Aktivitäten, noch erheblicher Nachholbedarf bei praktischen Anwendungen. Darüber hinaus bieten neue Versorgungsinfrastrukturen wie unterirdische Röhrensysteme, »People Mover« in Stadtgebieten oder die flexiblere Nutzung bestehender Systeme noch Potenziale in spezifischen regionalen Umfeldern.

Ein anderer Aspekt ist die Frage nach der Ressourcenoptimierung von Konsumprodukten: Während bisher die Endlichkeit der Energieressourcen im Vordergrund stand, werden in Zukunft auch andere Ressourcen, die in der Produktion eingesetzt werden (wie z. B. Edelmetalle), und die mit ihrem Bezug verbundenen Risiken in den Vordergrund rücken (vgl. Angerer et al. 2009). Daher ist die Optimierung der Kreislaufwirtschaft, v. a. auf kleinräumiger Basis, ein wichtiger Forschungsgegenstand. Mit der zunehmenden Verbreitung dezentraler erneuerbarer Energiequellen stellt sich jedoch auch weiter die Frage nach einer nachhaltigen, autarken Energieversorgung abgelegener Regionen.

Da im Zuge knapper werdender öffentlicher Mittel die regelmäßige polizeiliche Überwachung entlegener Regionen eingeschränkt sein wird, treten virtuelle Infrastrukturen zur Unterstützung oder Übernahme dieser Aufgaben in den Vordergrund. Im privaten, häuslichen Umfeld werden mit Blick auf die Altersstruktur unterstützende Systeme (»Ambient Assisted Living«) eine zunehmende Rolle spielen (vgl. Georgieff 2010). Eng verbunden hiermit ist auch die Frage des gewünschten Grades virtueller Versorgung, der Einfluss auf Entfremdung und soziales Zusammenleben sowie die Manifestierung von Distanz durch den schwindenden Zwang zu physischen Begegnungen. Die Weiterentwicklung der laufenden Feldversuche im Rahmen der »Gesundheitsregionen« des BMBF in Richtung Nutzen und Zuverlässigkeit technischer Systeme, benötigter IT-Infrastruktur, Betreibermodelle und Implikationen für die Gesundheits- und Pflegesysteme sind dabei von langfristiger Bedeutung. Ein Gesundheitsversorgungssystem der Zukunft (siehe Zukunftsfeld »Gesundheit«) wird entsprechende Lösungen bereitstellen müssen.

Dynamische Siedlungskonzepte

Die Siedlungspolitik und darauf aufbauende räumliche Planung muss sich auf eine größere Dynamik einstellen und darauf entsprechend konzeptionell reagieren. Aufbauend auf den bisherigen vielfältigen Forschungsaktivitäten zur Suche nach den richtigen Anpassungsstrategien für den klimatischen Wandel, muss langfristig die Aktion gegenüber der Reaktion in den Vordergrund treten. Eine



kürzlich erfolgte Befragung unter den regionalen Planungsträgern ergab, dass die Rolle der räumlichen Planung zum Umgang mit Klimawandelfolgen bislang kaum definiert ist, obwohl der Schutz vor Extremereignissen als größte Herausforderung der Regionalplanung gewertet wird (Overbeck et al. 2009: 196, 199). Laut Experteninterview liegt eine zentrale Herausforderung heutiger Siedlungsstrukturen und Infrastrukturen darin, Städte möglichst widerstandsfähig gegen häufige und heftige Extremwetterereignisse zu machen. Hier sind insbesondere Ansätze aus Rotterdam erwähnenswert, wo die Implementierung innovativer Klimaadaptationstechnologien geplant wird. Verteilt in der Stadt sind verschiedene Anlagen zur kurzfristigen Speicherung von Wasser vorgesehen – beckenförmige Wasserplätze, in denen in Trockenperioden »geskated« wird, sowie Wasserbecken in Wohnanlagen oder auf begrünten Häusedächern (de Greef/ Zsiros 2008).

Demnach stellt sich die Frage, wie sich von einem frühen Planungsstadium an Raumstrukturen klimagerecht gestalten lassen. Sind neue Planungsinstrumente (auf regionaler und kommunaler Ebene) nötig, um besonders gefährdete Gebiete in Fluss- und Küstennähe von der Bebauung freizuhalten (z. B. obligatorischer Einsatz von regionalisierten Klimadaten und kleinräumigen Kartierungen des Gefährdungspotenzials)? Aufbauend auf den Ergebnissen von **Klimazwei** und **Klimazug** sollte die Forschungsaktivität jeweils auch die lokale Ebene einbeziehen.

Auf der Gebäudeebene ist trotz bestehender Forschungsansätze davon auszugehen, dass das Thema der technischen, baukulturellen und organisatorischen Innovationen auch in mittelfristiger Zukunft noch auf der Forschungsagenda stehen wird. Angesichts der heute üblichen massiven Bauweise wird besonders die Lebensdauer von Bauformen und -strukturen und ihre Anpassungsfähigkeit an veränderte Rahmenbedingungen in den Mittelpunkt der öffentlichen Diskussion rücken. Wie lassen sich Bauformen und Stadtstrukturen konzipieren und umsetzen, die einerseits modular aufgebaut sind und andererseits bei Bedarf einfach entfernt und recycelt werden können? Welche Innovationen bei Baumaterialien sind dafür notwendig?

Hinsichtlich der Kostenträgerschaft für diese Investitionen ist in erster Linie die öffentliche Hand gefragt. Öffentliche Investitionen in Deutschland sind nach Meinung einiger Experten, wie dem Sachverständigenrat der Bundesregierung, ohnehin im internationalen Vergleich gering und werden daher in Zukunft tendenziell zunehmen.⁴²

⁴² Nach Informationen der Hans-Böckler-Stiftung ist beispielsweise der Anteil der Investitionen in Straßen und Schulgebäude von 4,7 Prozent 1970 auf 1,5 Prozent in 2007 am jeweiligen BIP stark zurückgegangen (http://www.boeckler.de/32014_95645.html).



Governance – Nachhaltige Siedlungs- und Dienstleistungskonzepte

In unmittelbarem Zusammenhang mit dem Kostenträger notwendiger Investitionen steht die Frage nach den benötigten Akteuren und die Art und Weise der Zusammenarbeit, um ein nachhaltiges Siedlungsmanagement zu fördern. Eine Herausforderung besteht generell in der institutionellen Etablierung dezentraler, modularer und/ oder flexibler Systeme in traditionell langfristig und auf Wachstum angelegten Infrastrukturbereichen. Dies erfordert ein koordiniertes und zielgerichtetes Zusammenspiel der relevanten Akteure, sodass die Frage des Governance und seiner Ausgestaltung eine wichtige Rolle spielt. Die Forschungsfrage lautet: Wie lässt sich ein integriertes Infrastrukturmanagement organisieren, das gleichzeitig alle beteiligten Infrastruktursparten (Strom, Gas, Nah-/ Fernwärme, Wasser, Abwasser, Telekommunikation, Straßenbaulastträger, ÖPNV-Betreiber) in einer größeren räumlichen Einheit umfasst und eine schonende Ressourcenverwendung mit den Lebensmodellen einer zunehmend pluralistischen Gesellschaft in Einklang bringt? Welche ökonomischen und regulatorischen Anreizsysteme könnten dabei helfen?

Die Entwicklung und Einführung innovativer Betreiber- und Innovationsmodelle stellt insbesondere in denjenigen Fällen eine Herausforderung dar, in denen Marktanteile oder Geschäftsfelder etablierter Institutionen berührt werden. Nachhaltige Geschäftsmodelle berücksichtigen unter den Schlagworten »nutzen statt besitzen«, »zentraler Betrieb dezentraler Anlagen« oder »variable Tarifsysteme« die ökonomische, ökologische und soziale Tragfähigkeit für alle beteiligten Akteure.

Neben den technischen Infrastrukturen spielen die sozialen Infrastrukturen für die Gestaltung der Lebensräume der Zukunft eine zentrale Rolle. Zentrale Herausforderungen sind der Umgang mit dem zu erwartenden Fachkräftemangel, der auch den Pflege- und Betreuungsbereich treffen wird, Finanzierungs- und Geschäftsmodelle, Visionen und Optionen des Stadt- und Siedlungsumbaus sowie nicht zuletzt die Beschäftigung mit dem Konflikt zwischen langer häuslicher Betreuung und der Notwendigkeit, Siedlungen aufzugeben.

Die Förderung lokaler Produktions- und Konsumstrukturen mit daran angepassten logistischen Netzwerken könnte dazu beitragen, die Wirtschaftskraft und die Lebensqualität in strukturschwachen Räumen zu erhalten. Herausforderungen für die Zukunft bestehen dabei im Design und der Stärkung innovativer lokaler Netzwerke aus Produktion, Handel und Logistik sowie der Analyse von Hemmnisfaktoren vergangener Pilotversuche.

Dabei ist zu anzumerken, dass es auch mit fortschreitender Tendenz zur Liberalisierung, Privatisierung und zu innovativen Betreibermodellen immer Infrastrukturen und netzbasierte Dienstleistungen geben wird, die aus verschiedenen



Gründen in staatlicher Hand bleiben. Dazu gehört die Ver- und Entsorgung mit Wasser durch traditionell zentrale Systeme, deren Bewirtschaftung fast vollständig einer öffentlichen Nutzungsordnung unterworfen ist (Leist 2007:71). Mit dem Einzug dezentraler Systeme sind jedoch auch hier privatwirtschaftliche Betreibermodelle denkbar, wobei der notwendige Regulierungsrahmen der öffentlichen Hand noch offene Fragen birgt. Darüber hinaus sind die zukünftigen Akteursstrukturen und -netzwerke sowie künftige rechtliche Rahmenbedingungen, v. a. auf Ebene der EU, noch sehr unbestimmt.

Bei der konkreten Ausgestaltung des Wohnens und Lebens in Siedlungen stellt sich die Frage, wie die sich immer weiter ausdifferenzierenden Lebensstile auf eine nachhaltige Basis gebracht werden können. Welche Ziel- und Anreizsysteme sind nötig, wie lässt sich die Akzeptanz ressourcenschonender Lebensweisen dauerhaft erhöhen und welche Rolle spielen regionale und soziale Gegebenheiten dabei?

Es sind zudem kleinräumige Prognosen nötig, die es langfristig ermöglichen, das »Verfallsdatum« von Siedlungen und deren Infrastrukturen von Beginn an konzeptionell zu berücksichtigen. Auf dieser Grundlage können dann innovative Instrumente des Baurechts und der Vermarktung von Flächen Anwendung finden, beispielsweise befristete Baugenehmigungen, Erbbaurecht, Leasingkonzepte etc. Was muss getan werden, um ein lebenszyklusbasiertes Management von Gebäuden und Infrastrukturen zu etablieren und zu standardisieren? Wie ist dies technisch zu realisieren, zu messen und zu beurteilen? Insofern stellt sich auch die Frage, wie sich rechtlich eine verursachergerechte Anlastung der Kosten für die vorhandene Siedlungs- und Infrastruktur bewerkstelligen lässt.

Die lokalen Planungsträger spielen eine entscheidende Rolle innerhalb dieses Forschungsthemas. Durch ihre kontinuierliche bessere IT-Ausstattung und Kompetenz ergeben sich in der Zukunft auch für kleinere Gemeinden größere Möglichkeiten der Planungssteuerung, als das heute der Fall ist. Es stellt sich z. B. die Frage, wie GIS-basierte Werkzeuge dazu beitragen können, die Folgen räumlicher Planung abzuschätzen und somit Siedlungspolitik zu evaluieren.

5.4 Warum ist das Zukunftsfeld relevant?

Eine leistungsfähige Infrastruktur ist Grundvoraussetzung für die Ausübung von Grunddaseinsfunktionen und die wettbewerbsfähige Produktion von Waren und Dienstleistungen. Ohne ausreichende Versorgung mit Bildungsstätten, Einrichtungen der Gesundheitsvorsorge sowie Verkehrswegen, Kommunikations- und Ver- und Entsorgungseinrichtungen sind ein qualitätsvolles Wohnen, die Gewährleistung von individuellen und kollektiven Bildungsstandards, eine aktive Teilnahme am öffentlichen Leben und eine prosperierende Ökonomie nicht vorstellbar (BBR 2005: 110; BMVBW/ BBR 2005: 11). Bereits heute wird viel



Forschung in diesem Zukunftsfeld betrieben. Teilweise mangelt es noch an Informations- und Datengrundlagen. Aber die eigentliche Relevanz des Themas ergibt sich dadurch, dass es noch häufig an Akzeptanz und politischem Willen fehlt, grundsätzliche Veränderungen am derzeitigen Siedlungs- und Infrastruktursystem vorzunehmen (vgl. auch: Overbeck et al.: 198). Um eine größere Dynamik und Flexibilität zu erreichen, sind eine enge Abstimmung sowie eine strategische Zusammenarbeit einer Vielzahl von Akteuren notwendig.

Aufgrund des oft noch zu schwachen ökonomischen Handlungsdrucks fehlt es bisher an einer systematischen Vernetzung der Akteure, z. B. der kommunalen Stadtplanung und der »Utility«-Unternehmen. Nötig wäre eine viel stärkere Kooperation der Akteure, die heute das Siedlungsbild der Städte und Regionen bestimmen. Dazu gehört neben der öffentlichen Planung auch der private Sektor, v. a. die Träger der ober- und unterirdischen Infrastruktur (wie Ver- und Entsorgung). Hinzu kommt die politökonomische und rechtliche Dimension des Problems, vor der Frage, wie eine verursachergerechtere Anlastung der Kosten und damit eine Entlastung der öffentlichen Hand gewährleistet werden kann.

Die Notwendigkeit, die Versorgung der Bevölkerung mit Produkten und Dienstleistungen auf eine nachhaltigere Basis zu stellen, ist eine globale Herausforderung. Insofern würde Deutschland auch von möglichem Technologieexport profitieren, wenn ressourceneffizientere Produkte entwickelt und durch neue Technologien Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen flexibler gestaltet werden können.

Die Gewährleistung der persönlichen und technischen Sicherheit stellt ein grundlegendes Bedürfnis der Bürger dar. Im Zuge der Zunahme der Gefahren von außen (z. B. durch den Klimawandel) müssen die Anstrengungen erhöht werden, durch technologische Innovationen die vorhandene Sicherheit auch in Zukunft zu garantieren.

5.5 Akteure im Innovationssystem heute

Angesichts der Breite des Zukunftsfelds sind es viele unterschiedliche Akteure, die das Innovationssystem im Zukunftsfeld bestimmen, z. B.

Akteure Zukunftsfähige Lebensräume

- | | |
|---|---|
| - ARL – Akademie für Raumforschung und Landesplanung | - Deutscher Städtetag, Städte- und Gemeindebund |
| - Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung – BBR (z. B. durch das Forschungsprogramm »Aufbau Ost«), inkl. des neugegründeten Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) als Ressortforschungseinrichtung im Geschäftsbereich des BMVBS | - Institutionalisierte Netzwerke von Fachleuten aus Wissenschaft und Praxis (z. B. Deutsche Akademie für Raumforschung und Landesplanung – ARL; Deutsche Akademie für Städtebau und Landesplanung – DASL); Vereinigung für Stadt-, Regional- und Landesplanung (SRL). |
| - Deutsches Institut für Urbanistik – DifU (z. B. durch den BMBF-Förderschwerpunkt »Forschung zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme und ein nachhaltiges Flächenmanagement – REFINA«) | - Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (z. B. im Bereich der Infrastrukturfolgekosten) |

Tabelle 4: Akteure Zukunftsfähige Lebensräume im Jahr 2009



Zentrale Akteure auf lokaler Ebene sind Kommunen, große Wohnungsbaugesellschaften und Genossenschaften, Ver- und Entsorgungsunternehmen, kommunale Versicherer (z. B. gegen Hochwasserschäden), die Bauwirtschaft, Verkehrsunternehmen, die Industrie, Handwerk und Dienstleistungsunternehmen bzw. diverse Lehrstühle, Institute und Planungsbüros, die als Auftragnehmer für derzeitige Forschungsvorhaben agieren.

Hervorzuheben ist, dass aktuell der Akademische Senat der TU Berlin die Einrichtung des fakultätsübergreifenden Innovationszentrums »Gestaltung von Lebensräumen« (IZ GvL, Sprecher Professor Rudolf Schäfer) beschlossen hat (vgl. TU Dresden 2009). Das Innovationszentrum hat sich zur Aufgabe gemacht, einen umfassenden Zugang zu den vorgefundenen, erforschbaren und mithin gestaltbaren Aspekten der gebauten und ungebauten Umwelt zu gewährleisten.

5.6 Zukunftsfähige Akteurskonstellationen

Die Potenzialanalyse tragfähiger Akteurskonstellationen basiert auf der im Laufe des Foresight-Prozesses vorgenommenen bibliometrischen Analyse des Innovationssystems sowie der durchgeführten Experteninterviews.

Bei dem Querschnittsthema »Zukunftsfähige Lebensräume« geht es sowohl um technologische und raumplanerische Aspekte als auch um soziale Themen und damit zusammenhängende Governance-Fragen. Aufgrund der Interdisziplinarität des Zukunftsfelds gibt es eine große Anzahl von Akteuren, die das Thema in Zukunft voranbringen könnte. Dabei sind gerade die deutschen Akteure geeignet, eine Vorreiterrolle zu spielen. Hier sind sowohl die Siedlungs- als auch die Infrastrukturentwicklung schon sehr weit fortgeschritten. Angesichts der geänderten Herausforderungen wird vielfach punktuell nach neuen Konzepten gesucht (z. B. angesichts des regional teils starken Schrumpfens der Bevölkerung in Ostdeutschland).

Eine Auswertung der Datenbank Web of Science mit einer Kombination der wichtigsten Schlüsselwörter in den Themen Infrastruktur, Governance und Lebensräumen hat gezeigt, dass die Vernetzung der Forschergemeinde(n) in den genannten Themen insgesamt noch sehr gering ist. Die Bibliometrie, basierend auf wissenschaftlichen Artikeln und Konferenzbeiträgen mit deutscher Beteiligung von 2006 bis 2009, zeigt, dass die meisten Veröffentlichungen von nur einer Institution (Forschungsinstitut, Universität etc.) herausgegeben wurden. Allerdings zeigen sich auch Ansätze für eine internationale Vernetzung – z. B. der Universität Stuttgart und der Landesanstalt für Umweltschutz BW mit der ETH Zürich im Zukunftsthema Flexible Ver- und Entsorgungssysteme. Eine übergreifende Partnerschaft zu etablieren wäre daher ein langfristiges Ziel, um die Forschung voranzutreiben.



Auch die interviewten ausländischen Experten sind in internationale Netzwerke zu den oben genannten Zukunftsfeldern eingebunden: Prof. Y. Hayashi von der Abteilung Umweltforschung der Universität Nagoya ist ein wichtiges Mitglied der Special Interest Group »Transport and Spatial Development« der World Conference of Transport Research Society (WCTRS), wo u. a. die Forschung zu Dynamik und Flexibilisierung von Raumentwicklungen und Infrastrukturen mit dem besonderen Fokus auf Verkehr gefördert wird.

Die interviewten deutschen Experten veröffentlichen aber in der Regel zusammen mit anderen deutschen Forschern in diesem Zukunftsfeld: Der Raumplanungs-Ingenieur Prof. Siedentop vom Institut für Raumordnung und Entwicklungsplanung der Universität Stuttgart (bis 2007 am Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung IÖR) hat in mehreren Studien zu den Auswirkungen des demographischen Wandels mit der TU Hamburg-Harburg (Jens-Martin Gutsche) sowie Prof. M. Koziol, Lehrstuhl Stadttechnik der TU Cottbus. Auch Prof. Dirk Vallee von der RWTH Aachen hat sich in seiner Tätigkeit als Leitender Technischer Direktor beim Verband Region Stuttgart bereits mit diesem Thema auseinandergesetzt (VRS). Folglich besteht noch ein großes Potenzial für künftige Vernetzungen im Zukunftsfeld, vor allem auf internationaler Basis.

Die vorhandenen Sonderforschungsbereiche der DFG beschäftigen sich zwar mit dem Zukunftsfeld, wenden sich allerdings stärker den Fragen der Siedlungsstruktur (SFB 564) und des Governance (SFB 700) außerhalb Deutschlands zu.

5.7 Empfehlungen

Aus der Literaturrecherche sowie den Expertenbefragungen ergibt sich, dass es bei zukunftsfähigen Lebensräumen besonders wichtig ist, neuartige Dienstleistungen im Zusammenhang mit technologischen Entwicklungen zu betrachten. Um die Forschung in diesem Zukunftsfeld voranzubringen und geeignete Instrumentarien zu entwickeln und zu implementieren, ist es nötig, die heute sektoral betriebenen Wissenschaften, wie die Infrastruktur-, die Demographie- und die Raumforschung, zusammenzubringen und eine integrierte Wissenschaftslandschaft für die Forschungsthemen *Flexible Ver- und Entsorgungssysteme*, *Dynamische Siedlungskonzepte* und *Governance* zu etablieren. Dies könnte ein strategischer Dialog leisten.

Ein erfolgversprechender Schritt wäre aus Sicht von Experten die Einrichtung von Sonderforschungsbereichen mit nationalem Bezug zu diesen Themen. Dabei ist es wichtig, nicht nur Forschungsinstitutionen, sondern auch Akteure aus der Praxis (d. h. z. B. Infrastrukturbetreiber, Bauwirtschaft etc.) in Forschungsvorhaben einzubinden, um beispielsweise Modellvorhaben zu realisieren oder Wettbewerbe auszuschreiben.



Es wird ebenfalls empfohlen, vorhandene lockere internationale Netzwerke mit deutscher Beteiligung auszubauen bzw. die Schaffung neuer Netzwerke zu ermöglichen. Dabei könnte das BBR als etablierte und anerkannte Forschungs- und Politikberatungsinstitution in allen raumrelevanten Fragestellungen eine besondere Rolle spielen.

Themenkoordination:

Dr. Stefan Klug, ISI (stefan.klug@isi.fraunhofer.de) und

Dr. Kerstin Cuhls, ISI (kerstin.cuhls@isi.fraunhofer.de)



6 ProduzierenKonsumieren2.0

Das Zukunftsfeld ProduzierenKonsumieren2.0⁴³ zielt auf langfristig zukunftsfähige Paradigmen von »Produzieren und Konsumieren«. Es erforscht damit neue Wege zur bedarfsgerechten Leistungserstellung bei veränderten globalen Rahmenbedingungen. Gleichzeitig adressiert es eine der größten Herausforderungen der Zukunft: den Erhalt der für den Menschen lebenswichtigen Ökosphäre.

Im Mittelpunkt der Forschung stehen zukunftsfähige Muster industriegesellschaftlicher Stoffumsätze. Etablierte Forschungsstränge aus Produktionsforschung, Dienstleistungsforschung, Umweltforschung, Biotechnologie und Materialwissenschaften arbeiten alle mit hoher Dynamik an Aspekten dieser Thematik. Sie können jedoch den notwendigen systemischen Wandel des Gesamtgefüges alleine nicht adäquat thematisieren.

Das Zukunftsfeld entwickelt daher Methoden und Konzepte, die es erlauben, diese Stränge zusammenzuführen und Muster von Stoffströmen in Produktion und Konsum integriert zu analysieren. Dazu werden existierende Konzepte aus der Nachhaltigkeits- und Innovationsforschung weiterentwickelt und auf konkret anstehende Pfadwechsel wie etwa die Generierung hochkonsistenter Kreislaufwirtschaftskonzepte⁴⁴ angewandt.

Auf diese Weise können neue Muster industriegesellschaftlicher Stoffumsätze entwickelt werden, die zentrale gesellschaftliche Bedarfswelder in deutlich nachhaltigerer Weise adressieren. Transformative Innovationen, die technologische und organisatorische Lösungen auf neue Weise verknüpfen, erschließen den Wandel zu solchen Mustern.

6.1 Das Zukunftsfeld

Forschung im Zukunftsfeld ProduzierenKonsumieren2.0 richtet sich auf langfristig zukunftsfähige Paradigmen von »Produzieren und Konsumieren«. Die zentrale Herausforderung an die Forschung ist dabei die Generierung zukunftsfähiger Muster für industriegesellschaftliche Stoffumsätze. Anstatt auf die Optimierung einzelner Elemente in Wertschöpfungsprozessen richtet sich der Blick von

⁴³ 2.0 steht für »neue Generation«.

⁴⁴ Zum Beispiel das »cradle2cradle«-Prinzip: Ein Modell für industrielle Prozesse, in dem alle Materialien in geschlossenen biologischen oder technischen Kreisläufen fließen. »Abfälle« existieren in diesem Sinne nicht, d. h. »Abfall« ist – wie in der Natur – gleichbedeutend mit »Nahrung«; vgl. Braungart et al. (2007).



ProduzierenKonsumieren2.0 auf den systemischen Wandel des Gesamtgefüges, wie er zunehmend von Akteuren aus Politik, Forschung, Wirtschaft und Gesellschaft gefordert wird, um die nötige drastische Reduktion des ökologischen Fußabdrucks menschlichen Wirtschaftens zu erreichen.⁴⁵ Es werden dezidierte Methoden und Konzepte zur integrierten Betrachtung von Forschungssträngen aus Produktions-, Umwelt- und Dienstleistungsforschung entwickelt und angewandt.

Motivation

Wie alle Zukunftsfelder neuen Zuschnitts des BMBF-Foresight-Prozesses ist ProduzierenKonsumieren2.0 sowohl aus der Dynamik existierender Zukunftsfelder heraus als auch aus der Analyse zukünftiger Anforderungen motiviert. Die Generierung zukunftsfähiger Stoffumsätze und grundlegender Paradigmenwechsel in Produktion und Konsum wurde im Rahmen des BMBF-Foresight-Prozesses sowohl in der Produktions- als auch in der Umweltforschung als maßgebliche langfristrelevante Forschungsfrage herausgestellt. Lösungsbeiträgen aus mehreren Zukunftsfeldern wie der Biotechnologie, der Nanotechnologie und der Materialwissenschaft wurde ein hoher Stellenwert beigemessen (vgl. Tabelle 5).

Energie und Ressourceneffizienz in der industriellen Produktion
Herausragendes Zukunftsthema im Zukunftsfeld Industrielle Produktion mit Schwerpunkt auf Schließung von Stoffkreisläufen

Management globaler Wertschöpfungsnetze
Zukunftsthema hoher Relevanz im Zukunftsfeld Industrielle Produktion

Paradigmenwechsel personalisierte Produktion z. B. durch generative Verfahren
Langfristrelevantes Thema im Zukunftsfeld Industrielle Produktion

Biomassebasierte und nachhaltige biotechnische Produktion
Zukunftsthema im Zukunftsfeld Biotechnologie

Molekulare Biologische Produktion
Zukunftsthema im Zukunftsfeld Biotechnologie

Biodegenerative Materialien
Zukunftsthema im Zukunftsfeld Materialien

Hybride Wertschöpfung
Zukunftsthema im Bereich Dienstleistungsforschung

Biobasierte Produktion
Zukunftsthema im Zukunftsfeld Biotechnologie

⁴⁵ Vgl. etwa das 2007 erstellte Potsdam Memorandum der Nobelpreisträger für eine »Große Transformation« <http://www.nobel-cause.de/potsdam-memorandumger> sowie BMU (2008).



Energieeffiziente Anwendungstechniken
 Forschungsgebiet herausragender Relevanz im Zukunftsfeld Energie

Energieeffizientes Verhalten
 Langfristrelevantes Zukunftsthema im Zukunftsfeld Energie

Tabelle 5: Aspekte von Stoffstrommustern in den Foresight-Ergebnissen

Dieses Ergebnis des Foresight-Prozesses entspricht den Erkenntnissen der Klima- und Nachhaltigkeitsforschung. Dort gilt als erwiesen, dass die massive Reduktion des ökologischen Fußabdrucks bei der Erfüllung gesellschaftlicher Grundfunktionen, die erforderlich ist, um die Ökosphäre und ihre für den Menschen lebenswichtigen Dienstleistungen zu erhalten, nur durch grundlegende Neuordnungen der bestehenden Produktions- und Konsummuster zu erbringen ist (Liedtke und Kuhndt 2009, Tukker und Butter 2005, BMU 2008). Die notwendigen Größenordnungen an »Impact«-Reduktion sind weder durch neue Umwelt- oder Energietechnologien noch durch verändertes Verhalten der Verbraucher, sondern nur durch Systeminnovationen der industriegesellschaftlichen Stoffumsätze zu erreichen (vgl. Abbildung 12). Solche »transformativen Innovationen«⁴⁶ bestehender Stoffumsatzmuster wie etwa der Übergang zu avancierten Kreislaufwirtschaftskonzepten oder zu kohlenstoffneutralem Wirtschaften beinhalten eine Vielzahl organisatorischer und technischer Innovationen und vor allem ihre neuartige Verknüpfung.

Diese Veränderungen spielen sich jedoch nicht bei konstanten Rahmenbedingungen ab. Eine Reihe relevanter globaler Rahmenbedingungen von Produktion und Konsum befinden sich ebenfalls im Fluss. Entwicklungen wie die globale Neuverortung von Produktion und Märkten, das Aufkommen einer lernintensiven Gesellschaft, neue Anforderungen durch veränderte Lebensstile und Werte sowie neue technologische Optionen aus Technologiefeldern wie der Informations- und Kommunikationstechnologie kennzeichnen den Hintergrund, vor dem sich erfolgreiche transformative Nachhaltigkeitsinnovationen bewegen werden müssen.

Somit ist die proaktive Generierung neuer Formen industriegesellschaftlicher Stoffumsätze einerseits von hohem Problemdruck getrieben. Gleichzeitig bieten sich jedoch durch die Öffnung zahlreicher Rahmenparameter weitreichende Chancen für tiefgreifende Innovationen, die zentrale Leitmärkte der Zukunft erschließen und gesellschaftlichen Bedarf in neuer Qualität erfüllen können.

⁴⁶ Transformative Innovationen generieren grundlegend neue Arten eine Funktion zu erfüllen. Dabei können sowohl technologische als auch organisatorische Elemente im Vordergrund der Neuerung stehen. Vgl. etwa Steward (2008).



6.2 Ausgangssituation im Zukunftsfeld heute (2009)

Deutschland ist in einer günstigen Stellung, die »Apollo-Mission« einer Neuordnung industriegesellschaftlicher Stoffumsätze anzugehen und damit die oben geschilderten Chancen zu erschließen. Der Aufbau des Zukunftsfeldes kann an eine Reihe von Aktivitäten anknüpfen:

- Strategische Plattformen wie Hightech Strategie, Masterplan Umwelttechnologien⁴⁷, Nachhaltigkeitsstrategie⁴⁸ und das BMBF Forum für Nachhaltigkeit (FONA) bieten exzellente Anschlussmöglichkeiten für das Zukunftsfeld.
- Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsstränge in Umweltforschung, Produktionssystemen, Materialwissenschaften, Biotechnologie und Dienstleistungsforschung adressieren Aspekte der oben geschilderten Herausforderungen. In vielen der beteiligten Technologiefelder ist Deutschland herausragend positioniert.
- Unter dem Dach der sozial-ökologischen Forschung (SÖF) werden Fragestellungen nachhaltiger Konsummuster intensiv und vielfältig thematisiert.
- Sozialwissenschaften, Innovationsforschung und Wirtschaftswissenschaften stellen zunehmend Konzepte zur Analyse von Ko-Evolutionsprozessen von Wirtschaft, Technik und Gesellschaft zur Verfügung.
- Weltweit anerkannte Institute wie das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie oder das Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) arbeiten an integrierten Konzepten nachhaltigen Wirtschaftens.
- Im Rahmen der »Industrial Ecology«⁴⁹ befinden sich avancierte Ansätze zur ganzheitlichen Untersuchung von Stoffumsatzmustern in der Entwicklung.

Keines der heute existierenden Forschungsfelder kann jedoch alleine die benötigte ganzheitliche Perspektive auf das Zusammenspiel sozio-technischer Innovationen für zukunftsfähige Stoffumsatzregimes generieren.

So kann etwa der ausschließliche Fokus auf Ressourceneffizienz in der industriellen Produktion den Blick auf neue Paradigmen mit deutlich größerem Entlastungspotenzial durch bessere Konsistenz mit natürlichen Prozessen gerade verstellen (etwa Braungart et al. 2007; Huber 2000). In ähnlicher Weise kann die Konzentration auf die Reduktion von Energieressourcen und Klimagasen zu

⁴⁷ <http://www.bmbf.de/de/13176.php>.

⁴⁸ http://www.bmu.de/nachhaltige_entwicklung/stategie_und_umsetzung/nachhaltigkeitsstrategie/doc/38935.php.

⁴⁹ Für einen aktuellen Überblick vgl. v. Gleich und Gößling-Reisemann (2008).



umfangreichen negativen »Rebound«-Effekten⁵⁰ führen (Liedke und Kuhndt 2009, S. 8). Ebenso kann ein »End-of-pipe«-Einsatz von Umwelttechnologien Chancen einer deutlich höheren Reduktion des Fußabdrucks etwa durch Dematerialisierung der Funktionserfüllung über neue Geschäftsmodelle verbauen.

Nur eine eigenständige systemische Perspektive, so die Diagnose des Foresight-Prozesses, kann die benötigten transformativen Innovationen mit der erforderlichen »Impact«-Reduktion hervorbringen, indem sie Elemente dieser heute weitgehend voneinander unabhängig operierenden Forschungsrichtungen systematisch integriert und im Hinblick auf transformatives Innovationspotenzial für zukunftsfähige Stoffumsätze untersucht. Hier setzt die Forschungsperspektive ProduzierenKonsumieren2.0 an.

6.3 Langfristperspektive des Zukunftsfeldes

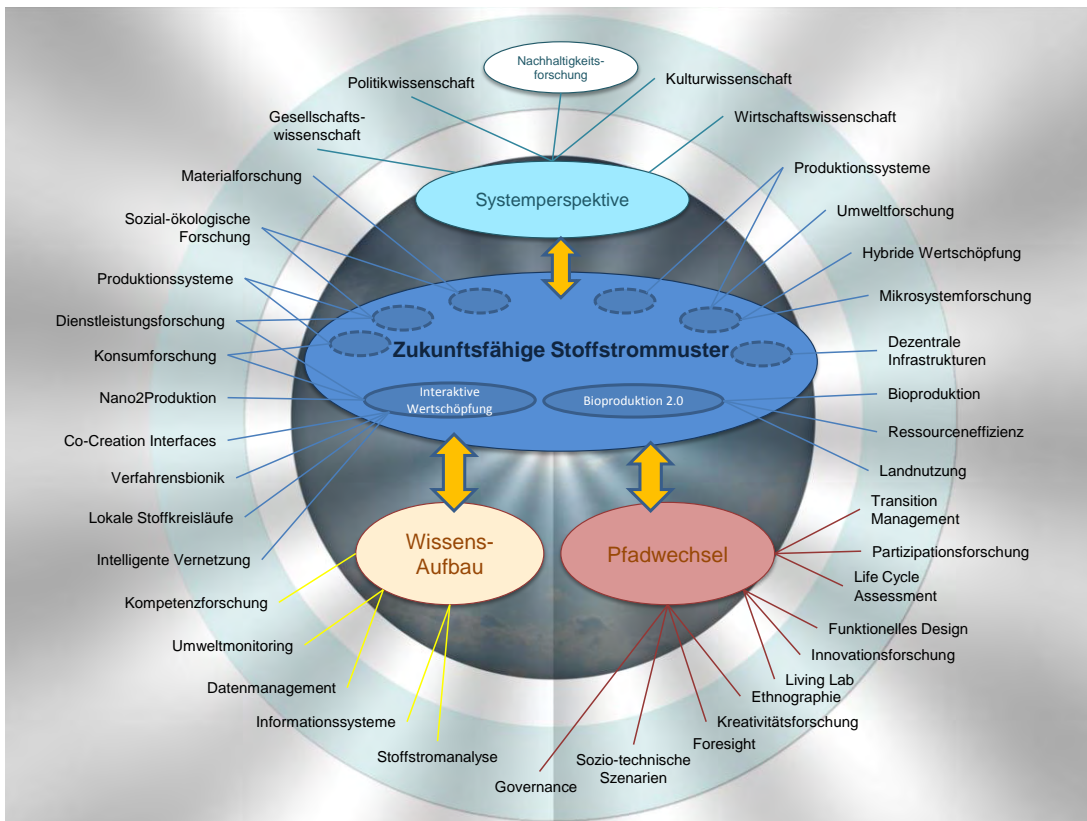


Abbildung 12: Mögliche Struktur des Zukunftsfeldes

⁵⁰ Bumerang-Effekte.



Dazu sind dezidierte Konzepte und Methoden erforderlich: Die Ansätze aus der Nachhaltigkeitsforschung und speziell der »Industrial Ecology« zur Erforschung von Stoffumsätzen müssen weiterentwickelt und mit den technologischen und sozialwissenschaftlichen Forschungssträngen verknüpft werden, um eine fachübergreifende **Systemperspektive** zu generieren. Des Weiteren braucht es Methoden, um nicht nur die neuen Muster selbst, sondern auch **Pfadwechsel** ausloten zu können. Schließlich ist die Verankerung von **Wissen** und Kompetenzen im Innovationssystem ein wichtiger Bestandteil des Zukunftsfeldes. In Abbildung 12 ist eine mögliche zukünftige Struktur des Zukunftsfeldes mit diesen Elementen skizziert. Deutlich wird die enge Interaktion der vier Themenschwerpunkte.

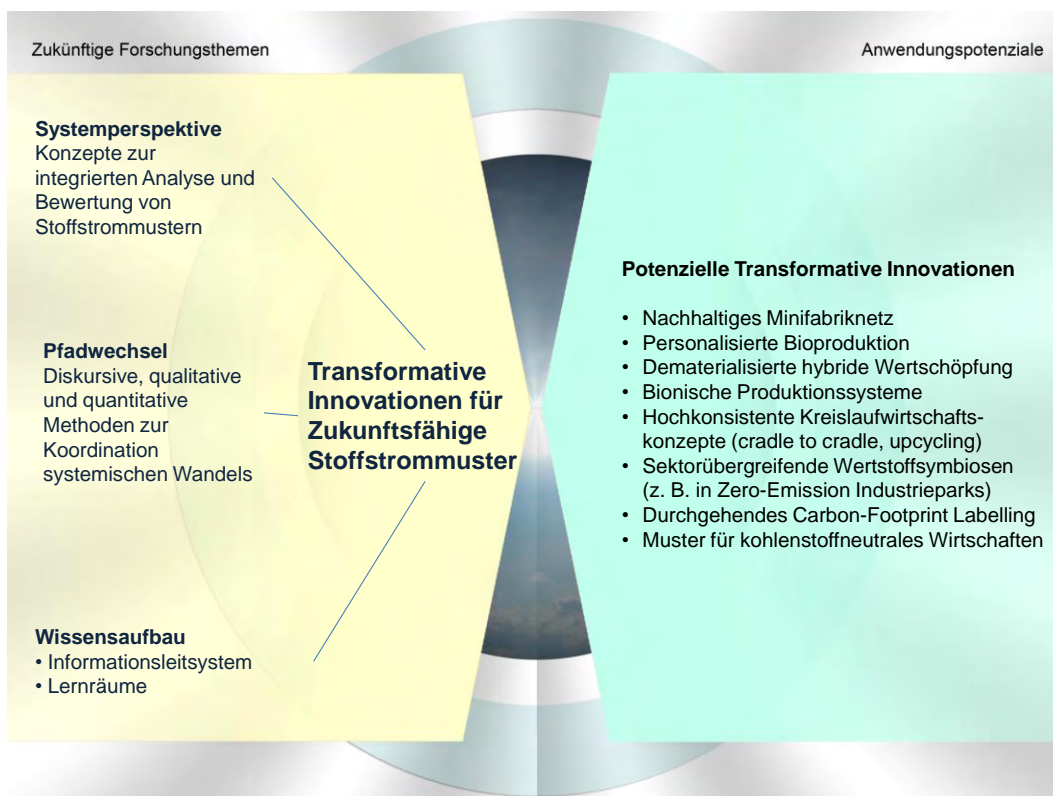


Abbildung 13: Zukünftige Forschungsthemen und Anwendungspotenziale im Zukunftsfeld »ProduzierenKonsumieren2.0«

In Abbildung 13 sind einige Innovationen, die aus dem so aufgestellten Forschungsfeld hervorgehen könnten, angeordnet. Dabei handelt es sich nicht um einzelne Produkte oder Technologien, sondern stets um integrierte Konzepte, die auch Geschäftsmodelle, Organisationskonzepte und Transformationspfade umfassen.

Im Folgenden werden die vier potenziellen Forschungsbereiche umrissen.



Themenschwerpunkt Zukunftsfähige Stoffumsatzmuster

Im Zentrum des Zukunftsfeldes steht die transdisziplinäre, systemische Erforschung zukunftsfähiger Muster von Produzieren und Konsumieren und möglicher Entwicklungspfade zu diesen Mustern. Hier werden avancierte Konzepte aus Wissenschaft und Technologie, die auf dem äußeren Kreis in Abbildung 12 aufgetragen sind, systematisch zusammengeführt, um zukunftsfähige Konfigurationen auszuloten. Maßgebliche Beiträge sind insbesondere von der Produktionsforschung, der Dienstleistungsforschung und der Nachhaltigkeitsforschung sowie der sozialökologischen Forschung zu erwarten. Daneben steuern jedoch auch Felder wie Biotechnologie, Infrastrukturtechnologie, Materialforschung, Nanotechnologie und Informations- und Kommunikationstechnologie zentrale Forschungsperspektiven bei.

Um die Komplexität der Wechselwirkungen zwischen den Technologiefeldern handhabbar zu machen, scheint es aus unserer Sicht sinnvoll, die Forschung zunächst dort zu konzentrieren, wo sich ein hohes Synergiepotenzial oder eine zukunftskritische Pfadverzweigung für Muster von Produktion und Konsum und damit für industriegesellschaftliche Stoffstromumsätze abzeichnet. Für diese ausgewählten »Brennpunkte« werden die Technologiefelder gezielt zusammengeführt und integrierte Entwicklungspfade generiert und bewertet. Die Brennpunkte werden erst nach und nach – etwa durch ein fachübergreifendes Akteurspanel – identifiziert.

In der nachfolgenden Aufzählung sind einige mögliche Musterwechsel zusammengestellt, die auf diese Weise untersucht werden könnten. In den folgenden Abschnitten werden zwei konkrete Beispiele ausgeführt.

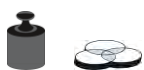
Beispiele für mögliche Musterwechsel von Stoffstromumsätzen

- Nutzungszentrierte Geschäftsmodelle (z. B. »value for use«)
- Hybride Wertschöpfung⁵¹
- Kohlenstoffneutrales Wirtschaften⁵²
- »Green Chemistry« (vgl. Gesellschaft Deutscher Chemiker 2003)
- Dematerialisierte Wertschöpfung
- Interaktive Wertschöpfung⁵³

⁵¹ Systematische Integration von Produkt und Dienstleistung in Leistungspaketen (vgl. Ernst 2005).

⁵² Auch »Post-Carbon Economy«, z. B. Wasserstoffwirtschaft (vgl. etwa Schellnhuber und Pietsch 2008).

⁵³ Wertschöpfung mit hohem Eigenanteil von Kunden/Nutzern (vgl. Reichwald et al. 2006).



- Bionische Verfahrenskonzepte (z. B. Kaskadenmodelle)
- Personalisierte Wertschöpfungsketten mit Bioraffinerien der zweiten Generationm (vgl. Zukunftsfeld Biotechnologie)
- Sektorübergreifende Wertstoffsymbiosen (z. B. Zero-Emission Industrieparks)

Beispiel 1: Zukunftsfähiges Stoffstrommuster – Personalisierte Bioproduktion

Bioraffinerien der zweiten Generation ermöglichen die Erzeugung von einsatzfähigen Materialien aus pflanzlichen Rohstoffen. Dies erlaubt perspektivisch eine »on site« Rohstoffproduktion aus lokal vorhandenen Rohstoffen. Dies könnte es ermöglichen, kostengünstig und flexibel eine Vielzahl von Materialien zu generieren, die gleichzeitig in hohem Maße kreislaufwirtschaftlichen Prozessen und Nachhaltigkeitskriterien (z. B. deutlich geringerer Energieverbrauch durch niedrige Prozesstemperaturen) entsprechen.

Für eine Zeitperspektive 2020+, in der eine deutlich strengere Umweltgesetzgebung und hohe Anforderungen an »grüne« Produkte mit hoher Wahrscheinlichkeit die Rahmenbedingungen der industriellen Produktion maßgeblich bestimmen werden, sind dies bedeutende Vorteile. Zudem entfallen möglicherweise weite Transportwege und komplexe Logistikkonzepte, da die Materialien vor Ort entstehen. Auch dies kann bei sich verschärfender globaler Sicherheitslage, die heute selbstverständliche Transportwege und Rohstoffversorgung in Frage stellen wird, sowie steigenden Energiekosten in diesem Zeithorizont ein gewichtiges Kriterium darstellen. Zudem könnte die lokale Verankerung der Rohstoffe Teil eines regional orientierten Geschäftsmodells sein.

Andererseits wird in dieser Zeitperspektive die Forderung nach personalisierten Produkten, die einer Vielzahl von Nutzungsbedingungen gerecht werden, womöglich noch stärker ausgeprägt sein als heute. Technologien wie die intelligente agile Produktion individueller Produkte und Konzepte der »extremen Personalisierung« könnten breite Anwendung gefunden haben. Viele Produktionssysteme werden mit in-situ Qualitätskontrolle, voller Echtzeitsimulation und mit hohem Automatisierungsgrad und hoher »Selbststeuerung« eingebunden in weltweite Netzwerke operieren. Möglicherweise werden bei vielen Produkten bis zum letzten Moment individuelle Wünsche von Kunden berücksichtigt werden können. Beide technologische Entwicklungen, Bioproduktion und Personalisierung, reagieren auf heute wahrgenommene Bedarfsentwicklungen.

Um jedoch die Potenziale beider Forschungsstränge voll ausnutzen zu können, bedarf es eines integrierten Entwicklungspfades. Werden biotechnologische Produktionsverfahren lediglich nachträglich an extrem personalisierte Produktionsinseln angehängt, bleiben die Vorteile gering. Kommt jedoch statt einer Op-



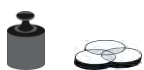
timierung des bestehenden Paradigmas eine integrierte transformative Innovation zur »personalisierten Bioproduktion« in den Blick, erschließen sich Potenziale an Zukunftsfähigkeit in neuen Dimensionen. Gleichzeitig ergeben sich jedoch zahlreiche Herausforderungen für Forschung und Technologie. Wie kann in-situ Qualitätssicherung mit biotechnologisch erzeugten Materialien einhergehen? Welche Sensorik wird gebraucht? Was ist die optimale Form der »Materialübergabe«, welche Schritte können innerhalb der Raffinerie, welche innerhalb des Fertigungssystems oder welche gar »auf dem Feld« stattfinden? Können diese Materialien in der nötigen Vielfalt zur Verfügung gestellt werden, kann die Personalisierung sich auf die Materialproduktion erstrecken? Wie kann mit den natürlichen Schwankungen in der Beschaffenheit der Rohstoffe umgegangen werden? Welche Geschäftsmodelle sind für eine solche Erweiterung denkbar? Wie kann die Bioraffinerie in die Echtzeitsimulation und -steuerung eingebunden werden?

Solche Fragestellungen müssten vom entsprechenden Forschungsprojekt erst identifiziert und dann angegangen werden. Dabei müssten Bewertungsmethoden zur Nachhaltigkeit verschiedener Konzepte unter Einbezug einer globalen Perspektive zum Einsatz kommen. Parallel könnte eine Pilotanlage Bioproduktion2.0 als Lernraum nicht nur für Forschung und Technologie, sondern auch für Akteure wie Anlagenbetreiber, regionale Behörden, Verbraucherverbände sowie Ver- und Entsorger dienen.

Beispiel 2: Zukunftsfähiges Stoffstrommuster – Nachhaltiges Minifabriknetz

Miniaturisierung ist in der Produktion seit vielen Jahren eine zentrale Forschungsperspektive. Zum einen geht es dabei um die Fertigung immer kleinerer und höher integrierter Mikrosysteme. Gleichzeitig gerät aber auch die Miniaturisierung der Produktionseinheiten selbst zunehmend in den Blick. Minifabriken sind dabei weniger für »winzige Produkte« als vielmehr für die Vor-Ort-Produktion maßgeschneiderter Einzelprodukte gedacht (vgl. Reinhart et al. 2000). Im Extremfall können sie beim Kunden selbst (z. B. zur Ersatzteilproduktion), in der Fabrik oder gar im häuslichen Umfeld, in der Form von 3D-Druckern, zum Einsatz kommen.

Die Vision eines Netzwerkes von Minifabriken als Alternative zur zentralisierten Massenproduktion wiederum stellt erhebliche technologische und organisatorische Herausforderungen. So fehlen etwa Designkonzepte für die hoch individualisierte verteilte Produktion. Zudem werden geeignete Kundenschnittstellen benötigt, in denen die individuellen Anforderungen erfasst und in umsetzbare Produktionsanweisungen übersetzt werden. Auch dieses Konzept antwortet auf heute vermutete Zukunftsherausforderungen, allen voran die Diversifizierung der Lebensstile, aber auch auf einen zunehmenden Bedarf nach kreativer



Teilhabe an der Erzeugung von Produkten als Teil der Identitätsformung. Dies wiederum impliziert zum einen neue Verschränkungen von Produktion und Dienstleistungen mit neuen Anforderungen an Organisation und Technologien etwa in Richtung kreative Dienstleistungen, zum anderen ein erheblich erweitertes Spektrum produktbegleitender Dienstleistungen mit hybriden Geschäftsmodellen, die Produkt und Dienstleistungen neu integrieren.

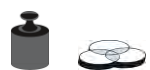
Zugleich ist jedoch völlig unklar, was der Wechsel zu solchen Paradigmen von Wertschöpfung für die ökologische Nachhaltigkeit bedeutet. Einerseits bestehen hohe Potenziale durch eingesparte Wege und Vermeidung von Überschussproduktion. Andererseits kann sich Energie- und Ressourcenverbrauch sowie Schadstoffeintrag in die Umwelt durch unkontrollierte verteilte Produktionskonzepte erhöhen. Hier hängt viel davon ab, dass frühzeitig die Weichen auf »nachhaltig« gestellt werden. Zahlreiche Forschungsfragen ergeben sich sowohl im technologischen Bereich – etwa Infrastrukturen für verteilte Minifabriken, Equipment für semi-virtuelle Ko-Kreationsräume, geeignete Materialien – als auch bei den Dienstleistungs- und Produktionskonzepten.

Gleichzeitig spielt hier Wissen über mögliche menschliche Verhaltensmuster, wie sie etwa die Umweltpsychologie oder die sozialökologische Forschung, aber auch die ethnografische Forschung und die Kulturwissenschaften aufweisen, eine große Rolle. Welche Ausprägungen verteilter Wertschöpfung sind denkbar und zukunftsfähig? Das sind Fragen, die nur durch neue Bewertungsverfahren und kreative Methoden beantwortet werden können.

Auch hier sind wieder Lernräume für Akteure und Methoden vonnöten, um diese Lernräume zu gestalten. Denkbar wäre etwa ein »living lab« für verschiedene Ko-Kreationsräume mit angeschlossenen Minifabriken. Unverzichtbar sind dabei ganzheitliche Bewertungsverfahren des ökologischen Fußabdrucks der generierten Konzepte. Nur diejenigen Verfahren mit deutlicher Reduktion werden auch in Zeiten stark ausgeprägten Klimawandels zukunftsfähig sein. Dabei wird für das ökointelligente Minifabriknetz auch eine soziale Komponente von Nachhaltigkeit zu untersuchen sein – so verknüpfen sich mit der weltweiten Neuordnung von Rollen und Orten von Wertschöpfungselementen sowohl Hoffnungen als auch Befürchtungen, was die Ansiedlung neuer hochqualifizierter Produktionsarbeitsplätze anbelangt.

Themenschwerpunkt Systemperspektive

Die Generierung zukunftsfähiger Muster und entsprechender transformativer Innovationen kann nicht unmittelbar mit »Bordmitteln« der beteiligten Disziplinen geleistet werden. Es bedarf dazu neuer Forschungsmethoden, die die Integration der heterogenen Wissensbestände und Forschungsstränge sowie die Identifikation möglicher Paradigmenwechsel erlauben. Forschung zu zukunfts-



fähigen Stoffstromumsätzen muss zudem konsistent in umfassende global orientierte Konzepte nachhaltiger Wirtschaftsformen eingebunden sein. Andernfalls besteht die Gefahr, dass Teilsysteme auf Kosten der Nachhaltigkeit des Gesamtsystems optimiert werden. Ganzheitliche Bewertungsverfahren werden zur Abwägung der Zukunftsfähigkeit möglicher Formationen benötigt, um eine einseitige Fokussierung zu vermeiden und das Ausbalancieren zwischen konfligierenden Zielen zu unterstützen.

In dem Themenschwerpunkt »Systemperspektive« werden daher dezidierte qualitative, quantitative und diskursive Methoden zur Erforschung und Bewertung systemischen Wandels von Stoffstrommustern entwickelt. Er wird maßgeblich von der Nachhaltigkeitsforschung und insbesondere der »Industrial Ecology« (v. Gleich, Gößling-Reisemann 2008) gespeist. Deren Konzepte werden unter Einbeziehung anderer Disziplinen wie Umweltökonomie, Innovationsforschung, Komplexitätsforschung und Systemdesign weiterzuentwickeln sein.

Beispiele Methoden und Konzepte Systemperspektive

- Innovationslebenszyklusanalyse, Produktlebenszyklusanalyse
- MIPS (MIPS: Material Input je Einheit Nutzen. Schmidt-Bleek 1993), Carbon-Fußabdruck, Faktor 10-Analyse
- Ökoeffektivität
- Konsistenzanalyse
- Sozio-technische Szenariobildung
- Umweltökonomische Modellierung
- Innovationssystemdynamik (Ko-Evolution, Multi-Level-Konzept) (Geels et al. 2007)

Themenschwerpunkt Pfadwechsel

Dieser Themenschwerpunkt untersucht Wege zur Moderation des Wandels hin zu den als zukunftsfähig identifizierten Mustern und Pfaden.

Innovationsprozesse entstehen in der Interaktion der beteiligten Akteure. Daher ist eine Integration technischer, soziologischer, pädagogischer und psychologischer Bewertungs- und Entwicklungsmethoden erforderlich, um Systemwandel an Schnittstellen zu verstehen und herbeizuführen. Dabei sollten vor allem auch Potenziale aus Disziplinen außerhalb der bisher mit Nachhaltigkeitstransformation beschäftigten – wie Design, Marktforschung, Ethnographie, Kulturwissenschaften, Verhaltensforschung, Innovationsmanagement, Governanceforschung, Interaktionsforschung und Kreativitätsforschung – erschlossen wer-



den. Insbesondere diskursive Methoden zur Moderation von Akteursdiskursen etwa aus dem Bereich des Transition-Management (Rotmans und Kemp 2005) könnten hier aufgegriffen werden.

Themenschwerpunkt System-Wissen und Kompetenz

Schließlich ist ein systematischer Aufbau von Systemwissen und Kompetenz notwendig. Hierunter fällt zum einen die Entwicklung eines Informationsleitsystems, in dem mikro- und makrowirtschaftliche Daten zur Bewertung von Wertschöpfungsnetzen erhoben, zusammengeführt und den Akteuren des Innovationssystems zugänglich gemacht werden. Zum anderen umfasst dieser Bereich die Etablierung geteilter Lernräume zu transformativen Innovationsprozessen für relevante Akteure des Innovationssystems. Dies beinhaltet weit mehr als nur die reine Umsetzung der in dem Kernbereich generierten Lösungskonfigurationen. Vielmehr ist die Frage, wie Innovationssysteme auf allen Ebenen die Lernprozesse etablieren können, die für transformative Innovationen benötigt werden. Diese Frage ist als eigenständiges Forschungsfeld zu verstehen. Hier werden Kompetenz- und Bildungsforschung zentrale Beiträge leisten. Daneben werden auch Governance-Instrumente wie Foresight und partizipative Technikbewertung, ebenso wie »Living Labs«, Ethnographie und Ansätze aus dem Bereich von »Open Innovation« und Nutzerinnovation einfließen. Akteuren des Innovationssystems insbesondere aus Unternehmen, Bildungseinrichtungen, Verbänden und gesellschaftlichen Initiativen werden aktive Rollen zukommen.

6.4 Warum ist das Zukunftsfeld relevant?

Die Etablierung nachhaltiger Wirtschaftsweisen stellt **die** zentrale globale Herausforderung der Zukunft dar. Die zum Erhalt der lebensnotwendigen Ökosphäre notwendige drastische Reduktion des ökologischen Fußabdrucks menschlichen Wirtschaftens ist nur durch Systeminnovationen der Stoffumsatzmuster zu erreichen (vgl. Abbildung 14).

Transformative Innovationen zur Reduktion des ökologischen Fußabdrucks von Produzieren und Konsumieren werden die Leitmärkte der Zukunft bestimmen.⁵⁴ Mit dem Einstieg in die Forschungsperspektive von ProduzierenKonsumieren2.0 kann sich Deutschland auch über 15 Jahre hinaus eine führende Stellung in bedeutenden Innovationsfeldern der Zukunft sichern. Das Zukunftsfeld führt damit Ziele und Ansätze aus Hightech-Strategie und Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung zusammen.

⁵⁴ »Die Nachfrage der Weltwirtschaft wird sich gerade in schwierigen Zeiten auf die dringendsten Bedarfslfelder ausrichten.« BMBF Forschung und Innovation für Deutschland. Bilanz und Perspektive, S. 4.



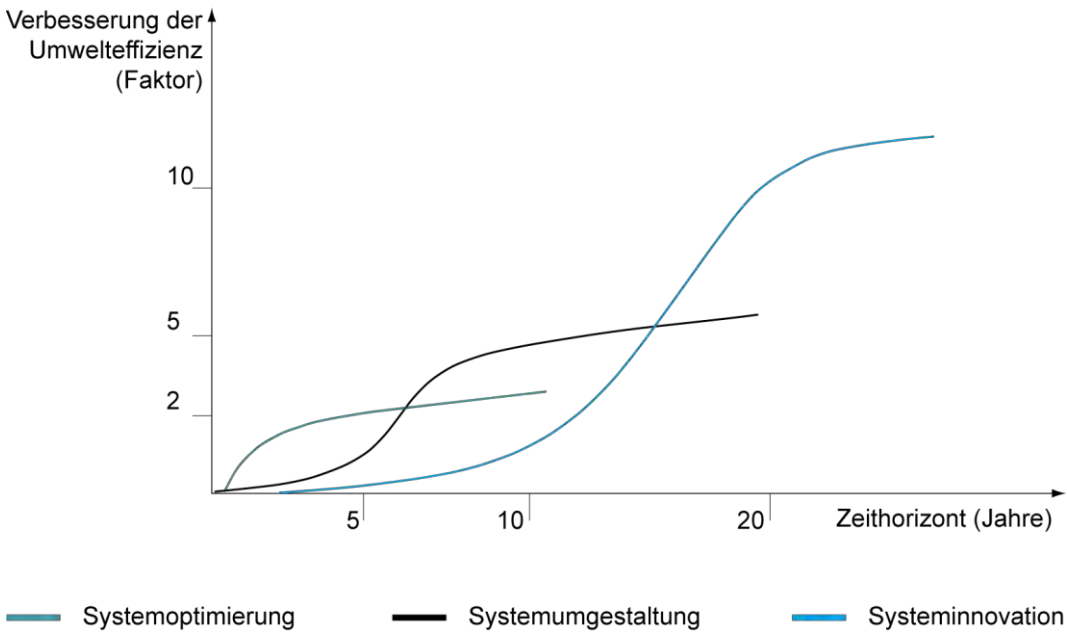


Abbildung 14: Effizienzsteigerung durch Systeminnovation (aus Tukker und Butter 2005)

Die Forschungsperspektive ProduzierenKonsumieren2.0 ist von außerordentlicher Relevanz für die wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands und die Lebensqualität der Bürgerinnen und Bürger und hat erhebliche Ausstrahlkraft in zahlreiche Forschungs- und Technologiefelder.

6.5 Akteure im Innovationssystem heute

Wie schon im letzten Abschnitt angedeutet, bestehen in Deutschland stark ausgeprägte Forschungszusammenhänge in allen für das Zukunftsfeld relevanten Einzelbereichen. Um jedoch die Schnittmenge zu erschließen, müssen, wie im vorherigen Abschnitt für jeden Themenschwerpunkt umrissen, zunächst die Basisfelder, aber dann auch ganz neue Disziplinen einbezogen werden. Tabelle 6 bietet die Zusammenstellung einer Auswahl heutiger Akteure aus der Forschungslandschaft, die aus ihrer jeweiligen Perspektive heraus Aspekte des Zukunftsfeldes beforschen und damit eine hohe Anschlussfähigkeit zu dem Zukunftsfeld aufweisen.

Akteure ProduzierenKonsumieren2.0

- Institute for Advanced Sustainability Studies, Potsdam (in der Gründung) (quer)
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (quer)
- UNEP/ Wuppertal Institute Collaborating Centre on Sustainable Consumption and Production (CSCP) (quer)
- Forschungszentrum Nachhaltigkeit Universität Bremen (ARTEC) (quer)
- Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München (Muster (Produktion))
- Technische Universität Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Abteilung Produkt- und Life-Cycle-Management, Lehrstuhl Produktion und Logistik, Arbeitsgruppe Wertschöpfungsnetzwerke (Muster (Produktion))
- DFG-Exzellenzcluster der RWTH Aachen: »Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer« Schwerpunkte Individualisierung, die



- Lehrstuhl für Umweltmanagement Universität Hohenheim, Prof. Schulz (Muster (Umwelt))	Virtualisierung, die Hybridisierung und die Selbstoptimierung der Produktion (Muster (Produktion))
- Universität Bremen, Fachbereich Produktionstechnik, Fachgebiet Technikgestaltung und Technologieentwicklung, Prof. Dr. Arnim von Gleich (quer, Industrial Exology)	- Technology & Innovation Management Group, RWTH Aachen, Prof. Frank Piller (Muster (Produktion))
- IÖW – Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH, Berlin (System)	- Fraunhofer Gesellschaft Verbund Produktion insbesondere:
- Ecologic – Institut für Internationale und Europäische Umweltpolitik gGmbH, Berlin (System)	- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF Universität Stuttgart Bereich Fabrikbetrieb/ Fraunhofer IPA (Wertstromdesign, Lean Manufacturing)
- Öko-Institut für angewandte Ökologie e. V., Freiburg (System)	- Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (Umsicht) Ressourcenmanagement, Oberhausen (Muster (Produktion))
- econcept – Agentur für Nachhaltiges Design, Köln (System)	- Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung (Muster (Produktion))
- Technische Universität Berlin, Zentrum Technik und Gesellschaft (ZTG) (System)	- VDI Rapid Manufacturing Plattform (Muster (Produktion))
- Lehrstuhl für Ökologische Ökonomie, Universität Oldenburg, Fakultät Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften, Oldenburg (System)	- Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen, Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele, Forschungsgruppe umweltgerechte Produktion (Muster (Produktion))
- Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) (System)	- Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktion WGP Fachgruppe Produktionsmanagement (Muster (Produktion))
- Technische Universität Darmstadt, IANUS (Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Naturwissenschaft, Technik und Sicherheit) (System)	- Ecosign/ Akademie für Gestaltung, Köln (Muster (Design))
- Professur für Nachhaltigkeitsmanagement an der Universität Lüneburg. Centre for Sustainability Management, Prof. Dr. Stefan Schaltegger (System)	- Lehrstuhl Produktion und Umwelt, Institut für Betriebswirtschaftslehre und Wirtschaftspädagogik der Universität Oldenburg, Prof. Uwe Schneidewind (Muster (Produktion))
- Deutsche Materialeffizienzagentur VDI/ VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin. (System)	- Münchner Projektgruppe für Sozialforschung e. V. Prof. Dr. Karl-Werner Brand, Technische Universität München, München (Muster (Gesellschaftlicher Wandel))
- Universität Kaiserslautern, Fachbereich Volkswirtschaftslehre, insbesondere Wirtschaftspolitik und internationale Wirtschaftsbeziehungen, Prof. Dr. Michael von Hauff (System (Ökonomie))	- Forschungsinstitut für Rationalisierung (FIR) RWTH Aachen, Dr. Volker Stich (Muster (Dienstleistung))
- Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) GmbH, Berlin (Pfadwechsel, System)	- Fraunhofer IAO, Geschäftsfeld Dienstleistungs- und Personalmanagement, Stuttgart (Muster (Dienstleistung))
- DIALOGIK gemeinnützige Gesellschaft für Kommunikations- und Kooperationsforschung mbH (Stuttgart) (Pfadwechsel (Diskursive/Partizipative Verfahren))	- Fraunhofer ISI, Geschäftsfeld Industrielle Dienstleistungen (Muster (Dienstleistung))
- Kulturwissenschaftliches Institut Essen, Responsibility Research (Pfadwechsel)	- Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Karlsruhe Service Research Institute, Prof. Dr. Gerhard Satzger (Muster (Dienstleistung))
- Universität Lüneburg, Institut für Umweltkommunikation (Pfadwechsel)	- Lehrstuhl für Informationssysteme, Schwerpunkt Innovation & Value Creation an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Prof. Dr. Kathrin Möslin (Muster (Dienstleistung))
- Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) (Muster (Umwelt))	- International Business School of Service Management (ISS), Lehr- und Forschungsgebiet Service Management in Hamburg, Prof. Dr. Tilo Böhmann (Muster (Dienstleistung))
- Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) GmbH, Frankfurt a. M. (Muster (sozialökologische Forschung))	- TU Harburg Technische Mikrobiologie (Life Science for future technologies) (Muster (Bioproduktion))
- Sonderforschungsbereich/ Transregio 29, Engineering hybrider Leistungsbündel – Dynamische Wechselwirkungen von Sach- und Dienstleistungen in der Produktion (Muster (Produktion, Dienstleistung))	- Universität Hamburg, Forschungsschwerpunkt Biotechnik, Gesellschaft und Umwelt (Muster (Bioproduktion))

Tabelle 6: Akteure ProduzierenKonsumieren2.0

6.6 Zukunftsfähige Akteurskonstellationen

Diese Auswahl kann gleichzeitig als Ansatzpunkt für die Bildung tragfähiger Akteurskonstellationen dienen. Akteure, die sich in unmittelbarer Nähe zu dem Zukunftsfeld bewegen und mehrere Themenbereiche abdecken, sind mit »quer« bezeichnet. Bei einem Aufbau des Forschungsfeldes müssen Akteure



aus Industrie und Gesellschaft systematisch einbezogen werden. Die Identifikation der Akteure aus diesen Bereichen wäre eine prioritäre Aufgabe beim Aufbau des Zukunftsfelds.

6.7 Empfehlungen

Aufbau einer PK2.0-Forschungscommunity

Der Aufbau der Forschungsgemeinde («Community») ist nach Einschätzung der Themenkoordinatorinnen eine zentrale Herausforderung, da die relevanten Akteursstränge bisher nur wenige Berührungspunkte aufweisen. Eine zu frühe Forcierung kann kontraproduktiv sein. Es scheint sinnvoll, zunächst ausgewählte Akteure aus dem oben genannten Kreis einzeln nach möglichen Anknüpfungspunkten zu befragen und dann in einem nächsten Schritt mit einer Kerngruppe aus geeigneten Vertretern der verschiedenen Forschungsfelder und Organisationen einen Lenkungskreis zu bilden. Dieser könnte dann einen ersten Vorschlag für eine Forschungsagenda entwickeln. Nach und nach könnten in weiteren Runden andere Felder einbezogen werden.

Aufbau PK2.0-Innovationssystem

Ein technologisches Innovationssystem umfasst Akteure, Netzwerke und Institutionen, die eine Technologieentwicklung beeinflussen (Bergek 2008). Es erschließt Forschungsergebnisse erst, indem es diese in eine Vielzahl verteilter Lernprozesse einbindet. Der Aufbau eines PK2.0-Innovationssystems ist daher ein zentrales Handlungsfeld. In einem ersten Schritt ist ein systematisches Mapping der Komponenten vorzunehmen.

Die **Industrie** wird maßgeblicher Träger der Entwicklung und Umsetzung der PK2.0-Innovationen sein. Daher müssen Akteure aus großen und kleinen Unternehmen verschiedener Branchen früh in den Aufbau einbezogen werden. Systemische Innovation von Produktions- und Konsummustern beinhaltet sozio-technische Innovationen in allen gesellschaftlichen Bereichen. Der Kreis der zentralen Innovatoren reicht daher weit über die engere Forschungslandschaft hinaus und schließt Akteure der **Zivilgesellschaft** wie Stiftungen und Bürgerinitiativen als Promotoren sozialer und organisatorischer Innovationen («Social Entrepreneurs») ein. Zum dritten spielen Akteure des öffentlichen Sektors und der **Politik** eine maßgebliche Rolle.

Dieses »Triangle of Change« muss im Bereich PK2.0 erst geschaffen werden. Dazu ist der Aufbau von Kapazitäten und vertrauensvoller Beziehungen sowie die gemeinsame Entwicklung integrativer Ansätze zentral (Liedtke und Kuhndt 2009; auch Smits und Kuhlmann 2004). Die Entwicklung der nach den Erkenntnissen der Innovationsforschung für das Funktionieren technologischer



Innovationssysteme zentralen Elemente⁵⁵ sollte beobachtet und begleitet werden. Da sich das betreffende System noch in einer sehr frühen Phase befindet, werden insbesondere geteilte Leitvorstellungen und gemeinsame Erwartungen der verschiedenen Akteure des Innovationssystems relevant sein. Hier können unserer Einschätzung nach diskursive Prozesse wie Leitbild- oder Szenariodialoge eine maßgebliche Rolle spielen.

Aus der Sicht des Projektteams wäre es sinnvoll, dass in dem PK2.0-Lenkungs-kreis so früh wie möglich maßgebliche Akteure des Innovationssystems vertreten sind.

Handlungsfeld: Internationaler Anschluss

Angesichts der Notwendigkeit einer globalen Ausrichtung der Forschung und Entwicklung in ProduzierenKonsumieren2.0 ist der Anschluss an die internationale Forschungslandschaft zentral. Es sollten daher unserer Auffassung nach-Anknüpfungspunkte an verwandte Prozesse der Community und Strategiebildung auf EU- und internationaler Ebene (OECD, UN) sondiert werden. Folgende Prozesse könnten solche Anschlussmöglichkeiten bieten:

- Strategische Aktivitäten im Themenbereich 4 des 7. Rahmenprogramms (»Nanosciences, Nanotechnologies, Materials & New Production Technologies [NMP]«), etwa im Rahmen der »Manufuture«-Plattform⁵⁶
- Strategische Aktivitäten im Themenbereich 6 des 7. Rahmenprogramms (»Environment«), etwa Herausbildung eines »ERA Net« im Bereich Eco-Innovation
- EU »Sustainable Production and Consumption and Sustainable Industrial Policy Action Plan« (insbesondere im Hinblick auf die Entwicklung von Kennzahlen und Indikatoren)
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)-Aktivitäten im Schwerpunkt »Ecosystems«
- UNEP Marrakech Process »Towards a Global Framework for Action on Sustainable Consumption and Production«
- Entwicklung in der internationalen Forschungsgemeinde »Industrial Ecology« (International Society for Industrial Ecology)

⁵⁵ Knowledge development, Ressource mobilization, Market formation, influence on the direction of search, entrepreneurial experimentation. Vgl. Bergek (2008) für mögliche Vorgehensweisen. Diese sind allerdings an ein ganz neu entstehendes Innovationssystem anzupassen.

⁵⁶ <http://www.manufuture.org/index.html>



- OECD-Aktivitäten im Bereich »Environment« (insbesondere zu Indikatorik und Modellierung)

Ein Weg zu einer systematischen Anknüpfung an internationale Prozesse könnte eine Einbeziehung des UNEP/ Wuppertal Institute Collaborating Centre on Sustainable Consumption and Production (CSCP) sein, das solche Prozesse kontinuierlich beobachtet.

Handlungsfeld: »Strategic Niche Management«

ProduzierenKonsumieren2.0 zielt langfristig auf systemischen Wandel hin zu nachhaltigen Stoffstrommustern. Eine solche Transformation kann nicht plötzlich erfolgen. Stattdessen werden neue Formen von Produzieren und Konsumieren zunächst innerhalb der bestehenden Muster anzusiedeln sein.

Ein aus Sicht der Themenkoordinatorinnen geeignetes innovationspolitisches Instrument ist das »Strategic Niche Management« (vgl. Weber 2009), d. h. die Schaffung eines geschützten Raums für Lernprozesse, die zu neuen Konzepten und Technologien führen sollen. Für ProduzierenKonsumieren2.0 könnten solche Nischen speziell an zukünftig kritischen Stellen, an Brennpunkten, eingerichtet werden, die von dem erweiterten Lenkungskreis identifiziert werden. Hier sollten nicht nur Forschung und Entwicklung in den Blick gefasst werden, sondern auch Nutzungsweisen und gesellschaftliche Einbettungen. Denkbar wären Demonstratoren, Pilotanlagen, soziale Experimente und »Living Labs« zu neuen Konzepten von Produzieren und Konsumieren, wie z. B. nachhaltige Minifabriken (vgl. Beispiel 2 oben).

Themenkoordination:

Dr. Philine Warnke, ISI (philine.warnke@isi.fraunhofer.de) und
Elna Schirrmeister, ISI (elna.schirrmeister@isi.fraunhofer.de)



7 Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation

Virtuelle Systemuntersuchungen sind mittlerweile in technischen und sozialwissenschaftlichen Forschungsfeldern unerlässlich geworden. Bisher wurden Systemuntersuchungen für die Hypothesenbildung über komplexe Sachverhalte in physikalischen, chemischen sowie biologischen Zusammenhängen eingesetzt. Damit werden sie für Projekte in der anwendungsorientierten Forschungs- und Entwicklungspraxis besser nutzbar. Anwendungsorientierte Projekte bearbeiten komplexe Phänomene trotz begrenzten Wissens über Details funktioneller Zusammenhänge. Um diese Projekte zeitnah und mit vertretbarem Aufwand bearbeiten zu können, müssen Systemuntersuchungen mithilfe von Experimenten durchgeführt werden. Überall dort, wo Entwicklungen und ihr jeweiliges biotisches, soziales, technologisches und sonstiges Umfeld sich in komplexen Verhältnissen überschneiden können, müssen folglich unterschiedliche Beobachtungen und abstrahierte Modelle zusammengeführt werden.

Die Herausforderung besteht in Zukunft darin, Erkenntnisse zwischen benachbarten oder bisher noch voneinander unabhängigen Disziplinen mittels geeigneter Translationsprozesse auszutauschen. Durch die Kombination neuer Erkenntnisse können innovative Simulationsmethoden ab der Atomebene sowie Algorithmen für bestehende und künftige Problemfelder entwickelt werden. Beispiele für Forschungsfragen und Entwicklungsfelder sind:

- Wie und anhand welcher Modelle sind ökosystemische Zusammenhänge wie z. B. der Klimawandel zu simulieren, um einen Erkenntnisfortschritt über die Zusammenhänge der Systeme zu erzielen? Wie können Simulationen für Prognosen genutzt werden?
- Wie wären Phänomene selbstorganisierter Komplexität, wie z. B. das Verhalten organischer Zellen, ab der Atomebene so zu modellieren und zu simulieren, dass daraus weitere Durchbrüche in der medizinischen Diagnose und Therapie erzielt werden können?

7.1 Das Zukunftsfeld

Die Lebensbedingungen der Menschen werden infolge der Globalisierung immer komplexer und unübersichtlicher. Labile Gleichgewichte in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft sind Themen, die den Menschen täglich beschäftigen. Der Verlust gewohnter Besitzstände einerseits sowie Chancen für kreative Innovationen und ihre Stimulation im Hinblick auf neue Märkte andererseits folgen Prinzipien von Chaos, Ordnung und Selbstorganisation. Diese entstehen in der



Natur und in der Gesellschaft nach den Gesetzen komplexer dynamischer Systeme. Solche Systeme werden bereits erfolgreich in Technik- und Naturwissenschaft untersucht. Durch die Erforschung von Modellen und Simulationsverfahren von der Atomebene über die Mesoebene bis hin zu makroskopischen Phänomenen können bei gezielter Komplexitätsreduktion je Ebene lückenlose Begründungszusammenhänge angestrebt werden. So wäre die Berechenbarkeit des Simulationsmodells gegeben. In atomaren und molekularen Systemen der Physik und Chemie, in zellulären Organismen und ökologischen Systemen der Biologie sowie in neuronalen Netzen der Gehirnforschung und den Rechnernetzen im Internet wird deutlich, dass der Erkenntnisgewinn wesentlich vom Verständnis der hochdynamischen Wechselwirkungen der jeweiligen Systembausteine abhängig ist. Dasselbe gilt für Anwendungen in den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Eine Vielzahl von Methoden zur Modellierung und Simulation von Systemen sind bereits in den Wissenschaftsgebieten vorhanden, werden aber bisher überwiegend für die eigene Fachdisziplin (weiter-) entwickelt (vgl. Ionescu et al. 2009; Ehlers 2009).

Da die Berechenbarkeit von Simulationsmodellen von der Rechnerleistung abhängt, ist der wissenschaftliche Fortschritt in vielen Disziplinen ebenfalls von der Weiterentwicklung der Computertechnologie und ihrer Rechenkapazität abhängig. Dabei dürften in Zukunft Rechenleistungen benötigt werden, die jenseits von Petaflops/s liegen werden. Die Nutzung solch einer konzentrierten Rechenkraft erfolgt über Supercomputer, die mithilfe mehrerer Prozessoren parallel an Aufgaben rechnen können. Die heutigen Kapazitäten an Rechnerleistung und Vernetzung (vgl. auch »Grid« bzw. »Cloud Computing«) bei der Simulation von komplexen Systemen und ihrem Verhalten ermöglichen nur holzschnittartige Einblicke. Durch weitere Forschungsaktivitäten könnte die Komplexität in Systemen durch Modellbildung und Simulation wesentlich besser bewältigt werden. Gelingen hier Durchbrüche, könnten Phänomene mit weit mehr Parametern als bisher virtuell simuliert und in realitätsnäheren Abbildungen sowie exakteren Prognosen dargestellt werden. Einen wichtigen Beitrag wird auch die theoretische Systemforschung leisten können, indem sie weitere Voraussetzungen für das konzeptionelle Verständnis schafft.

7.2 Ausgangssituation im Zukunftsfeld heute (2009)

Der Stand der Forschung bei der Modellierung und Simulation von komplexen Systemen ist durch Einzelstrategien gekennzeichnet, die aus verschiedenen Disziplinen, Theorien und Diskretisierungskonzepten stammen. Dabei werden methodische Gebiete wie die Molekulardynamik, Moderne Mechanik, Numerische Mathematik, Systemanalyse, Datenmanagement, Visualisierung und das Hochleistungsrechnen untersucht. Im Zukunftsfeld Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation sollten deshalb relevante Entwicklungen aus mehreren



Forschungsfeldern zusammengeführt und gebündelt werden, um Synergieeffekte zu erzielen.

In der System- und Komplexitätsforschung werden in vielen Bereichen Phänomene im Sinne von »Systeme-in-Kontexten« untersucht, um zu neuen Ansätzen für die Modellierung z. B. des Verhaltens in Verkehrssystemen oder in Gefahrensituationen etc. zu kommen. Auf Basis dieser Konzepte lassen sich Ansätze und Werkzeuge entwickeln, die in der disziplinübergreifenden Bearbeitung wie etwa der Analyse oder Darstellung, Konzeption und Steuerung von untersuchten Sachverhalten konkret adaptiert werden können. Die Schwierigkeiten bestehender Modellierung und Simulation liegen in der Ausgestaltung und Verifikation so genannter Zustandsräume⁵⁷ und relevanter Parameter für konkrete Sachverhalte sowie in der simulationsgeeigneten mathematischen Formalisierung der jeweiligen Beziehungen von Elementen in einem Gesamtsystem. Darüber hinaus fehlt es an theoretisch umfassenden, konsistenten und gleichzeitig auf Modelle und Simulationen anwendbaren Theorien komplexer Systeme.

Beispielsweise kann in Bezug auf ein Klimamodell das Ergebnis für die nächsten Jahre, Jahrzehnte oder sogar Jahrhunderte bei jeder minimalen Veränderung der Ausgangswerte oder der Einbeziehung neuer Variablen völlig anders ausfallen. Entscheidend für die Qualität der Prognosen ist das dahinter stehende Modell des Systems: Sind nicht alle relevanten Variablen bekannt, die Vernetzungen untereinander intransparent oder Ausgangsparameter und ihre Entwicklung falsch berechnet, stimmen die Prognosen nicht. Hier muss besonders viel Aufwand in die Modellbildung investiert werden, um näherungsweise Rechnungen und Voraussagen zu ermöglichen (vgl. auch Mainzer 2009 – alpha Forum).

Es besteht eine Wechselwirkung zwischen neuen Erkenntnissen im jeweiligen Fachgebiet und der Möglichkeit, daraus verbesserte Modelle und Simulationen abzuleiten, die dann wieder die Forschung im Fachgebiet anregen. Damit hängt die Schnelligkeit des Erkenntniszuwachses wesentlich vom Umfang und der Präzision von Modellen und Simulationsergebnissen ab.

Des Weiteren gibt es erste Ansätze, neue IKT-Entwicklungen und aktuelle Erkenntnisse aus anderen Wissenschaften, z. B. aus der Neurophysiologie, stärker in Simulationen zusammenzuführen. Gleichzeitig werden neue Simulationstechniken bzw. neuartige Algorithmen mittels parallel geschalteter Rechner weiterentwickelt. Konkret geschieht dies meist – und mit bis zu einigen Tau-

⁵⁷ Hierin werden dynamische Systeme im Zeitbereich beschrieben

send Prozessoren – auf der Basis konventioneller Architekturen. Die Entwicklung alternativer Computerarchitekturen benötigt auch hier Erkenntnisse benachbarter Disziplinen wie z. B. aus der Materialforschung, Biotechnologie oder aus der numerischen Mathematik.

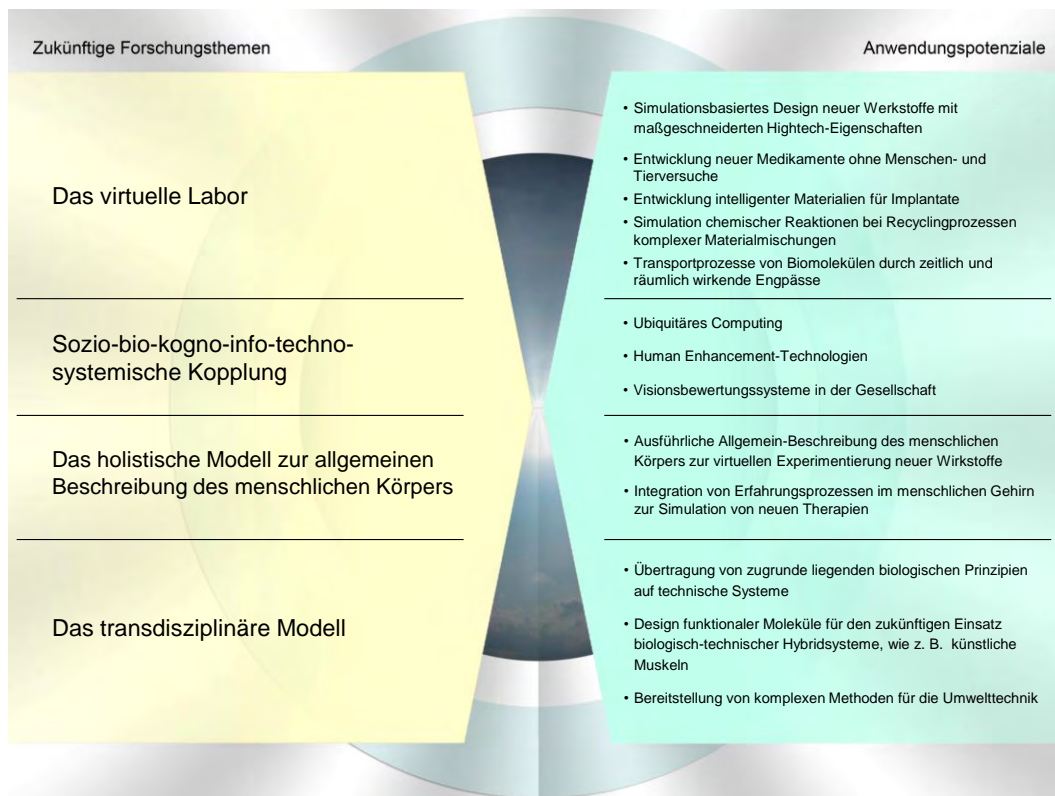


Abbildung 15: Zukünftige Forschungsthemen und Anwendungspotenziale im Zukunftsfeld »Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation«

7.3 Langfristperspektive des Zukunftsfeldes

In Zukunft wird es notwendig sein, Methoden zu entwickeln, die die Durchlässigkeit zwischen verschiedenen Disziplinen verbessern, um auf diese Weise neue wissenschaftliche Leistungen und Erkenntnisse zur Lösung von Problemen zu nutzen. Können komplexe wissenschaftliche Phänomene nicht modelliert werden, weil die Zusammenhänge eines Systems nicht verstanden werden, wird es notwendig sein, das System ab der untersten Komplexitätsebene zu untersuchen. Ziel wird es jedoch sein, nicht aufwendig auszuprobieren, sondern durch virtuelle Simulationen komplexe Phänomene zu verstehen und je nach Problem verlässliche Vorhersagen treffen zu können (siehe Abbildung 15).

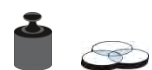
Obwohl das Zukunftsfeld Modellbildung und Simulation schon seit Längerem beforscht wird, kann sich jetzt eine neue Qualität ergeben. Dies betrifft insbe-



sondere das Zusammenbringen der naturwissenschaftlichen und technischen Gebiete, z. B. im Bereich der Atome (ab-initio), Moleküle und nanoskaligen Phänomene. Hier sind durch fachübergreifende Modelle Durchbrüche zu erwarten. Eine methodisch fundierte »Translationsforschung«, die Ziele, Inhalte und Grenzen der Übertragbarkeit untersucht, ist dabei eine wesentliche Voraussetzung.

Der Komplexitätsforschung fällt die Aufgabe zu, beim Übergang von einer Skalengröße zur nächsten Methoden bereitzustellen, die es erlauben, die notwendige Komplexitätsreduktion unter Beibehaltung der wesentlichen Systemgrößen vorzunehmen. Eine disziplinenübergreifende Anwendung komplexer Systeme ist beispielsweise das menschliche Gehirn. Das Gehirn wird als ein komplexes System von Neuronen (Nervenzellen) aufgefasst. Die Neuronen interagieren elektrisch oder neurochemisch über Synapsen und verschalten sich zu Aktivitätsmustern. Dabei wird die Dynamik von Gehirnzuständen durch Gleichungen von makroskopischen Ordnungsparametern modelliert, die den neuronalen Verschaltungsmustern entsprechen. Die Neurochemie, als Disziplin der Neurowissenschaften, untersucht die Aktivität beteiligter Moleküle bei neuronischer Tätigkeit mittels biochemischer, molekularbiologischer, elektrophysiologischer und mikroskopischer Methoden. Biochemische Reaktionsgeschwindigkeiten sind von den Zeitkonstanten in der Chemie und der Quantenphysik abhängig (vgl. u. a. Marx, Hutter 2009; Mainzer 2007, 2009; Luther et al. 2004).

Eine effiziente Modellierung benötigt Simulationsmethoden, die den jeweils relevanten Längen- bzw. Zeitskalen angepasst sind. Allerdings gelingt es bisher nur ansatzweise, Simulationsmodule aus unterschiedlichen Längenskalen (aber auch Zeitskalen) miteinander zu verbinden. Dieser Zusammenhang soll anhand der Abbildung 16 verdeutlicht werden.



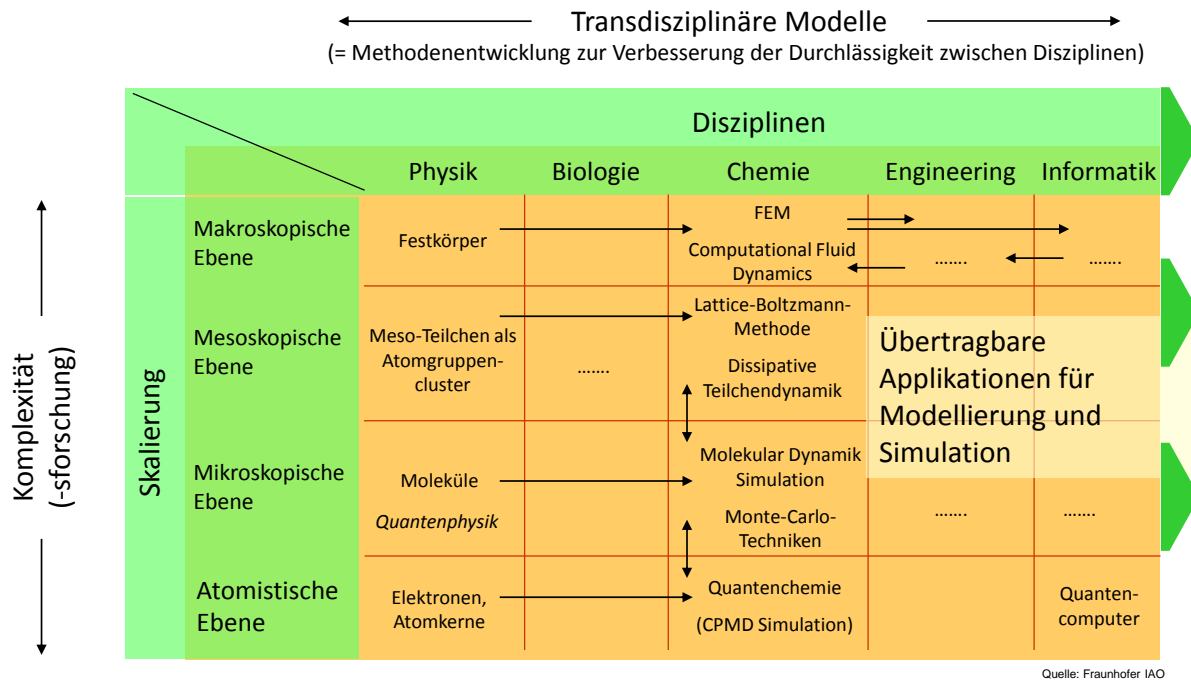


Abbildung 16: Modellierung und Simulation als Bindeglied zu Komplexität und Disziplinen

Über die beispielhaft genannten Disziplinen in der Abbildung hinaus können und sollen weitere Disziplinen in die Betrachtung einfließen. Als Bindeglied ist zum einen die System- und Komplexitätsforschung zu nennen, zum anderen ein Teilforschungsgebiet der Mathematik, das sich in diesem Kontext mit generischen Ansätzen des mathematischen Modellierens beschäftigt. Ein weiterer Aspekt ist die Entwicklung informations- und kommunikationstechnischer Voraussetzungen, um Systemmodelle zu simulieren und damit virtuell experimentieren zu können. Damit korrespondiert, dass informations- und kommunikationstechnische Anwendungen zukünftig Modelle aus immer mehr parallelen oder sequenziell vernetzten Abläufen integrieren sollen.

Dies impliziert, dass in zehn und mehr Jahren Paralleloperationen in Größenordnungen mit bis zu mehreren Millionen Prozessoren gesteuert werden müssen, um die für solche Simulationen erforderliche Rechenkapazität zu realisieren. Dieser Anforderung wird man mittelfristig mit Rechnern bisheriger Architekturen nicht gerecht werden können. Für einige Entwicklungsfelder (Biodektion, Kryptografie) sollten sich in 10 bis 15 Jahren Anwendungspotenziale grundlegend anderer, genuin paralleler Architekturen wie jener des biomolekularen oder des Quantencomputers deutlicher abzeichnen oder realisieren lassen (vgl. EC 2008; Schinarakis 2008).

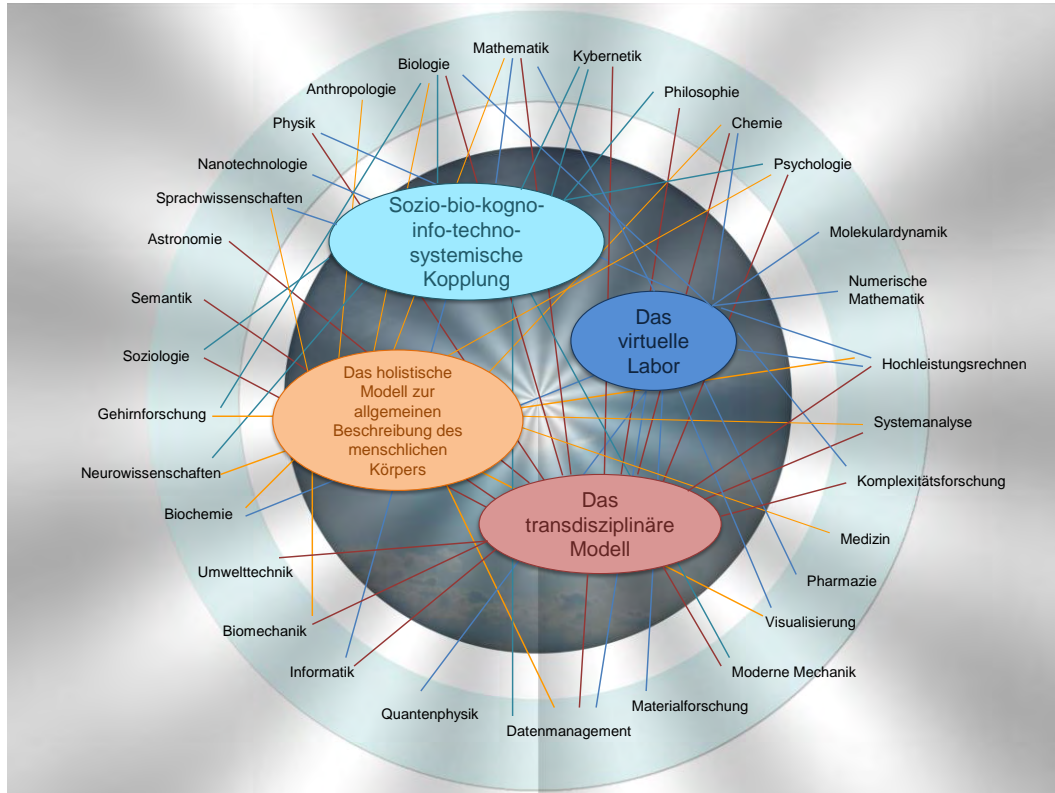


Abbildung 17: Zukünftig beteiligte Forschungsrichtungen

Eine weitere Entwicklungsperspektive dieses Zukunftsfeldes besteht darin, Simulation mit menschlichen Erfahrungsprozessen zu koppeln. Derzeit wird Simulation zur Darstellung von Sachverhalten verwendet. Künftig sollen Erfahrungsprozesse des menschlichen Gehirns verstanden und in die Simulation integriert werden. Für Letzteres ist jedoch die Berücksichtigung ethischer Grundsätze zu beachten, welche ebenfalls aufgrund der wachsenden Bedeutung des Konvergenzkonzepts auf EU-Ebene sowie in anderen Staaten eine wichtige Rolle spielen (vgl. Coenen 2008, S. 29). Damit kann die Modellierung und Simulation menschlichen Verhaltens als Methode der Mensch-Maschine-System-Forschung weiterentwickelt werden (vgl. auch Kindsmueller et al. 2004).

Schwerpunkte zur weiteren Vertiefung im Zukunftsfeld neuen Zuschnitts **Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation** in jeweiligen Kontexten von spezifisch natur-, technik-, sozial- oder kognitionswissenschaftlicher Untersuchungen könnten folgende Bereiche sein:

1. Theoretische Forschung sowie Modellbildung zu Systemen und systemisch heterogenen Verbänden (vgl. sozio-bio-kogno-info-techno-systemische Kopplungen)⁵⁸
2. Forschung zu Verfahrens- und ggf. Technikentwicklungen für skalenübergreifende Simulationen in dem unter 1. genannten Bereich
3. Konzeptionelle Begleitung und »Wissensübertragung« von 1. und 2. in spezifisch konkreten Entwicklungsanwendungen über diverse wissenschaftliche und ggf. professionelle Disziplinen hinweg

Die drei genannten Punkte gingen aus Befragungen in den Bereichen der Simulationsforschung, IT, Natur- sowie Geisteswissenschaften sowie Desk Research hervor (vgl. auch Rogers 2003a; Saage 2006, 2007; Nordmann et al. 2006).

7.4 Warum ist das Zukunftsfeld relevant?

Die Relevanz des Themas ergibt sich aus den bislang zumindest nicht ausreichend beantworteten Forschungsfragen. Modellierungsmethoden und Simulationstechnologien erweisen sich für die Lösung komplexer Probleme in vielen Bereichen des Lebens als sehr notwendig. Diese beeinflussen die Entwicklungen in Wirtschaft und Industrie. Darüber hinaus erhöhen neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Modellierungs- und Simulationstechnik sowie Hardwaremodule die Erwartungen von Wissenschaft und Industrie. Die nachfolgend angeführten Beispiele stellen Herausforderungen in der Forschung dar, die bisher nur ansatzweise bewältigt werden konnten. Hierzu wurden Expertenmeinungen der »SimTech – Cluster of Excellence in Simulation Technology« der Universität Stuttgart verwendet sowie Erkenntnisse aus der Forschung der Max-Planck Gesellschaft sowie internationale Studien und Fachliteratur (vgl. auch Marx, Hutter 2009; Hergersberg 2008; Thumann, Schnappauf 2008, Besold, Kremer 2004):

- Modelle und Simulationen von Phänomenen (selbst)organisierter Komplexität⁵⁹
- Weiterentwicklung von Quantensimulatoren zum besseren Verständnis des Phänomens der Hochtemperatur-Supraleitung und zur Entwicklung geeigneter widerstandsfreier Stromleitungsmaterialien
- Computerbasierte Berechnung biochemischer Prozesse zur Entwicklung neuer Medikamente ohne Tier- und Menschenversuche

⁵⁸ Beispielhaft seien an dieser Stelle Anwendungspotenziale des ubiquitären Computing, »Human-Enhancement«-Technologien sowie Visionsbewertungssysteme in der Gesellschaft genannt.

⁵⁹ Beispiele sind das Verhalten und die Zustände organischer Zellen wie Nerven-, Leber- oder Hautzellen.



- Simulationsbasierte Modellierung neuer Werkstoffe mit maßgeschneiderten Hightech-Eigenschaften
- Systembiologische Betrachtung von technischen und natürlichen Systemen
- Verschmelzung verschiedener Einzellösungen in der Biomechanik zur ausführlichen Allgemein-Beschreibung des menschlichen Körpers
- Bereitstellung komplexer und umfassender Methoden für die Umwelttechnik
- Computersimulation molekularer und zellulärer Biosysteme für die Transportprozesse von Biomolekülen durch zeitlich und räumlich wirkende Engpässe

Für die meisten dieser Felder existiert eine Vielzahl jeweils disziplinärer Modelle. Die Zusammenführung disziplinärer Modelle geht immer mit der Frage einher, in welcher informationellen Aggregation sich solche Modelle und Simulationen sozial vermitteln, kognitiv verarbeiten und erkenntnisleitend nutzen lassen. In welchen Kontexten sind also die Modelle gültig?

Im Hinblick auf konkrete Problemfelder ist sogar von einer zunehmenden Relevanz des aktuellen Zukunftsfeldes auszugehen,

- weil die immanente Komplexität von Entwicklungsproblemen, etwa die der Mega-Cities oder vernetzter Verkehrssysteme (vgl. m4d 2009; Ziv, Cox 2007) weiter zunehmen wird und daher besser verstanden werden muss und
- weil auch in anderen Zukunftsfeldern (Lebenswissenschaften, Physik, Verkehr, Pharmazie etc.) durch weitere Entwicklungsfortschritte ein Bedarf an Modellen und Simulation erwartet wird (siehe auch andere Zukunftsfelder des BMBF-Foresight-Prozesses).

Für das BMBF ergibt sich damit ein Forschungsfeld, das in Querschnittstechnologie münden kann und somit für sehr unterschiedliche Referate Impulse geben könnte.

7.5 Akteure im Innovationssystem heute

Das aktuelle Zukunftsfeld beschäftigt sich mit generisch konzeptionellen und Darstellungsaspekten von Orientierungsrahmen. Diese Aspekte lassen sich in forschungs- und entwicklungsbezogene Aktivitäten und damit in diverse andere Gegenstandsbereiche übertragen. Aber sie müssen dafür spezifisch adaptiert werden. Potenziell interessante Akteure sind daher überall in diesen anderen disziplinären Feldern verteilt.



Eine besondere Rolle bei der Suche nach potenziell interessanten Akteuren spielt die Untersuchung transdisziplinärer Wissensgemeinschaften, Interessengruppen und Expertengremien, wie z. B.

- zur Theoretischen Physik und Chemie,
- zur Robotik und Biologie und zu anderen Naturwissenschaften,
- zu Neurowissenschaften und Technologie,
- zur Theoretischen und Angewandten Informatik,
- zu den Geisteswissenschaften,
- zur Analyse komplexer Systeme,
- über einschlägig ausgewiesene Institute im Bereich der technischen Kybernetik, der Kybernetik beobachtender Systeme und deren mathematisch-informationstechnischer Realisierung an Universitäten etc. sowie in Forschungsvereinigungen (Max Planck, Helmholtz, Fraunhofer usw.).

Bestimmte Organisationsprofile deuten ebenfalls auf potenziell interessante Akteure im aktuellen Zukunftsfeld hin (vgl. Tabelle 7).

Akteure Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation

- | | |
|--|--|
| - Lehrstuhl für Theoretische Chemie, Ruhr-Universität Bochum | - Hochleistungsrechnerzentrum Stuttgart |
| - Physikalisch-Chemisches Institut der Universität Zürich | - Max-Planck-Institut für Quantenoptik |
| - Exzellenzcluster »Simulation Technology« (SimTech) in Stuttgart | - Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) Karlsruhe |
| - wissenschaftliche und/ oder professionelle Inter- bzw. Multi-Disziplinarität (vgl. als historischer Prototyp eines institutionell kompakten Akteurs das Biological Computation Laboratory H. v. Foersters in Illinois) | - Bereich Translation (in Medizin und Pharmazie) des European Advanced Translational Research Infrastructure in Medicine und das Hannover Center of Translational Medicine (HCTM) |
| - Institute for Advanced Simulation (IAS) – Forschungszentrum Jülich | - ITAT (Institut für Theoretische und Angewandte Translationswissenschaft – Universität Graz, Österreich). In der Forschung konzentriert sich das ITAT auf drei Schwerpunktbereiche: Kultur- und sozialwissenschaftliche Übersetzungsforschung, Kommunal- und Gebärdensprachdolmetschen, Translationsprozessforschung, Translations- und Terminologiemanagement. |
| - Technische Universität Clausthal | |
| - Technische Universität München, Lehrstuhl für Philosophie und Wissenschaftstheorie | |

Tabelle 7: Akteure Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation im Jahr 2009

7.6 Zukunftsfähige Akteurskonstellationen

Aus dem Zukunftsfeld »Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation« ergeben sich zahlreiche Herausforderungen. Für die Entwicklung von Lösungen wird aus Sicht der Fraunhofer Experten im Sinne einer Open Innovation als erforderlich angesehen, wissenschaftliche Institutionen aus verschiedenen Fachrichtungen, Institutionen mit Aktivitäten in der Thematik der Transdisziplinarität sowie Zentren, die sich mit der Entwicklung moderner Methoden auf allen Gebieten der Modellierungs- und Simulationswissenschaften beschäftigen, miteinander zu vernetzen. Mithilfe von geförderten Projekten und zuständigen Part-



nen könnten die Entwicklung und der Einsatz von Methoden zum Wissenstransfer innerhalb dieses Netzwerkes sichergestellt werden.

Um mit neuen Aktivitäten innerhalb des genannten Zukunftsfeldes beginnen zu können, bietet es sich an, eine Reihe potenzieller Partner aus bereits existierenden deutschen Institutionen einzubeziehen. Die Grundlage bilden erfahrene Personen aus wissenschaftlichen Einrichtungen mit zukunftsorientierten Organisationsstrukturen, Zentren und Exzellenzcluster im Anfangsstadium sowie Institutionen mit transdisziplinären Forschungsaktivitäten.

Als wesentliche Akteure können genannt werden:

- Die Max-Planck-Gesellschaft, insbesondere die MPI für Meteorologie, Polymerforschung, Kohleforschung, Festkörperforschung, Hirnforschung sowie das MPI für Kognitions- und Neurowissenschaften, die laut Akteursanalyse zu den aktivsten Instituten der Max-Planck-Gesellschaft gehören. Darüber hinaus ist das MPI für Dynamik komplexer technischer Systeme, das MPI für Quantenoptik sowie das MPI für Physik komplexer Systeme zu nennen.
- Die international operierende Forschungsuniversität Bonn beschäftigt sich in ihrer mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät unter anderem mit dem Thema »Numerische Simulation«. Eine weitere durchaus wichtige Aktivität, mit dem Ziel, die interdisziplinäre Zusammenarbeit innerhalb der Universität zu stärken und herausragende Forschungsleistungen zu fördern, wird in der Erschließung so genannter »Interdisziplinärer Zentren« gesehen.
- Die Universität Stuttgart eröffnet insbesondere durch die Erschließung des Stuttgart Research Centre for Simulation Technology und Exzellenzclusters »Simulation Technology« (SimTech) neue Perspektiven bei der Weiterentwicklung wissenschaftlicher Methoden und Anwendungen auf allen Gebieten der Modellierungs- und Simulationswissenschaften. Mit der Bindung verschiedener Institutionen an die Universität Stuttgart wird der Ergebnistransfer in die wissenschaftliche Gemeinschaft sowie in die Anwendung angestrebt.
- An der Ruhr-Universität Bochum zeichnen sich die »Centres of Excellence« durch Internationalität und Interdisziplinarität aus, mit denen die Universität wegen der abgedeckten Bereiche eine Spitzenstellung einnimmt. Die Forschung an der Ruhr-Universität Bochum wird anhand von flexiblen, interdisziplinären »Research Departments (RD)« organisiert.
- Die Technische Universität Clausthal gehört mit ihren interdisziplinären wissenschaftlichen Einrichtungen und Arbeitsgruppen ebenfalls zu den aktivsten Institutionen auf dem Gebiet der »Transdisziplinären Modelle und Multiskalensimulation«. Insbesondere ist das Simulationswissenschaftliche Zent-



rum Clausthal-Göttingen zu nennen, welches das Thema »Simulation« gegenwärtig in einem fächerübergreifenden Verbund bearbeitet.

- Die Technische Universität München wird im Rahmen der Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder gefördert und weist, zusätzlich zu den klassischen Kernbereichen einer Technischen Universität, leistungsfähige Verbindungen zu den Lebenswissenschaften auf.
- In den Forschungszentren der Universität Würzburg wird eine koordinierte Zusammenarbeit über Fächergrenzen hinweg angestrebt. Die Universität Würzburg sieht in der Interdisziplinarität eine »moderne Wissenschaft«. Vor diesem Hintergrund ist dort eine Reihe von Forschungszentren entstanden.

Zusätzlich zu den Ergebnissen aus der bibliometrischen Akteursanalyse sind wichtige deutsche Institutionen zu nennen, die einen starken Bezug zu relevanten Themen des Zukunftsthemas »Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation« aufweisen. Zu nennen sind:

- Das Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) beschäftigt sich mit der Verarbeitung und Vermittlung von Wissen über die Folgen menschlichen Handelns und der Bewertung dieser Folgen in Bezug auf die Entwicklung und den Einsatz von neuen Technologien. Dabei werden umweltbezogene, ökonomische, soziale sowie politisch-institutionelle Fragestellungen untersucht. Das ITAS ist in das Forschungsprogramm des Forschungszentrums Karlsruhe und der Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Forschungszentren (HGF) eingebunden und kooperiert mit zahlreichen wissenschaftlichen Einrichtungen im In- und Ausland, vor allem im Rahmen von EU-Projekten.
- Das Zentrum für Interdisziplinäre Forschung (ZiF) der Universität Bielefeld fördert als »Institute for Advanced Study« der Universität Bielefeld interdisziplinäre und innovative Forschungsprojekte. Das ZiF verfolgt als unabhängige, thematisch ungebundene Forschungseinrichtung das Ziel, besonders innovative Forschungsfelder in den Überschneidungsbereichen von Natur- und Geisteswissenschaften zu identifizieren.
- Im Forschungszentrum Jülich bündelt das »Institute for Advanced Simulation (IAS)« auf dem Gebiet der Simulationswissenschaften und des Hochleistungsrechnens disziplinäre, methodische und technologische Kompetenzen. Das Ziel besteht darin, zukünftige Herausforderungen im Bereich der Simulationswissenschaften zu bewältigen.

Ein spannendes und nennenswertes strategisches EU-Projekt, welches die Kooperation und den Wissensaustausch zwischen Institutionen aus der Medizin fördert, verfolgt die Bildung einer »European Advanced Translational Research InfraStructure in Medicine (EATRIS)«. Ziel des Projektes ist es, mittels neuer An-



sätze Erkenntnisse der Grundlagenforschung aus verschiedenen europäischen Institutionen zu nutzen, um die Entwicklung klinischer Anwendungen voranzutreiben. Die Partnerstruktur besteht aus europäischen wissenschaftlichen Institutionen und Regierungspartnern, bei der das BMBF ebenfalls als Mitglied zu nennen ist.

7.7 Empfehlungen

Im Zukunftsfeld »Transdisziplinäre Modelle und Multiskalensimulation« wird eine Vielzahl von FuE-Bereichen sowie Fachdisziplinen angesprochen, die zur umfassenden Weiterentwicklung wissenschaftlicher Methoden und Anwendungen auf allen Gebieten der Modellierungs- und Simulationswissenschaften erforderlich sind. Dabei sollten Visionen realisiert werden wie z. B. »Das virtuelle Labor«, um zeit- und kostenaufwendige physische Experimente zur Entwicklung neuer Stoffe zu ersetzen, oder »Das holistische Modell zu allgemeinen Beschreibung des menschlichen Körpers«, um beispielsweise Wirkstoffe virtuell testen zu können. Die Herausforderung besteht darin, generische Ansätze zu entwickeln, die vorhandene sowie laufend neue Erkenntnisse aus verschiedenen Disziplinen sammeln und vernetzen, um diese Erkenntnisse zur Lösung von konkreten Problemen nutzen zu können. Gleichzeitig müssen die Geltungsbereiche der Modelle verdeutlicht werden: Wie weit ist ein Modell übertragbar? Wann sind Modelle überhaupt sinnvoll einsetzbar? Was kann simuliert werden? Wie ist die Kosten-Nutzen-Relation beim Einsatz von immer mehr Variablen? Wo sind die Grenzen?

Darüber hinaus sollen diese Ansätze die zur Lösung eines bestimmten Problems erforderlichen Disziplinen und deren Mitwirkung bei der Entwicklung einer neuen Methode innerhalb der Modellierungs- und Simulationswissenschaften identifizieren helfen. In verschiedenen Expertengesprächen wurde betont, dass an dieser Stelle Diskussionen mit potenziellen strategischen Partnern zur Ideengenerierung notwendig seien, um den Bedarf an erforderlichen Programmen und Projekten bestimmen zu können.

Das Thema Transdisziplinarität wird in der TAB-Studie »Konvergierende Technologien und Wissenschaften« vom März 2008 angesprochen. Der Stand der Debatte und die politischen Aktivitäten zu ‚Converging Technologies‘ werden gezeigt. In dieser Studie wird für den Bereich »Multi-, Inter- und Transdisziplinarität« empfohlen, die Aktivitäten zur Evaluation bereits abgeschlossener oder vorhandener Aktivitäten zur Förderung der Transdisziplinarität sowie gebietsübergreifender Technologieentwicklung unter der Perspektive von Konvergenz zu verstärken, auch unter Einbeziehung der EU-Ebene. Der Begriff »Konvergenz« beinhaltet die Prognose eines Zusammenwachsens mehrerer Technologien und die Zunahme von Synergieeffekten zwischen verschiedenen Wissenschaften. Insbesondere stehen Technologien wie Nano-, Bio-, Informations- und



Kommunikationstechnologien (IKT), Hirnforschung, Künstliche Intelligenz (KI), Robotik und andere verwandte Wissenschaften im Vordergrund. Hier wird die Notwendigkeit einer (politischen) Förderung von Forschung und Entwicklung in den Überschneidungsbereichen gesehen.

Bereits existierende Aktivitäten auf dem Gebiet der »Nano-Bio-Info-Cogno (NBIC)«-Felder bedürfen einer Bestandsaufnahme deutscher FuE-Landschaft und Förderaktivitäten aus Konvergenzsicht. Ziel ist es, Akteure zu identifizieren, die auf den jeweiligen Feldern Forschung und Entwicklung mit starkem Bezug zur Kopplung dieser Felder betreiben. Damit kann die Grundlage für die Untersuchung erweiterter interdisziplinärer Kopplungen wie die sozio-bio-kogno-info-techno-systemische Kopplung gelegt werden. Nach Ansicht der Themenkoordinatoren ist es sinnvoll, die Aktivitäten dieser Akteure zu beobachten, um aufkommende neue Ideen im Zuge von Förderaktivitäten anwenden zu können. Die Vernetzung der Akteure kann folglich zur Entwicklung von neuen Ansätzen zur Transdisziplinarität führen.

Die Bildung und Vernetzung neuer oder vorhandener Zentren in Deutschland mit internationalen Beziehungen, in welchen Aktivitäten auf dem Gebiet der transdisziplinären Forschung sowie im Bereich der Modellierungs- und Simulationswissenschaften stattfinden (sollen), wird ebenfalls aus Fraunhofer Sicht empfohlen. Zudem könnte es sich als vorteilhaft erweisen, Organisationseinheiten aufzubauen, die die Entwicklung neuer Ansätze zur fachübergreifenden Wissenssammlung und -nutzung ermöglichen und darüber hinaus ein Bindeglied zwischen diesen Zentren darstellen. Mit »fachübergreifend« ist an dieser Stelle das Wissen aus Natur-, Ingenieur-, Struktur-, Agrar-, Sozial-, Geistes-, Human-, Rechts- sowie Wirtschaftswissenschaften gemeint.

Themenkoordination:

Prof. Dr. Joachim Warschat, IAO (joachim.warschat@iao.fraunhofer.de) und
Theodor Malcotsis, IAO (theodor.malcotsis@iao.fraunhofer.de)



8 Zeitforschung

Der Faktor »Zeit« ist noch nicht ausreichend verstanden und stellt dadurch in vielen Entwicklungen den Engpassfaktor dar. Die Erforschung der »Zeit« ist der zentrale Aspekt des Zukunftsfeldes, der in viele Anwendungsgebiete hineinreicht. So stellt sich z. B. die Frage nach der Zeitabfolge komplexer Prozesse, um Anwendungen schneller, effizienter und kostengünstiger, aber auch intelligenter zu machen, Prozesse zu parallelisieren oder zu synchronisieren (z. B. Internet-Server, Produktionsprozesse). Ebenso ist die Frage nach der Dynamik und zeitlichen Entwicklung, insbesondere nichtlinearer Prozesse, auf unterschiedlichen Zeitskalen nur langfristig zu klären.

Ein laut Bibliometrie sehr dynamisches Zukunftsthema innerhalb der Zeitforschung ist die Chronobiologie, in der es erste Erkenntnisse zu einer zeitgenauen Medikamentierung gibt. Die Chronobiologie könnte der automatisierten Pharmazie (»Missile Drugs«, »Depots«, »Targeted Drugs«) einen Schub geben, möglicherweise aber auch die Nebenwirkungen von Nacharbeit oder unregelmäßigen Arbeitszeiten mildern helfen. Sie könnte auch optimale Zeiten, z. B. für das Lernen, festlegen. Jetzt wäre ein guter Zeitpunkt für ein Programm zur Überführung der Grundlagen- in die klinische Forschung.

Zentraler Forschungsaspekt der Zeitforschung ist, den Faktor »Zeit« mithilfe von Zeiteffizienzforschung, präziser Zeitmessung (z. B. für GPS-Anwendungen wie die Präzisionslandwirtschaft, Fernwartung von Maschinen) und Zeitauflösung (z. B. 4D-Präzision) zu verstehen und gezielt kontrollieren zu können. Dies könnte bestehende Technologien optimieren, aber auch zu vollkommen neuartigen »Zeittechnologien« führen.

8.1 Das Zukunftsfeld

Das Konzept »Zeit« hat unterschiedliche Facetten. Einerseits wird Zeit physikalisch erklärt und ist dort eine eingeführte Variable (t), andererseits beschäftigen sich weitere unterschiedliche Disziplinen (Soziologie, Umweltforschung, Management, besonders auch die Philosophie) mit der Zeit.

Die Rolle der Zeit ist in vielen Entwicklungen noch unverstanden. Der Faktor »Zeit« ist auch die Klammer des gesamten Zukunftsfeldes, in dem sich viele Fragen zur »Zeit« ergeben, die sehr unterschiedliche Hintergründe, sehr unterschiedliche Anwendungsfelder haben und die doch zusammenhängen. So stellt sich z. B. die Frage nach der Zeitabfolge komplexer Prozesse, um Anwendungen schneller, effizienter und kostengünstiger zu machen. Schnell allein genügt



aber oft nicht, sondern zur »Zeit« gehört es auch, Prozesse zu parallelisieren oder zu synchronisieren. Im Deutschen existiert dafür nicht einmal ein Wort, im Englischen ist es »to time«. »Timing« begegnet uns daher auch im Deutschen immer häufiger.

Ebenso rückt die Frage nach der Dynamik und zeitlichen Entwicklung, besonders nichtlinearer Prozesse auf unterschiedlichen Zeitskalen, immer stärker in den Vordergrund. Während uns die Zeitabläufe in der Alltagsumgebung vertraut sind, laufen Prozesse und Phänomene im Mikrokosmos (z. B. atomare Anregungen in Atomen, Elektronenbewegungen in Atomen und Molekülen oder biochemische/ chemische Reaktionen in (Bio-)Molekülen, Clustern, Nano-/ Mikrostrukturen) auf extrem kurzen, uns unvorstellbaren Zeitskalen ab. Diese Prozesse sind jedoch grundlegend für unser Leben. Ihr Verständnis ist daher für eine immer größere Anzahl technischer Errungenschaften wichtig. Wie und wie schnell oder wie effizient kann intramolekulare Energie transportiert werden? Wie gehen Moleküle Bindungen ein und wie lassen sich diese trennen? Wie laufen biologische Prozesse in Echtzeit ab? Wann ist der geeignete Zeitpunkt, z. B. für eine (orts- und) zeitgenaue Medikamentenabgabe?

Entsprechend werden als besonders relevante Forschungsthemen bereits heute, mehr jedoch in der Zukunft, die ultrapräzise und ultrakurze Zeitmessung (Femto-, Atto- oder eine künftige Zeptophysik⁶⁰), biologische Uhren (Chronobiologie) sowie der Faktor Zeit in Synchronisierungs- und Parallelisierungsfragen (Effizienz) angesehen.

8.2 Ausgangssituation im Zukunftsfeld heute (2009)

Zeit beschreibt die Abfolge von Ereignissen und wird dadurch vom Menschen als gerichtet, d. h. als ein Voranschreiten von der Vergangenheit über die Gegenwart in die Zukunft, wahrgenommen und beschrieben. Physikalische Theorien wie die Relativitätstheorie oder Quantentheorie bilden die Zeit zwar ab (z. B. als vierdimensionale »Raumzeit« in der Relativitätstheorie), sind aber z. T. noch unvereinbar (z. B. kontinuierliche vs. gequantelte Raum-Zeit). Obgleich die theoretisch kürzeste Zeiteinheit, welche eine Grenze für die Anwendbarkeit der bekannten physikalischen Gesetze markiert, die so genannte Planckzeit ($\sim 10^{-43}$ Sekunden), auch in naher Zukunft nicht experimentell zugänglich sein wird⁶¹, so ist in der Physik die Debatte um eine größere Präzision der Zeitmessung (z. B. durch optische Uhren mithilfe von Femtosekundenlasern, Frequenzkammtech-

⁶⁰ Eine Femtosekunde ist eine millionstel Milliardstelsekunde (10^{-15} Sekunden), eine Attosekunde 10^{-18} s, und eine Zeptosekunde 10^{-21} s.

⁶¹ Der Rekord liegt bei der Erzeugung von Lichtblitzen mit einer Dauer von 80×10^{-18} s (80 Attosekunden, Stand 2008).



nik⁶² usw.) neu aufgekommen. Dies hat Relevanz für zahlreiche Anwendungsfelder und nicht für nur die Grundlagenforschung.

Die Philosophie fragt nach dem Wesen der Zeit, was auch Themen der Weltanschauung berührt. Für die physikalischen, die Bio- und Humanwissenschaften ist die Zeit ein zentraler, auch messtechnisch erfassbarer Parameter, u. a. bei allen bewegten Körpern (Dynamik, Entwicklung), in der Chronobiologie oder der Zeitsoziologie. Die Psychologie untersucht die Zeitwahrnehmung und das Zeitgefühl. In den Sprachwissenschaften bedeutet »Zeit« die grammatische Form der Zeitwörter, das Tempus. Es gibt entsprechend unterschiedliche disziplinäre Herangehensweisen, die von der Physik über Soziologie, Umweltforschung, Management bis zur Philosophie reichen. Der Stand der Forschung zur »sozialen Zeit« wurde von Rollwagen (2008) aufgearbeitet. Zur ultrapräzisen Zeitmessung siehe u. a. Jesse (2005). Neben vielen einzelnen Forschungsthemen werden folgende Zukunftsthemen für besonders relevant gehalten⁶³:

Ultrapräzise Zeitmessung – neue Ära der Zeitmessung durch optische

Uhren: Die heutigen Atomuhren sind bereits sehr genau, aber für die optimierte bzw. verbesserte Satellitennavigation (GPS-Anwendungen) beispielsweise scheint die Zeitmessung zum Stand des Jahres 2009 nicht auszureichen: Vermessungs- und Lokalisationsaufgaben müssen zeitlich und räumlich immer präziser werden. Optische Uhren gelten als vielversprechende Nachfolger der 50 Jahre alten Cäsiumuhren. Sie können in naher Zukunft zur Neudefinition der Sekunde führen und mit einer bis zu 1.000 Mal höheren Präzision das Tor zu vielfältigen neuen Anwendungen öffnen (Peik und Sterr 2008). Als Beispiele für potenzielle Anwendungen im GPS-Kontext können eine hochpräzise Navigation im globalen Transport/ Verkehr, die Navigation auf großen Distanzen und Positionsbestimmung bzw. Ortung weit entfernter Objekte in der Raumfahrt (Raumsonden, Raumfahrzeuge), die Düngung einzelner Pflanzen in der Präzisionslandwirtschaft oder die Fernwartung und -reparatur von Maschinen angeführt werden. Auch die optimierte Synchronisierung der Medien und der drahtlosen Kommunikation, die exakte Prozesssteuerung in der Produktion oder Umweltbeobachtungen (z. B. mit Interferometern) sind zentrale Anwendungsfelder.

⁶² Die 1998 von Theodor W. Hänsch (Nobelpreis 2005, Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching) entwickelte Frequenzkammtechnik erlaubt das fehlerfreie Zählen der Schwingungen des Laserlichts (eines Femtosekundenlasers) und dient damit als Uhrwerk möglicher künftiger optischer Uhren. Die Überlagerung einer zu vermessenden unbekanntes Frequenz (»indirekte Zeit«) mit Ultrakurzpulsen und Übertragung auf niedrigere Frequenzen mit der Frequenzkammtechnik, d. h. Zerlegung z. B. des sichtbaren Lichtspektrums in einzelne Sequenzen, erlaubt weiterhin die ultragenau Vermessung mit elektronischen Mitteln. Um diese Technik z. B. auf den UV-Bereich auszudehnen und für praktische Anwendungen zu nutzen, ist noch Forschung erforderlich.

⁶³ Diese Einschätzungen beruhen auf Experteninterviews mit ausgewählten Personen, der Bibliometrie, der Online-Befragung und der zweiten Welle des Monitorings sowie weiterer aktueller Fachliteratur.



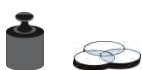
4D-Bildgebung – Echtzeit-Strukturuntersuchung und Mikroskopie bis in den subatomaren Bereich: Die bereits heute unter dem Namen »Femtonik« vom BMBF geförderte Femtosekudentechnologie bietet neue Möglichkeiten der minimalinvasiven Materialbearbeitung, Gewebebehandlung mit Nanometer-Präzision usw. Anhand der Darstellung von Bewegungen im molekularen Bereich lassen sich ultraschnelle Prozesse (z. B. chemische, biochemische Reaktionen) auf Molekülebene beobachten, zeitaufgelöste Strukturuntersuchungen biologischer und chemischer Komponenten vornehmen und somit die Prozesse lebender Organismen beobachten. Längerfristig ermöglicht die Attophysik mit um den Faktor 1.000 kürzeren Lichtpulsen die zeitaufgelöste Untersuchung der Elektronenbewegung in Atomen, Molekülen und Nanostrukturen. Dies ist für die Molekularbiologie oder Medizintechnik relevant. Heutige Attosekundenlaser⁶⁴ erzeugen bereits Röntgenpulse unterhalb 100 Attosekunden. Gelingt es, diese Lasergeneration leistungsfähiger zu machen, so könnte künftig eine 4D-Bildgebung mit kompakten Röntgenquellen extrem hoher Auflösung (z. B. bis hin zu Angström) verfügbar werden. Ihre Einsatzgebiete wären medizinische Diagnose und Behandlung (z. B. zielgenaue Röntgentherapie, in vivo Biostrukturuntersuchungen sowie zahlreiche weitere Anwendungen, siehe u. a. Stubenrauch 2005).

Atto(sekunden)elektronik – Kontrolle von Prozessen auf atomarer Zeitskala: Die Möglichkeit, Phänomene und Prozesse auf der atomaren Zeitskala (24 Attosekunden) zu verstehen und zu beherrschen, bietet weitere vielfältige Potenziale (Kienberger und Krausz 2009; Kapteyn et al. 2007): Eine »Attoelektronik« könnte entstehen. Beherrschen Forscher die Echtzeit-Beobachtung des elektrischen Ladungstransports und die Kontrolle der Elektronenbewegung in Molekülen und Nanostrukturen, so können künftig Hochgeschwindigkeits-Elektroniksysteme (z. B. molekulare/ chemische Computer) entwickelt werden, die 1 Mio.-fach schneller als heutige Computer rechnen. Durch Untersuchung der Dynamik von Ladungstransferprozessen wird der intramolekulare Energietransport besser verstanden. Dies kann zu effizienteren Energieanwendungen – besonders auf Basis der Nanotechnologie – führen.

Chronobiologie/ Biologische Uhr(en)

Das Thema Biologische Uhr(en) wurde in der internationalen Recherche, genauer: im japanischen Foresight (siehe NISTEP 2005), als relevantes Zukunftsthema gefunden. Dies war der Ausgangspunkt für die Annahme, Zeitforschung

⁶⁴ Wenn ein Puls aus einem Femtosekundenlaser mit einem atomaren Material in Wechselwirkung tritt, können Elektronen freigesetzt und durch das elektrische Feld des Femtosekundenpulses beschleunigt werden. Kehrt sich das elektrische Feld um, so werden die Elektronen zum Atom zurückgetrieben und können unter Aussenden eines hochenergetischen Photons rekombinieren. Es entsteht Strahlung höherer Frequenz, sog. hohe Harmonische, im Bereich von Attosekunden. 2008 wurden 80 Attosekunden erreicht.



könne ein Zukunftsfeld sein. Die eigene Bibliometrie bestätigte die große Dynamik im gesamten Zukunftsfeld, besonders jedoch den Anstieg der Anzahl an Publikationen zu(r) Biologische(n) Uhr(en) bzw. zur Chronobiologie. Ein Diskussionspunkt der Publikationen ist, dass viele Menschen entgegen ihrer biologischen Uhr leben, aber unklar ist, welche Folgen (z. B. Krankheiten) dies hat.

Die Chronobiologie – Lehre von den rhythmischen Vorgängen im lebendigen Organismus – wurde von der Naturwissenschaft lange Zeit belächelt, bietet aber inzwischen neue Ansätze zur Früherkennung von Krankheiten und ihrer effizienteren Behandlung (»profil« 2006, S. 138, Überblick bei Lemmer 2007), z. B. Asthma, Bluthochdruck, bestimmte Tumore, Arthritis und sogar die Neigung zu extremem Übergewicht. Hinzu kommt die Forschung zu den inneren Uhren des Menschen. Die biologische »Hauptuhr« des Menschen findet sich im Hypothalamus des Gehirns – genauer: im suprachiasmatischen Nukleus (SCN), einem etwa 20.000 Zellen umfassenden neuronalen Kerngebiet. Aber auch in den meisten Körpergeweben und Organen finden sich Chronometer, die etwa im Gleichtakt mit dem SCN schwingen. Die Uhren (bisher wurden drei nachgewiesen, CLOCK 1, 2, 3) versetzen ihre Träger in die Lage, sich »vorausschauend« auf zyklisch wiederkehrende Ereignisse einzustellen und auf diese Weise ihren Stoff- und Energieverbrauch zu optimieren.

Die Chronobiologie ist für Anwendungen in der Medizin eine neue Grundlage. Selbst bei konventionellen Behandlungen mit Medikamenten spielt der richtige Zeitpunkt der Einnahme eine Rolle: Wirkungen könnten optimiert und Nebenwirkungen reduziert werden. Erste Erfolge der so genannten »Chronotherapie« werden bei Dialyse, Chemotherapie (akute lymphatische Leukämie) und anderen gezielten Behandlungen gemeldet. Auch das Schlafverhalten wird nach einer inneren Uhr gesteuert. Welche Ursachen die Veränderungen im Laufe des Lebens haben und wie sich die innere Uhr und ihre Mechanismen selbst verändern, bleibt zu klären, um Schlafstörungen besser behandeln zu können (Neue Zürcher Zeitung 02.04.2008, S. 65). Zugleich sind sowohl die hormonellen Regelungs- als auch die Energieaufnahmemechanismen weitgehend ungeklärt. Zum Beispiel schlucken viele Menschen zur Vermeidung des Jetlags oder fälschlicherweise als »Schlafmittel« Melatonin, wissen aber nicht, wie Melatonin wirkt.

Daneben gibt es Studien (Kelner 2008), die einen starken Zusammenhang zwischen dem Energieverbrauch der Menschen und einer biologisch angepassten Zeiteinteilung des Tages festgestellt haben. Dies würde neben den Forschungen zur hormonellen Regelung Aufschlüsse darüber geben, warum Schichtarbeiter, die entgegen ihrer biologischen Uhr arbeiten, häufiger als andere Menschen an Übergewicht sowie an Depressionen und Verdauungsstörungen leiden (»profil« 2006). Der generelle Zusammenhang zwischen biologischen Uhren und Stoffwechsel ist allerdings im Detail noch nicht geklärt. Das Protein Sirt1 wurde be-



reits als zentrales Bindeglied zwischen Stoffwechsel und zirkadianer Rhythmik gefunden. Wenn geklärt ist, welche wichtigen Funktionen Sirt 1 im Stoffwechsel erfüllt (Mobilisierung von Fett, Hemmung der Zellalterung), könnte es einen Ansatzpunkt für die Vorbeugung bzw. Therapie von Krankheiten wie Fettleibigkeit, Diabetes oder metabolischem Syndrom bieten. (Cell 2008, S. 134, 317-328; 329-340).

Ein weiterer Zusammenhang wird zwischen biologischen Rhythmen und Depressionen angenommen. Der große Einfluss des Lichts und damit des Hell-Dunkel-Rhythmus auf Depressionen ist zwar bekannt, die genauen Vorgänge jedoch noch nicht. Forscher nehmen an, dass wir in einigen Jahren neue Lichtquellen haben werden, die an biologische Rhythmen angepasst sind (Information von Experten auf der Tagung am 22.6.2009 in Bonn). Der Kreis schließt sich, weil der Zusammenhang zwischen Licht und Hormonen (frühere sexuelle Reife von Jungen durch Kunstlicht) ebenfalls Gegenstand von Untersuchungen ist, bisher aber den zeitlichen Kontext, wann welche Art von Licht unkritisch oder förderlich ist, noch außer Acht lässt.

Synchronisierung und Parallelisierung, Effizienz

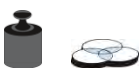
Insbesondere Innovations- und Produktionsprozesse werden immer schneller und auch komplexer. Hier stehen in der Regel Projektmanagement und Zeitmanagement im Vordergrund, genügen aber den heutigen Anforderungen an Komplexität nicht (Zusammenfassung u. a. bei Rollwagen 2008). Auch in der Mobilität und der Energieeffizienz wird der Zeitfaktor immer stärker diskutiert (z. B. Tagung in Tutzing, 2009). So könnte eine optimierte Synchronisierung von Internetservern z. B. extreme Energieeinsparungen bewirken.

8.3 Langfristperspektive des Zukunftsfeldes

Entsprechende Forschungsfragen finden sich daher auf unterschiedlichen Ebenen. Abbildung 18 illustriert einige der langfristig anstehenden Zukunftsthemen.

Ultrapräzise und ultrakurze Zeitmessung

- Wie können optische Uhren in der Praxis genutzt werden? Es ergeben sich Standardisierungsfragen, die forschungsrelevant sind: Bisher ist der Standard der Sekunde Cäsium-basiert.
- Wie können heutige Attosekundenlaser leistungsfähiger gemacht werden, um eine 4D-Bildgebung mit kompakten Röntgenquellen extrem hoher (bis hin zu Angström) Auflösung für die medizinische Diagnose und Behandlung, in vivo Biostrukturuntersuchungen sowie zahlreiche weitere Anwendungen durch eine neue 4D-Mikroskopie verfügbar zu machen?



- Wie kann die Atto(sekunden)elektronik nutzbar gemacht werden, um z. B. molekulare oder chemische Computer, eine effiziente Energieübertragung etc. zu ermöglichen?

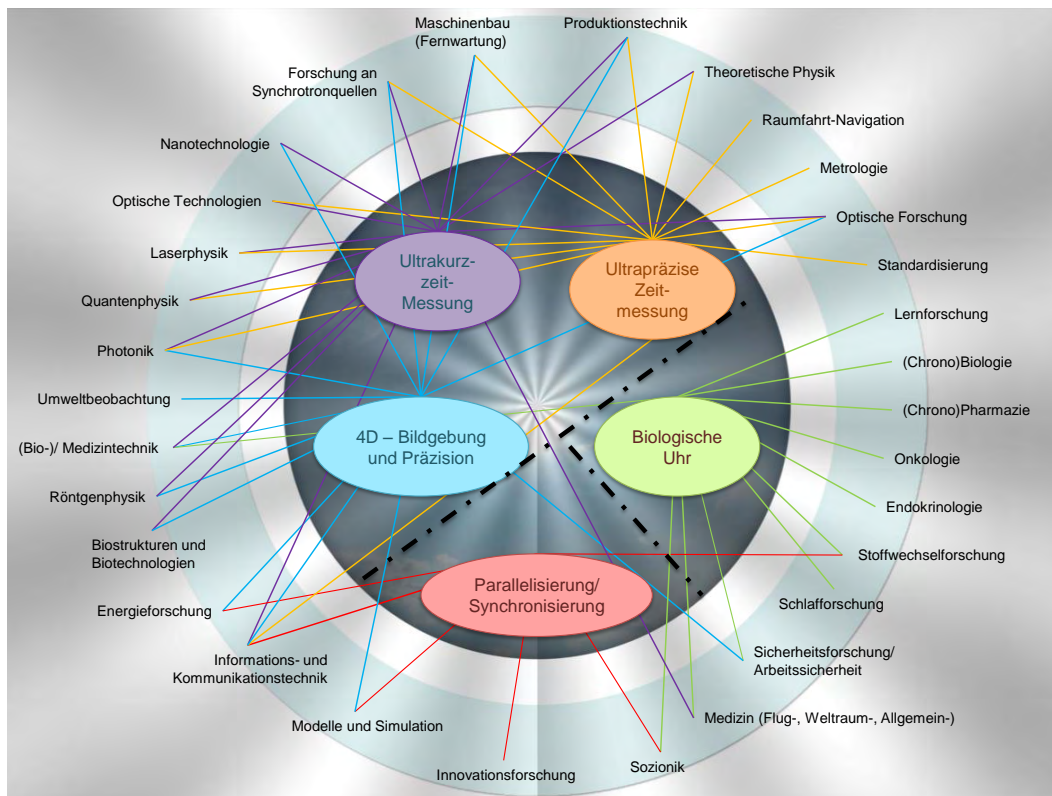


Abbildung 18: Zukünftig beteiligte Forschungsrichtungen

Chronobiologie/ Biologische Uhren

- Welche Möglichkeiten bieten sich durch die Chronobiologie für die Medizin? Welche Rolle kann das »Timing« für eine schonendere Therapie (z. B. bei Dialyse, bei Chemotherapie usw.) und im Pharmabereich spielen? Können bestimmte Medikamente durch zeitgerechte Dosierungen eingespart und kann damit gleichzeitig die Lebensqualität der Patienten erhöht werden? Kann die Kombination aus zeitlich präziser Medikamentierung (Pharmazeutika) und mikrosystemtechnik-basierten Systemen (automatisierte Messung der Körperparameter und dann zeitlich abgestimmte Medikamentengabe über Sensoren, Depots, »Missile Drugs«, Implantate etc.) hier einen Innovationsschub auslösen und Kosten senken?
- Können Schlafstörungen besser behandelt werden, wenn Erkenntnisse über die Funktionen der unterschiedlichen Chronometer in Lebewesen bekannt sind? Wie können Depressionen vermieden werden?



- Das Verständnis der biologischen Uhr scheint für das Lernen, für eine bessere Medikamentierung wie auch für Arbeitszeiten und -strukturen sowie das Verhalten der Menschen ausschlaggebend zu sein. Welche Prozesse und Wechselwirkungen gibt es hier? Wenn bekannt ist, wie die Energieaufnahme des Menschen von der Zeit abhängt: Wie können bei Schichtarbeitern oder Personen, die gegen ihre biologischen Uhren arbeiten, negative Effekte wie Adipositas vermieden werden?
- Wie kann die Chronobiologie zu Sicherheitsaspekten beitragen? Die meisten großen Unglücke geschehen nachts und aufgrund geringerer Aufmerksamkeit der Menschen bei der Überwachung (z. B. Tschernobyl).

Effizienz in Prozessen: Synchronisierung und Parallelisierung

- Wie können Prozesse effizient ablaufen, d. h. synchronisiert und parallelisiert werden, ohne einfach nur »schneller« zu werden und die Menschen damit zu überfordern? Wie können Internetserver (für Energieeinsparungen), Energiesysteme (regenerative und konventionelle Energie in Netzen managen) oder die Entwicklung neuer Produkte besser synchronisiert werden?
- Wie wird Zeit wirtschaftlich »bewertet« (auch beim Tauschen von Zeit gegen Zeit)? Können Menschen beispielsweise die Bahn AG regresspflichtig machen, wenn Züge zu spät kommen und ihnen damit Zeit »genommen« wird? Regulierungsfragen werden sich in Zukunft noch wesentlich häufiger stellen.

Für besonders wichtig wurde in der Online-Befragung des BMBF-Foresight-Prozesses der Umgang des Menschen mit Zeit eingeschätzt, etwa vor dem Hintergrund der Flexibilisierung der Arbeit, der Entkopplung von Arbeitszeit und Ergebnis, hinsichtlich des Umgangs mit der Zeit jenseits des Zeitmanagements sowie bei Be- und Entschleunigungsprozessen. Neue Zeitstrukturen in einer »alternden Gesellschaft« werden sicherlich in den nächsten 20 Jahren ein gesellschaftlich relevantes Thema bleiben. Auch neue Methoden der Zukunftsforschung wurden für besonders relevant gehalten. Diese Themen wurden aber im weiteren Verlauf des BMBF-Foresight-Prozesses nicht vertieft betrachtet. Die Zeitforschung ist auf unterschiedliche Disziplinen »verstreut« und würde durch gezielte Zusammenarbeit an Dynamik gewinnen.



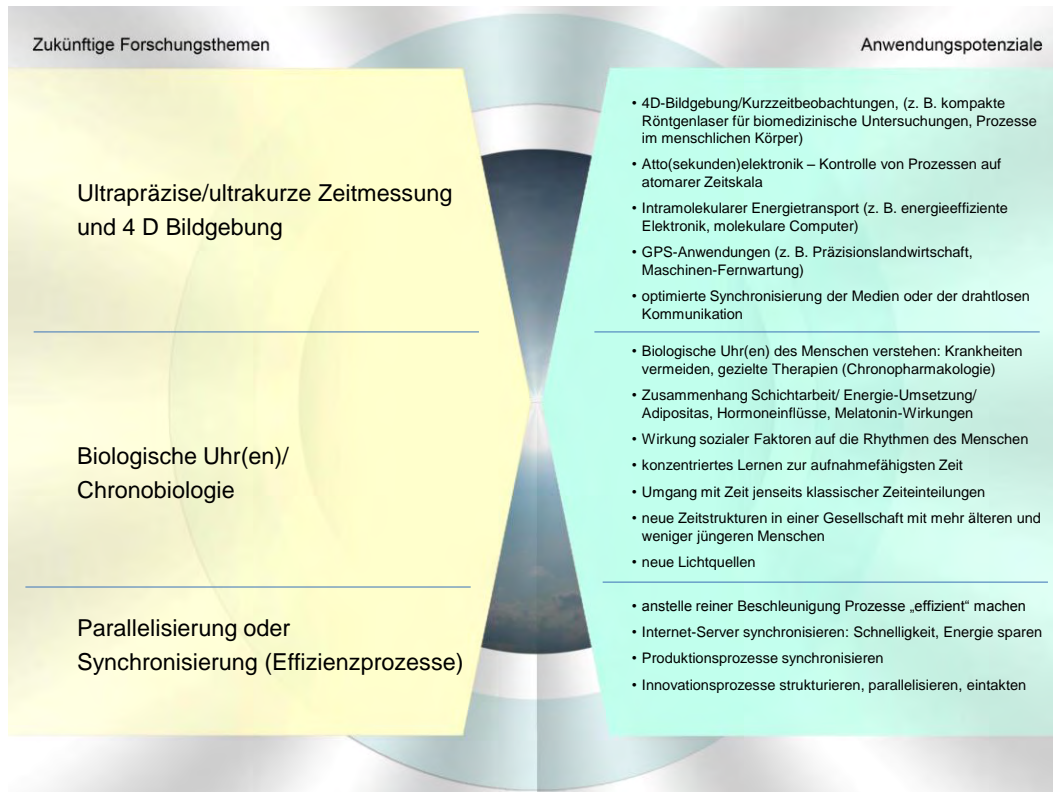


Abbildung 19: Zukünftige Forschungsthemen und Anwendungspotenziale im Zukunftsfeld »Zeitforschung«

8.4 Warum ist das Zukunftsfeld relevant?

Die ultrakurze Zeitskala, auf welcher unser Mikrokosmos lebt, verstehen und kontrollieren zu können, bietet kaum zu unterschätzende Potenziale für den Menschen sowie den technischen Fortschritt. Die Lebensdauer einzelner atomarer, molekularer bis komplexer Konfigurationen ließe sich durch Manipulation chemischer, biochemischer Bindungen/ Reaktionen sowie elektronischer Zustände beherrschen. Anwendungspotenziale ergeben sich für praktisch alle Disziplinen und Technologien, die nach höherer zeitlicher und räumlicher Präzision streben: Metrologie, Nanotechnologie, Biotechnologie, Medizintechnik/ Gesundheit, Informations- und Kommunikationstechnologie, Produktion, Sicherheitstechnologie, Energietechnik etc.

Die ultrapräzise und ultrakurze Zeitmessung, die 4D-Bildgebung und die Attophysik können viele neue Anwendungen ermöglichen, sowohl in der Forschung (Echtzeit-Beobachtung) als auch in Produkten. Beispielsweise werden ultrapräzise medizinische Diagnosen und Therapien in Echtzeit denkbar.

Wenn die unterschiedlichen Chronometer im Menschen verstanden werden, kann dies zur Prävention, einer neuen Art der Diagnostik, Therapie sowie zu ei-



ner besseren Nutzung der Alltagszeit und damit der Lebensqualität beitragen. Eine neue »Automatisierung« der Medikamentierung könnte Impulse für andere technische Bereiche (Mikrosysteme) geben. Einigen Gefahren (Arbeitsschutz, aber auch nächtliche Anlagenüberwachung) könnte besser begegnet werden.

Der Faktor Zeit findet sich aber auch in vielen Prozessen (Produktionsprozesse, Energieübertragung, das menschliche Leben usw.), die durch ein Verständnis besser parallelisiert bzw. synchronisiert und damit effizienter gestaltet werden können. Zeitforschung liegt daher quer zu allen anderen Disziplinen. So können Forschungsergebnisse dem Menschen nicht nur direkt (z. B. Therapie, Medikamente, Medikamentierung oder Lern- und Arbeitsgestaltung), sondern auch indirekt (z. B. optimierte Anpassung der sozialen und arbeitsbedingten Umgebungsbedingungen an den Bedarf des Menschen) nutzbar gemacht werden. Forschungsergebnisse könnten daher z. B. für Gebäude- und Raumplanung bzw. Infrastrukturplanung und -design (bzgl. Variation von Licht und Dunkelheit bzw. natürliche und künstliche Lichtquellen zur Erhöhung von Effizienz, Wohlfühl und Gesundheit, damit Verminderung von Stress), für Planung von Öffnungs- und Schließzeiten von öffentlichen Einrichtungen, Geschäften, etc. oder Lehr- und Arbeitszeitregelungen und vieles mehr relevant werden.

8.5 Akteure im Innovationssystem heute

Deutschland ist heute neben den USA mit Forschergruppen u. a. am Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) in München, der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig sowie vielen weiteren Universitäten (z. B. Uni München, Uni Bielefeld) und Forschungseinrichtungen (z. B. Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie) führend auf dem Gebiet der **Ultrakurzzeitwissenschaften**, insbesondere auf jenem der noch sehr jungen Attophysik (Geburtsstunde 2002 durch Erzeugung von sub-femtosekunden Pulsen). Neben den USA und Deutschland zählen heute China, Frankreich, Russland und Japan zu den weiteren wichtigen Ländern mit Aktivitäten in den Ultrakurzzeitwissenschaften. Publikationen im noch sehr kleinen Bereich der Attophysik haben sich beispielsweise in den letzten zehn Jahren mehr als verzehnfacht (auf etwa 200 im Jahr 2008), während sich Publikationen im Bereich der Kurzzeitwissenschaften insgesamt in diesem Vergleichszeitraum etwa verdreifacht haben.⁶⁵

Neben den Entwicklungen im Bereich der Laserphysik und der Kurzzeitwissenschaften zeigt sich zudem eine wachsende Konvergenz bzw. gegenseitige Befruchtung oder Beeinflussung zwischen so genannten »Table-top«-Laseranwendungen im Labormaßstab mit Kurzzeittechnik. Hier sind Großfor-

⁶⁵ Auf Basis stichwortbasierter bibliometrischer Analysen im ISI »Web of Knowledge«.



schungseinrichtungen wie das Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY) aktiv. Bisher waren der weiche Röntgen- und Vakuum-Ultraviolettbereich, welche mit »Table-top«-Laserquellen zugänglich werden sollen (noch fehlt es aber an Intensität und Leistungsfähigkeit) die unangefochtenen Domänen der Synchrotronstrahlung oder neuartiger Laserquellen wie dem Freie-Elektronen-Laser (FEL). Mit dem für 2012 geplanten XFEL (Röntgen-FEL)⁶⁶ am DESY werden zwar Elektronenenergien von 10 bis 20 GeV zur Verfügung stehen, dafür werden aber die Röntgenlaserpulse nicht kürzer als etwa 100 Femtosekunden sein (die Laserphysik erreicht bereits heute weniger als 100 Attosekunden). Sowohl Laserphysiker und Ultrakurzzeitwissenschaftler als auch Forscher im Bereich der Synchrotronstrahlung können hier künftig voneinander stärker profitieren.

Akteure Echtzeit

- Ludwig-Maximilians-Universität München
- Max-Planck-Institut für Quantenoptik
- Universität Heidelberg
- Freie Universität Berlin
- Universität Hamburg
- Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Technische Universität Dresden
- Technische Universität München
- Laser Zentrum Hannover e. V.
- Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie im Forschungsverbund Berlin e. V.

Akteure Optische Uhr

- Max-Planck-Institut für Quantenoptik
- Ludwig-Maximilians-Universität München
- Universität Bielefeld
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
- Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
- Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
- Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie im Forschungsverbund Berlin e. V.
- Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme
- Leibniz Universität Hannover
- Max-Planck-Institut für Kernphysik

Akteure Attophysik

- Max-Planck-Institut für Quantenoptik
- Ludwig-Maximilians-Universität München
- Universität Bielefeld
- Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie im Forschungsverbund Berlin e. V.
- Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme
- Max-Planck-Institut für Kernphysik
- Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
- Universität Hamburg
- FOM Fachhochschule für Oekonomie & Management
- Julius-Maximilians-Universität Würzburg
- Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt
- Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
- Freie Universität Berlin
- Universität Kassel
- Leibniz Universität Hannover

Tabelle 8: Akteure der Ultrakurzzeitwissenschaften im Jahr 2009

⁶⁶ <http://xfel.desy.de/>.



Das Zusammenwachsen dieser »Communities« wird auch auf EU-Ebene im Rahmen der »European Strategy Forum on Research Infrastructures« (ESFRI)⁶⁷ und einigen Großvorhaben deutlich. Beispiele sind ELI (»Extreme Light Infrastructure«, Förderung: 400 Mio. Euro, Vorbereitungsphase 2008 bis 2010)⁶⁸ zur Untersuchung der Materie-Licht-Wechselwirkung bei extrem hohen Intensitäten und kurzen Zeitskalen (das MPQ ist hier vertreten) sowie HiPER (High Power laser Energy Research facility, Förderung: 1 Mrd. Euro, Vorbereitungsphase 2008-2011)⁶⁹, ein Ansatz zur Lösung des globalen Energieproblems mit Laserfusion.

Um die derzeit im internationalen Vergleich führende Rolle Deutschlands zu festigen und weiter auszubauen, dürfte eine rechtzeitige bzw. verstärkte Vernetzung der relevanten »Communities« (d. h. auch Anwender/ Nutzer der zu entwickelnden Instrumente) immer wichtiger werden und sollte bereits heute angegangen werden.

Die **Chronobiologie** ist in Deutschland zwar etabliert, aber noch nicht verbreitet. Die Akteure finden sich einerseits an medizinischen Zentren, in Schlaflabors oder in der Pharmaindustrie (siehe Tabelle 9).

Akteure Chronobiologie	
- Institut für Pharmakologie & Toxikologie Mannheim/ Universität Heidelberg (Prof. Lemmer, em., Dr. Gorbey)	- Zentrum für Chronobiologie, Ludwig-Maximilians-Universität München (Prof. Rönneberg)
- Chronobiology Lab der Charité, Universitätsmedizin Berlin (Prof. Kramer)	- Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Biologie II (Prof. Wagner)
- Arbeitsgemeinschaft Schlafforschung und klinische Chronobiologie, Institut für Physiologie, Charité, Berlin (Dr. Kunz)	- Universität Halle, Medizin- und Pflegewissenschaften (Prof. Peschke)
- AK Neurobiologie Circadianer Rhythmen, Johann W. Goethe Universität, Frankfurt am Main (Prof. Korff, Prof. Fleissner)	- Gottlieb-Daimler- und Karl-Benz-Stiftung
	- Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit)

Tabelle 9: Akteure Chronobiologie im Jahr 2009

Seit 2006 gibt es ein europäisches Forschungsnetzwerk EUCLOCK⁷⁰ (Leitung Prof. Roenneberg, LMU München), in dem das »Entrainment«, die Synchronisation der inneren Uhr mit äußeren Gegebenheiten, untersucht wird. Dieses Netzwerk steht unter deutscher Leitung (LMU München). Die Gottlieb-Daimler- und Karl-Benz-Stiftung nimmt sich in Verbindung mit EUCLOCK des Themas an⁷¹ und hat die Industrie in erste Vorgespräche einbezogen.

⁶⁷ <http://cordis.europa.eu/esfri/>, eine der strategischen Technologieplattformen.

⁶⁸ <http://www.extreme-light-infrastructure.eu/>.

⁶⁹ <http://www.hiper-laser.org/>.

⁷⁰ <http://www.euclock.org>.

⁷¹ <http://www.clock-work.org>.



In der Bibliometrie finden sich viele Artikel aus der Schweiz und Frankreich, einige auch aus den Niederlanden. Dort scheint das Feld stärker etabliert zu sein (z. B. Centre for Chronobiology, Universitäre Psychiatrische Kliniken, CH-Basel, Groningen Center of Behavioural and Cognitive Neuroscience (BCN), Rijksuniversiteit Groningen/ Niederlande). In Japan gibt es ein Institut (Institute for Biological Resources and Functions), das sich mit dem Jetlag und seinen Folgen auseinandersetzt. An der Universität Manchester wird an »Chronobiologie und Sport« geforscht. Zeitforscher mit breitem gesellschafts-, wirtschafts- und politikwissenschaftlichen Ansätzen sind teilweise in der Deutschen Gesellschaft für Zeitpolitik organisiert.⁷²

8.6 Zukunftsfähige Akteurskonstellationen

Es wird schwierig sein, die gesamte Zeitforschung, die sehr breit gefächert ist und auch einen – hier nicht im Detail beschriebenen – gesellschaftswissenschaftlichen Aspekt hat, als Ganzes in einem einzigen strategischen Dialog zu behandeln. Es ergeben sich daher unserer Einschätzung nach zwei unterschiedliche Foki potenzieller Partnerschaften, mit denen gestartet werden könnte, die aber erst später zusammengeführt werden sollten.

1. Fokus: Die dem Thema ultrapräzise/ ultrakurze Zeitmessung zuzuordnenden Akteure stammen aus unterschiedlichen Forschungsbereichen. Durch die Laserphysik und Kurzzeitwissenschaften (z. B. »Table-top Laser«) sowie Forschung an Synchrotron-Strahlquellen (z. B. FEL, XFEL) werden **Instrumente und Methoden** (weiter-) entwickelt, die eine immer präzisere räumliche Auflösung von Strukturen und vor allem auch die zeitliche Auflösung von Prozessen (Dynamik, Kinetik) ermöglichen. Strategische Partnerschaften und gemeinsame Forschungsinitiativen können helfen, diese Akteure stärker miteinander zu vernetzen, um somit auch die Erforschung künftiger Photoneninstrumente und -methoden dynamisch voranzutreiben und die derzeit im internationalen Vergleich führende Rolle Deutschlands zu festigen bzw. weiter auszubauen.

Hier sind auch offensichtlich mit dem Forschungsthema verbundene Akteure und Gebiete wie die Attophysik, nichtlineare Optik, Nanophotonik/ -optik, theoretische Modellierung und Simulation oder die Metrologie im Zusammenhang mit optischen Uhren und Zeitmessung zu nennen, welche für die Entwicklung von (Untersuchungs-) **Methoden und Verfahren** von Bedeutung sind.

An Großforschungseinrichtungen, z. B. dem Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY), profitieren breite Nutzergruppen aus ganz unterschiedlichen For-

⁷² Namensliste unter www.zeitpolitik.de



schungsdisziplinen von den Strahlquellen: u. a. Biotechnologie (z. B. Proteinfaltungsprozesse), Chemie und Materialwissenschaften (z. B. Katalysatoren), Nanotechnologie (z. B. Nanostrukturunterdynamik), Medizintechnik (z. B. 4D-Bildgebung, Röntgentomographie), Energietechnik. Künftige kompakte Ultrakurzzeit-/ Ultrakurzpulsquellen könnten für diese sowie weitere **Nutzer bzw. Anwender** immer wichtiger werden. Dabei könnten möglicherweise auch Chronobiologen künftig mithilfe der Molekularbiologie das Zusammenspiel von Genen mittels Nutzung einer ultrapräzisen 4D-Bildgebung untersuchen. Forscher und Nutzer bzw. Anwender einer ultrapräzisen/ ultrakurzen Zeitmessung gilt es daher zusammenzubringen und gemeinsam zu fördern, um die Anwendungsbreite dieser künftigen Ultrakurzzeitinstrumente potenziellen weiteren Anwendern sichtbar zu machen.

2. Fokus: Ausgehend von der Forschung zu **biologischen Uhren**/ Chronobiologie sollten ebenfalls strategische Partnerschaften angedacht und initiiert werden. Hier wird insbesondere an eine neue Kooperation zwischen Chronobiologen und Sicherheitsforschern gedacht, um neue Möglichkeiten auszuloten, das »Sicherheitsrisiko Mensch« zu minimieren.

Auf eine weitere tragfähige Akteurskonstellation neben dem Feld der bereits existierenden Chronopharmazie, die Pharmaindustrie und Forscher zusammenbringt, verweist die **Forschung zum Stoffwechsel**. Diese wird von (Molekular-) Biologen, Medizinern usw. betrieben, bezieht heute aber nur selten den Zeitfaktor mit ein. Um z. B. dem metabolischen Syndrom auf die Spur zu kommen, ist eine Zusammenarbeit mit Chronobiologen notwendig. Es wird angenommen, dass beim metabolischen Syndrom (eine Krankheit, bei der Bluthochdruck, Diabetes, häufig Adipositas und andere Faktoren zusammenkommen) die Stoffwechselfvorgänge voneinander abgekoppelt und zeitlich nicht mehr richtig synchronisiert werden. Um diesen Vorgängen auf die Spur zu kommen, werden derzeit bereits in der Industrie Daten erhoben (z. B. von der LMU München bei der Siemens AG), um Muster zu erkennen, die ggf. auf Stoffwechselstörungen durch Schichtarbeit hinweisen. Von Chronobiologen wurde der Wunsch formuliert, stärker mit Mikrosystemtechnikern zusammenzuarbeiten, um bessere Messgeräte zu erhalten und später auch Targeted Drugs zu entwickeln, die (Zeit-) Messungen und Dosierungen gleichzeitig ermöglichen.

Um Schlafstörungen und Depressionen besser behandeln zu können, ist nicht nur die Zusammenarbeit von Schlafforschern, Medizinern, Depressionen behandelnden praktischen Ärzten, Endokrinologen (zur Klärung der Wirkungsweise von Melatonin etc.) und der Chronobiologie notwendig. Vielmehr ist später in der Umsetzung die konkrete Kooperation mit Forschern angebracht, die sich mit neuen Lichtquellen und -dosierungen befassen. Die zeitlichen Abläufe im Körper des Menschen werden durch Licht stark beeinflusst (siehe Spork 2004 sowie dort zitierte Literatur), so dass mithilfe zeitlich abgestimmter Lichtdosie-



rungen Schlafstörungen und Depressionen vermieden werden können. Dies wiederum kann auch für Schichtarbeit relevant werden. Hier wird bereits damit experimentiert, tageslichtähnliche Verhältnisse herzustellen und so dem Körper eine andere zeitliche Rhythmik zu geben. Erkenntnisse aus der Flugmedizin und Weltraumforschung (Weltraummedizintechnik) sollten hier ebenfalls Eingang finden.

In einer späteren Phase werden auch Arbeitswissenschaftler und Arbeitsrechtler in die Dialoge mit einbezogen werden müssen, denn die bisherigen Ergebnisse der Chronobiologie legen mehr und mehr die gesundheitlichen Probleme durch das Arbeiten entgegen der biologischen Uhren offen. Ebenso wird die Zeitstruktur der Gesellschaft von der Zeitforschung ins Auge gefasst und damit werden weitere Akteure des Innovationssystems angesprochen: Bildungspolitiker für das richtige »Timing« des Lernens, Manager zum optimalen Einsatz der unterschiedlichen Altersgruppen in der Belegschaft von Unternehmen, Personengruppen, die häufig von Jetlag betroffen sind. Eine Lösungsfindung kann nur übergreifend angegangen werden.

Zeitforscher, die hier bereits übergreifend denken und auch die Politik einbeziehen, haben sich in Deutschland in einer Vereinigung (Deutsche Gesellschaft für Zeitpolitik⁷³) zusammengeschlossen. Hier finden sich sehr interdisziplinär denkende Akteure mit sehr unterschiedlichen Hintergründen. Auch diese sollten in die Diskussionen einbezogen werden.

Einige tragfähige Akteurskonstellationen der Chronobiologie werden über die Forschungsplattform EUCLOCK der EU bereits abgedeckt. Um auf nationaler Ebene die Ergebnisse schneller nutzen zu können, sollte hier jedoch über eine Verbreiterung im Sinne eines komplementären nationalen Netzwerks nachgedacht werden. Über die Gottlieb-Daimler- und Karl-Benz-Stiftung ist die Industrie bereits sehr am Thema interessiert. Das frühe Einbeziehen von Unternehmen, für deren zeitliche Organisation sowohl Chronobiologie als auch Parallelisierungs- und Synchronisierungsprozesse von Interesse sein dürften, ist aus Sicht der Themenkoordination im BMBF-Foresight unerlässlich.

8.7 Empfehlungen

Um die Zeitforschung in der ganzen Breite anzugehen, sollten nach Einschätzung der Themenkoordinatoren zunächst die zwei genannten Foki verfolgt und strategisch aufgebaut werden. Schrittweise kann dann eine Integration der un-

⁷³ Siehe www.zeitpolitik.de



terschiedlichen Ansätze erfolgen und bis auf sozialwissenschaftliche, besonders auch soziologische Forschung ausgedehnt werden.

Zum ersten Fokus Ultrakurzzeitmessung: Auf EU-Ebene sollen zukünftig Großvorhaben wie ELI (Extreme Light Infrastructure, Förderung: 400 Mio. Euro, Vorbereitungsphase 2008 bis 2010) zur Untersuchung der Materie-Licht-Wechselwirkung bei extrem hohen Intensitäten und kurzen Zeitskalen gefördert werden. Auf nationaler Ebene existieren bereits Großforschungseinrichtungen, an welche kurzfristig und ohne großen Kostenaufwand komplementäre Vorhaben bzw. Programme angegliedert werden könnten. Relevante »Communities« sollten gut vernetzt werden. Strategische Dialoge zwischen Forschern aus Wissenschaft und Wirtschaft könnten hier optimale, künftige Maßnahmen identifizieren helfen.

Auf der anderen Seite könnte auch die Einrichtung einer nationalen Plattform helfen, Akteure zusammenzubringen, die sich mit der Entwicklung von kompakten Kurzpulslasersystemen sowie der Entwicklung neuer Methoden und Verfahren beschäftigen (z. B. durch institutionelle Förderung, da hier konkrete Akteure führend sind) und die Erschließung neuer Forschungszweige sowie Anwendungen ermöglichen können (z. B. durch Förderprogramme, welche helfen Akteure thematisch zu vernetzen).

Aus Sicht der Innovationsforschung zeigt sich heute weniger eine technologiegetriebene denn eine nachfrageorientierte Förderung als vorteilhaft. So wird zunehmend auf große Leuchtturmprojekte und Pionierprogramme gesetzt, die globalen Bedarf wie Energie, Klimawandel, demografischen Wandel etc. adressieren. Die Zeitforschung kommt allerdings von beiden Seiten: einerseits von neuen Erkenntnissen der Grundlagenforschung, die überhaupt erst neue Anwendungen denkbar erscheinen lassen (z. B. die neuen Erkenntnisse über innere Uhren), andererseits von Anforderungen der neuen, auch anwendungsorientierten Grundlagenforschung (z. B. GPS-Anwendungen, die eine präzisere Zeitmessung erfordern). Daher sollten nach Auffassung der Themenkoordinatoren die folgenden Forschungsaspekte in den Zukunftsthemen langfristig als »Anwendungen« im Blick behalten werden und damit auch die Integration einer Zeitforschung vorantreiben:

Prozesse des Lebens verstehen, z. B. Altern, Chronobiologie etc. auf molekularer Ebene durch »molekulare Dynamik« untersuchen; Medikamentenentwicklung/ -design mithilfe der Erforschung von Proteinfaltungsprozessen. Hier fehlt es erstens noch an Grundlagenforschung, die möglicherweise durch institutionelle Förderung abgedeckt werden kann, aber vor allem auch an klinischen Studien, die den Transfer in die praktische Anwendung vorbereiten.



»**Gesund werden in Echtzeit**«, z. B. Diagnose durch 4D-Bildgebung und Therapie durch örtlich und zeitlich gezielte Medikamentenapplikation, Röntgentherapien.

Energie effizient einsparen, z. B. Optimierung von Materialien, Strukturen und Systemen – wie Solarzellen, Batterien, Brennstoffzellen – für den effizienten Energietransport, Informationsverarbeitung mit Lichtgeschwindigkeit durch optische Computer oder ultraschnelles Rechnen durch Attosekunden-elektronik.

Effiziente Umweltprozesse, z. B. zeitaufgelöste Strukturuntersuchungen von Nanopartikeln während katalytischer Reaktionen, um bessere heterogene Katalysatormaterialien zu entwickeln.

Effiziente Produktion, z. B. Präzisionslandwirtschaft durch ultrapräzise Zeitmessung und GPS-Anwendungen, synchronisierte/ parallelisierte Produktionsprozesse.

Zum zweiten Fokus Chronobiologie: Wenn die deutsche Forschung im dynamischen Zukunftsfeld Chronobiologie eine führende Stellung einnehmen und behalten möchte, dann ist einerseits die institutionelle Förderung gefragt (Ausbau der Forschung an einigen Universitäten bzw. Forschungseinrichtungen). Andererseits ist aber auch die Förderung klinischer Studien bzw. translationaler Forschung in gezielten Projekten angebracht, um die gerade jetzt und in den nächsten Jahren erwarteten Ergebnisse der Grundlagenforschung möglichst rasch in Anwendungen (von Chronopharmazie bis Sicherheit) umzusetzen. Dazu sind viele unterschiedliche Akteure einzubeziehen. Langfristig werden die Erkenntnisse der Chronobiologie jedoch auch den (gesellschaftlichen) Umgang mit der Zeit verändern. Dies ist das eindeutige Ergebnis der Themeninseldiskussion auf der Abschlusstagung im Juni 2009.

In der Chronobiologie hat sich international eine solche Dynamik ergeben, dass überlegt werden sollte, die wenigen Akteure in Deutschland auch institutionell zu verstärken. Klinische Studien auch finanziell zu fördern, z. B. in einem Programm zur Erforschung des Zusammenhangs von Zeit (Chronobiologie) und dem Stoffwechsel des Menschen, wäre gut angelegtes Geld, weil sich hier viele Anwendungen ergeben können. Ganz oben auf der Wunschliste der Chronobiologen steht entsprechend zum einen mehr Personal, insbesondere solches, das selbst gegen die eigene biologische Uhr zu arbeiten bereit ist, um **klinische Studien** durchzuführen. Zum anderen wird die praktische medizintechnische Unterstützung durch die Mikrosystemtechnik gewünscht, die nicht nur Möglichkeiten zur Verabreichung von »Targeted Drugs« eröffnet, sondern auch neue Arten von Zeitgebern bereitstellt.



Dazu sind viele unterschiedliche Akteure einzubeziehen. Von einem integrierenden strategischen Dialog, der dabei hilft, eine strategische Ausrichtung zu finden und die Akteure zu interessieren, würde die Zeitforschung sicherlich vorangebracht werden. Vom Zukunftsfeld würde die Industrie profitieren – besonders jedoch könnte die Lebensqualität der Menschen gesteigert werden.

Themenkoordination:

Dr. Kerstin Cuhls, ISI (kerstin.cuhls@isi.fraunhofer.de) und

Dr. Axel Thielmann, ISI (axel.thielmann@isi.fraunhofer.de)



9 Zukunftsfähige Energielösungen

Die Forschung zu Bereitstellung und effizienter Nutzung von Energie wird in Deutschland mit hoher Priorität betrieben.

Im Rahmen des BMBF-Foresight wurden zwei Ansatzpunkte benannt, die noch über die aktuell bestehenden Aktivitäten hinausweisen:

1. methodisch unterstützte Langfristkoordination der energierelevanten Beiträge aus verschiedenen nicht unmittelbar mit Energie befassten Forschungsfeldern (Energiekonzert) und
2. Ausloten neuer Pfade für die Nutzung von Mikro-Energie aus der Umgebung zum Betrieb mobiler Geräte (Mikro-Energie aus der Umgebung).

Während (1) »das Energiekonzert« ein Handlungsfeld der Forschungscoordination darstellt und große Energiemengen betrifft, ist bei (2) »Mikro-Energie aus der Umgebung gewinnen« intensive Forschung aus verschiedenen Bereichen gefragt. Mikro-Energie aus der Umgebung zu gewinnen ist kein reines Energiethema: Es handelt sich um so geringe Energiemengen, dass diese für die Energieexperten irrelevant sind und auch im Energiekonzert keine Rolle spielen. Mikro-Energie aus der Umgebung zu gewinnen ist ein Forschungs- und Innovationsthema, das besonders die Mikroelektronik betrifft. Entsprechend ist das Forschungsthema im Zukunftsfeld Informations- und Kommunikationstechnologie aufgekommen.

Im Folgenden werden die beiden Felder vorgestellt.

9.1 Handlungsfeld Energiekonzert

Abgestimmte Forschungsvielfalt für zukunftsfähige Energielandschaften

Vorbemerkung: Das Energiekonzert ist – abgesehen von methodischen Aspekten – kein Forschungsfeld im eigentlichen Sinne, sondern ein Handlungsfeld für die Forschungscoordination. Aufgrund der von allen beteiligten Expertinnen und Experten immer wieder betonten Dringlichkeit der Herausforderung wird es jedoch vom BMBF-Foresight-Prozess als Gebiet für forschungsfeldübergreifende Aktivitäten (Ziel 2) vorgeschlagen und hier zusammen mit den Zukunftsfeldern neuen Zuschnitts dokumentiert.



Ziel des Energiekonzerts ist eine frühzeitige strategische Bündelung von Beiträgen verschiedener Forschungsfelder für die zukunftsfähige Erzeugung und Nutzung von Energie. Dazu schlagen wir eine zukunftsgerichtete strukturierte Beobachtung der Forschungslandschaft vor. Integrierte Szenarioanalysen und ein »Meta-Roadmapping« sollen helfen, Synergien und Inkonsistenzen zu identifizieren, und auf Chancen durch punktuelle strategische Bündelungen hinweisen. Aus unserer Sicht verweisen die Foresight-Ergebnisse auf folgende Felder für einen solchen energiebezogenen »Strategieabgleich«:

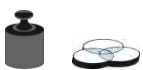
- Materialwissenschaften/ Nanotechnologie/ Elektromobilität
- Energieeffiziente Produktionstechnik/ Bioproduktion
- Intelligentes Haus/ Photonik

Das Feld kann auf aktuellen Aktivitäten des BMBF zur systemorientierten Energieforschung (BMBF 2008: Grundlagenforschung Energie 2020+. S. 20ff) aufsetzen.

9.1.1 Energiekonzert Motivation

Die Sicherung einer bezahlbaren, sicheren und klimaverträglichen Energieversorgung ist eine der zentralen globalen Herausforderungen und damit ein herausragender Zukunftsleitmarkt mit hoher Relevanz für Wirtschaft und Lebensqualität sowie hoher Ausstrahlkraft in zahlreiche Forschungsfelder hinein. Dabei sind zukunftsfähige, abgestimmte Lösungen für Erzeugung, Verteilung und Nutzung gleichermaßen bedeutend. Viele unterschiedliche Forschungsarbeiten außerhalb der unmittelbaren Energieforschung können hier erhebliche Beiträge leisten. Dies bestätigt die Online-Expertenbefragung des BMBF-Foresight-Prozesses eindrucksvoll. In beinahe jedem Zukunftsfeld wurden Forschungsthemen mit Energiebezug als besonders zukunftsrelevant herausgestellt (vgl. Abbildung 20).

Dabei verfolgt jedes Forschungsfeld eine eigene »Roadmap« und hat bestimmte Energielandschaften – d. h. zukünftige Formen der Erzeugung und Nutzung von Energie – im Blick. Solche Energielandschaften sind jedoch ebenfalls in einem dynamischen Wandel begriffen. Sowohl Energienutzung als auch Energieerzeugung verändern sich durch neue technologische und organisatorische Konzepte in Bereichen wie Mobilität, Siedlungsbau, Landwirtschaft, Information und Kommunikation, Produktion sowie nicht zuletzt der Energieerzeugung selbst. Derartige Dynamiken sind für das Innovationsgeschehen charakteristisch und werden in der Regel durch Marktmechanismen und andere gesellschaftliche Selektionsprozesse vermittelt.



<p>Biotechnologie zur Bereitstellung von Energie</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gebiet mit 2. höchster Relevanz im Feld Biotechnologie und Lebenswissenschaften, höchste Relevanz für Wirtschaft, Lebensqualität und Technologie <p>Energie- und Ressourceneffizienz in der industriellen Produktion</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wichtigstes Gebiet und 1. Platz in allen Relevanzkategorien im Feld Industrielle Produktionssysteme <p>Energieverbrauchsoptimierte und energieautarke Produktionsstätten</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2. wichtigste Forschungsaufgabe im Feld Industrielle Produktionssysteme <p>IKT für dezentral organisierte Energieversorgungssysteme hoher Effizienz</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wichtigste Forschungsaufgabe des Feldes Informations- und Kommunikationstechnik <p>Energiegewinnung aus der Umgebung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ausgewählte Zukunftsthemen mit Langfristrelevanz im Feld Informations- und Kommunikationstechnik <p>Ressourcen schonendes rohstoffeffizientes Wirtschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wichtigstes Gebiet im Feld Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung und der gesamten Befragung <p>Energieerzeugung durch Photonik</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wichtigste Forschungsaufgabe des Feldes Optische Technologien <p>Nanomaterialien zur Energieerschließung/-umwandlung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wichtigste Forschungsaufgabe des Feldes Nanotechnologie <p>Neue Dämmmaterialien</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wichtigste Forschungsaufgabe des Feldes Mensch Leben Raum <p>Materialsysteme für eine neue Generation von Energiespeichern und Beschichtungsmaterialien für die kostengünstige Gewinnung solarer Energie</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die zwei wichtigsten Forschungsaufgaben des Feldes Materialien

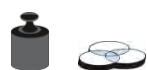
Abbildung 20: Bewertung von Zukunftsthemen mit Energiebezug in der Online-Befragung des BMBF-Foresight-Prozesses (Auszug)

Der Bereich der Energieforschung nimmt jedoch wegen der extremen Langfristigkeit der Innovationszyklen und des hohen übergeordneten gesellschaftlichen Interesses an einer klimaverträglichen und sicheren Energieversorgung eine Sonderstellung ein. Es ist daher aus unserer Sicht notwendig, auch über die direkte Energieforschung hinaus, den Prozess, in dem sich optimale Energieeffizienz-Passungen verschiedener Technologien und Konzepte herauskristallisieren, durch geeignete Maßnahmen zu flankieren, ohne die Vielfalt der Lösungsangebote, die von der Forschung generiert werden, zu beschränken.

9.1.2 Energiekonzert Ansatz

Das Handlungsfeld »Energiekonzert« zielt darauf ab, Potenziale für eine strategische Bündelung verschiedener Akteure der Forschungslandschaft im Hinblick auf zukunftsfähige Energieszenarien frühzeitig zu erschließen.

In einem ersten Schritt erfordert das »Energiekonzert« eine systematische Beobachtung der verschiedenen auf Energieeffizienz gerichteten Forschungsbeiträge und der assoziierten zukünftigen Energielandschaften (»Roadmap-Screening«). In einem zweiten Schritt können die verschiedenen Zielvorstellungen verglichen und verschiedenen denkbaren Umfeldszenarien gegenübergestellt werden. Integrierte soziotechnische Szenarioanalysen und feldübergreifendes »Meta-Roadmapping« können eingesetzt werden, um Synergiepotenziale aufzudecken und Chancen durch punktuelle strategische Bündelung von Forschungsanstrengungen zu identifizieren.



In einem weiteren Schritt ist es denkbar, dass an diesen Stellen flankierende, koordinierende oder gemeinsame Forschungsprojekte über mehrere Technologiefelder hinweg auf den Weg gebracht werden. Ein solcher Prozess könnte durch ein entsprechendes Forschungsprojekt angestoßen werden, müsste dann aber in einem Dialog der beteiligten Disziplinen und Akteure weitergeführt werden, um schließlich in dezidierten Schnittstellenforschungsprojekten zu münden.

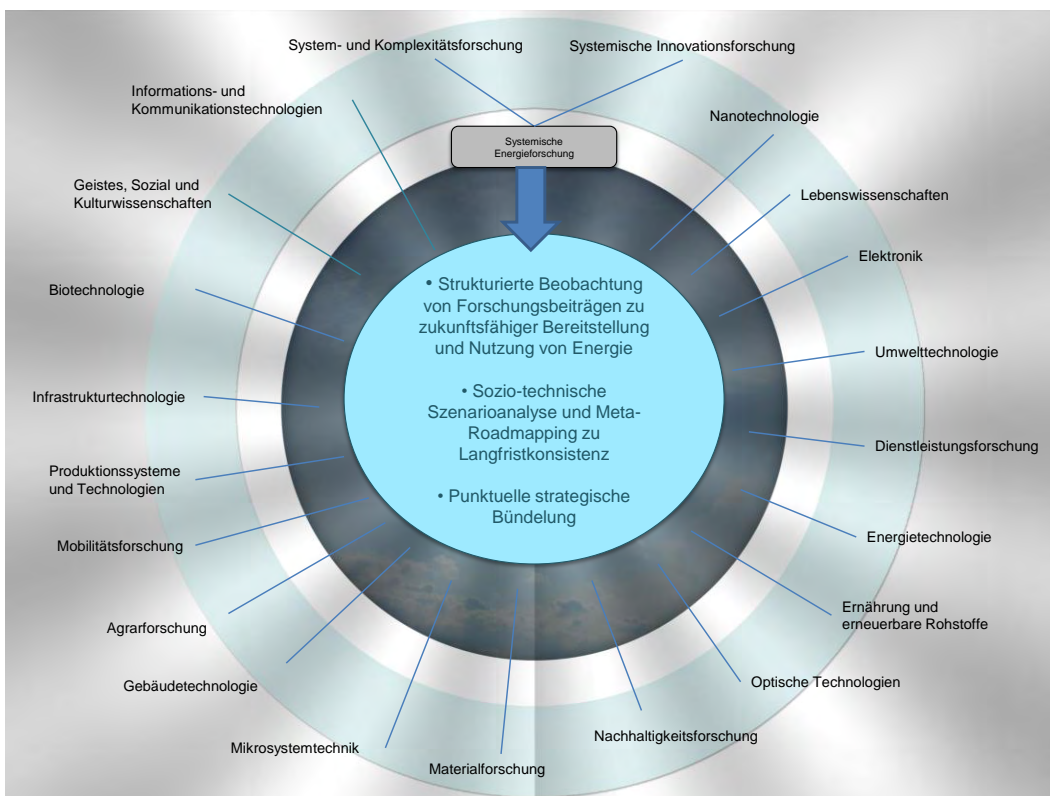


Abbildung 21: Struktur des Energiekonzerts

Das »Energiekonzert« kann an aktuell im BMBF verfolgte Ansätze systemorientierter Forschung aufsetzen (BMBF 2008: Grundlagenforschung Energie 2020+, S. 20ff). Integrierte Forschungsinitiativen wie die »energieeffiziente Stadt« weisen in die hier aufgezeigte Richtung. Das Energiekonzert umfasst jedoch einen erweiterten Beobachtungsradius und greift die Beiträge der einzelnen Forschungsfelder schon in einem Frühstadium auf (vgl. Abbildung 21). Des Weiteren können Instrumente wie qualitative und quantitative Szenarioanalysen maßgebliche Beiträge zur Koordination der Langfristperspektiven leisten.



9.1.3 Potenzielle Akteure im Energiekonzert

Für das Energiekonzert sind **alle** Forschungs- und Innovationsfelder potenziell relevant. Dabei sind gezielt Akteure aus Forschungspolitik und Forschungseinrichtungen einzubeziehen, die mit strategischer Langfristausrichtung ihres Bereiches befasst sind, etwa im Rahmen von Aktivitäten wie der Innovationsallianz »Lithium Ionen Batterie LIB 2015«, dem Förderprogramm »Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft – WING« und der Förderinitiative »Solar-energietechnik der nächsten Generation«. Eine umfassende Identifikation der relevanten Aktivitäten und Akteure für die Orchestrierung des Energiekonzerts wäre die erste Aufgabe des Handlungsfeldes.

9.2 Forschungsfeld Mikro-Energie aus der Umgebung gewinnen

Wir benutzen täglich bewusst oder unbewusst eine Vielzahl unterschiedlicher Geräte, die Energie benötigen. Die Geräte selbst werden immer kleiner (Miniaturisierung) und in Systeme integriert, einige – in Form von Implantaten – sogar in den Menschen. Immer mehr dieser Anwendungen sollen autonom, dezentral oder mobil ablaufen, ohne Stromnetz und möglichst auch ohne Batterien. Die Nutzung von Mikro-Energie direkt aus der Umgebung ist daher in vielen Fällen Voraussetzung für neuartige Anwendungen und dezentrale Systeme.

Beispiele hierfür können eine dauerhafte Stromversorgung von Herzschrittmachern sein, die permanente mobile Messung und Übertragung von Körperfunktionen wie Herzfrequenz und Blutdruck, autonome verteilte Sensorsysteme mit Monitoring-Funktionen etc. Die Innovationspotenziale für mobile Geräte, die wenig Energie benötigen, sind noch lange nicht ausgereizt und scheinen eine wesentliche Voraussetzung für Entwicklungen wie das »Internet der Dinge« oder »Ambient Intelligence« zu sein.

Die Technologien zur Nutzung von »Energiequellen« wie mechanische Energie aus Schwingungen oder Luftbewegungen, thermische Energie aus Abwärme, Reibungswärme oder Körperwärme, Einstrahlung von Sonnen- oder Kunstlicht, elektromagnetische Energie von Transformatoren oder Energie aus chemischen und biologischen Prozessen können als »Enabler« für innovative Mikroelektronik-Anwendungen dienen, die sonst überhaupt nicht möglich erscheinen. Wie dies geschehen kann und in welchen Fällen es ökonomisch und ökologisch sinnvoll ist, bleibt zu erforschen. Zudem erfordert die Nutzung derartiger Mikro-Energiequellen entsprechende Anwendungen, die mit geringen Energiemengen überhaupt arbeiten können.



9.2.1 Warum Mikro-Energie?

Der allgemeine wissenschaftlich-technische Fortschritt führt zur Entwicklung und Verbreitung von immer neuen technischen Anwendungen, die bestehende Geräte ersetzen, ergänzen oder aber völlig neue Einsatzgebiete erschließen. Der Fortschritt ist u. a. durch zwei zentrale und miteinander verbundene Trends gekennzeichnet: die Miniaturisierung und die zunehmende Integration von Funktionen. Auf diese Weise ist es möglich, immer neue Gegenstände in den Rang von »intelligenten Produkten« zu heben: Viele dieser Produkte können ihre Umwelt in ausgewählten Parametern erkennen und in Grenzen (eigenständig) auf Änderungen reagieren (acatech 2009a). Zudem agieren verschiedene Geräte zunehmend im Verbund und kommunizieren miteinander, um sich aufeinander abzustimmen; dies geht weit über »klassische« IKT-Anwendungen hinaus und betrifft auch reguläre Alltagsgegenstände.

All diese Prozesse benötigen Energie, im Regelfall elektrischen Strom. Die bestehenden Versorgungskonzepte für die genannten Anwendungen gehen gegenwärtig davon aus, dass entweder ein Zugang zum Stromnetz besteht oder aber leistungsfähige Energiespeicher (Primärbatterien, Akkus) zur Verfügung stehen. Trotz vergleichsweise hoher Leistungsdichten sind die bestehenden Lösungen im Hinblick auf Verfügbarkeit und Standzeit oftmals unbefriedigend und/ oder teuer.

Die fortschreitende Technisierung der Umwelt und die gleichzeitige Notwendigkeit dauerhafter und mobiler Verfügbarkeit von Energie auch außerhalb entsprechender Infrastrukturen macht es daher erforderlich, neuartige Konzepte der Energieversorgung zu entwickeln. Die hier angesprochenen Technologien und Innovationen können nur eine kleine Lücke füllen. Innerhalb eines Energiekonzerts würde dieses Zukunftsfeld »verschwinden«, weil es nicht von der Energiemenge, sondern von den Anforderungen her gedacht wird. Entstanden ist das anfänglich nur als kleines »Zukunftsthema« angesehene Feld in den Informations- und Kommunikationstechnologien. Es kann – wenn kreativ weiter verfolgt – jedoch große Auswirkungen haben und bekommt damit den Charakter eines »Zukunftsfeldes«.

Zur Anwendung können eine Vielzahl von »Energiequellen« wie die oben schon erwähnte mechanische Energie aus Schwingungen oder Luftbewegungen, thermische Energie aus Abwärme, Reibungswärme oder Körperwärme, Strahlung von Sonnen- oder Kunstlicht, elektromagnetische Energie von Transformatoren oder Energie aus chemischen und biologischen Prozessen kommen. Hiermit werden Energiemengen bereitgestellt, die etwa denen von Knopfzellen-Batterien entsprechen, aber nicht ausgetauscht werden müssen. Entsprechend können ihre Stromentstehungskosten pro Kilowattstunde im drei- bis vierstelligen Eurobereich liegen. Hierfür werden überwiegend neue Materialkombinati-



onen benötigt, um neue Anwendungen im Mikroelektronikbereich zu ermöglichen. Neben diesen vielfältigen Arten von Energiewandlern benötigt ein solches Energieversorgungssystem auch Speicher und Managementsysteme, um jederzeit die erforderliche Energiemenge in der erforderlichen Stromstärke, Spannung und Frequenz zur Verfügung stellen zu können.

9.2.2 Ausgangssituation im Zukunftsfeld heute (2009)

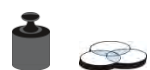
Für die Nutzung von Mikro-Energie aus der Umgebung stehen verschiedene und auch schon in der Praxis erprobte Technologien zur Verfügung, die hinsichtlich ihrer Energiebilanz und Effizienz für jede Anwendung jeweils eigenständig betrachtet werden müssen:

- photovoltaische Generatoren, bei denen die direkte photovoltaische Energiewandlung auf Basis verschiedener Solarzell-Prinzipien erfolgt,
- piezoelektrische Generatoren, die mittels spezieller Piezokristalle mechanische in elektrische Energie umwandeln,
- thermoelektrische Generatoren, die elektrische Spannung durch Temperaturunterschiede bei zwei verschiedenen Metallen erzeugen (Seebeck-Effekt),
- elektromagnetische Generatoren, bei denen die elektromagnetische Energiewandlung nach dem bekannten Dynamoprinzip erfolgt,
- kapazitive und elektrostatische Generatoren nutzen kapazitative oder elektrostatische Ladungen in einem elektrischen Feld zur Elektrizitätsgewinnung,
- Mikro-Brennstoffzellen (Energiewandler, die einen spezifischen Energieträger wie Wasserstoff, Methanol oder Glukose benötigen) und
- thermomechanische Generatoren, die im Unterschied zu thermoelektrischen Generatoren mechanische Zwischenenergie erzeugen, die über einen weiteren Wandlungsschritt in elektrische Energie überführt werden muss.

Die meisten Studien und Veranstaltung laufen unter der Überschrift des »Energy Harvesting« (z. B. Bartsch et al. 2007; Chalasani/ Conrad 2008; Fleischhauer et al. 2007; Studie von Frost & Sullivan 2007; Kloub et al. 2008; König 2009; Maurath et al. 2008; Müller et al. 2009 und 2008; Paradiso/ Starner 2005; Spreemann/ Becker 2008; Spreemann et al. 2006; Ugan/ Reindl 2008).

Erfolg versprechende Forschungsarbeiten laufen gegenwärtig auf dem Gebiet mikromechanischer Systeme, bei denen über eine piezoelektrische⁷⁴ Schicht

⁷⁴ Bei piezoelektrischen Materialien bewirkt Verformung eine elektrischen Spannung (und umgekehrt).



Vibrationsenergie in elektrische Energie umgewandelt wird. Anwendbar sind solche Systeme beispielsweise als Energieversorgung für Sensoren in Flugzeugen, Fahrzeugen oder vibrierenden Industrieanlagen. Diese piezoelektrischen Systeme liefern bis zu $60 \mu\text{W}$ und sind damit in der Lage, einfache Sensoren in Fahrzeugen, wie z. B. Reifendrucksensoren im Auto, mit Energie zu versorgen. In der weiteren Entwicklung kommt es darauf an, neue piezoelektrische Materialien zu finden, die bei den im Einzelfall vorliegenden Schwingungsfrequenzen und Beschleunigungen die erforderlichen Strom- und Spannungsparameter liefern.

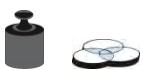
Weitere aussichtsreiche Arbeiten erfolgen im Bereich der Thermoelektrik (siehe auch König 2009), bei der mittels des Seebeck-Effekts Strom aus Temperaturdifferenzen erzeugt wird. Große Aufmerksamkeit findet derzeit der so genannte ZT-Wert, der die Effizienz von thermoelektrischen Materialien beschreibt (Umwandlung von Wärme in Strom). In den letzten 15 Jahren konnte der ZT-Wert von 1 auf 2,4 verbessert werden. Weitere Verbesserungen werden erwartet. Allerdings ist die Effizienz des Materials nicht allein ausschlaggebend für den Wirkungsgrad eines thermoelektrischen Generators. Ebenso wichtig ist der Temperaturbereich, in dem der ZT-Wert sein Maximum erreicht. Ein Fortschritt für die Thermoelektrik wäre es daher, ein Material zu entwickeln, welches über einen großen Temperaturbereich seinen ZT-Wert konstant hält, auch wenn er nur relativ gering ist. Aktuell sind circa 30 verschiedene Materialien im Gespräch, die thermoelektrisch interessant sind. Aus dieser Menge sollen einige wenige Materialien ausgewählt und deren Entwicklung dann intensiv betrieben werden. Ein weiteres Forschungsziel muss aus Sicht von Experten und Themenkoordinatoren die Senkung des Modulpreises sein, der heute aufgrund der Materialkosten, vor allem aber aufgrund der hohen Fertigungskosten in Verbindung mit den geringen Wirkungsgraden der Stromerzeugung viele Anwendungen noch unwirtschaftlich macht.

Im Bereich der Photovoltaik konzentrieren sich die Forschungsarbeiten zum einen auf hohe Wirkungsgrade und zum anderen auf niedrige Herstellkosten. Von beiden Entwicklungen kann die Mikro-Energiegewinnung direkt profitieren. Ähnlich sieht es bei den Brennstoffzellen aus, die jedoch noch auf den technologischen Durchbruch warten.

Fortschritte zeichnen sich auch bei der Speicherung und dem Energiemanagement der Systeme ab, ohne die eine Energiegewinnung aus der Umgebung nicht praktisch nutzbar ist.

9.2.3 Langfristperspektive des Zukunftsfeldes

In der Vergangenheit wurden Energiethemen vor allem unter dem Gesichtspunkt der Stromerzeugung in energiewirtschaftlich relevanten Dimensionen be-



trachtet, weniger unter dem Aspekt der Mikro-Stromversorgung. Gegenwärtig sind die technischen Probleme noch deutlich zu groß und die Energieträgerpreise deutlich zu niedrig, als dass von Seiten der Stromversorger ein Interesse an dem Thema bestehen würde.

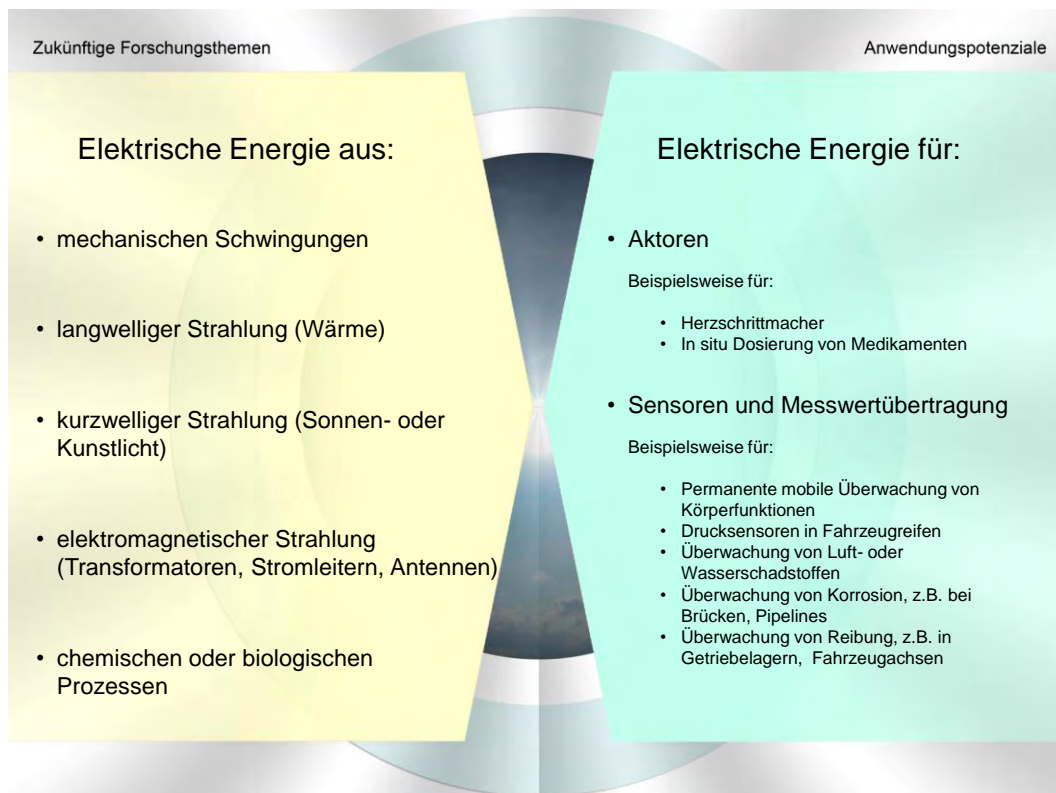


Abbildung 22: Zukünftige Forschungsthemen und Anwendungspotenziale im Zukunftsfeld »Mikro-Energie aus der Umgebung«

Aus wirtschaftlichem Interesse verfolgt die Automobilindustrie das Thema der thermoelektrischen Stromerzeugung, da die Nutzung der Wärme der Motorabgase zur Bordstromversorgung die »Lichtmaschine« mit ihrem schlechten Systemwirkungsgrad ersetzen und etwa 1 Liter Treibstoff pro 100 km und entsprechend CO₂-Emissionen einsparen könnte. Sollten die Entwicklungen in Richtung Elektroantrieb erfolgreich werden, entfielen die PKW-Industrie als möglicher Treiber. Bei hohen Treibstoffpreisen oder strengen CO₂-Grenzwerten könnte diese Technik jedoch für LKWs und Schiffe interessant werden. Allerdings treibt die Industrie bisher nicht die Materialentwicklung voran, sondern setzt überwiegend auf klassische Materialkombinationen.

Der Einsatz zur Stromversorgung von Mobiltelefonen, MP3-Playern (später: MP5-Playern) oder gar Laptops dürfte aus physikalischen, aber auch betriebswirtschaftlichen Gründen nur auf lange Frist möglich sein. Eine solche Perspek-

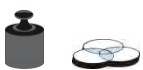


tive ist nur dann realistisch, wenn die Geräte wesentlich weniger Energie verbrauchen als heute. Interessante Massenmärkte könnten neben der oben bereits genannten Stromversorgung von Sensoren beim Ersatz von Batterien in der Medizintechnik liegen, wie z. B. bei Herz- oder Hirnschrittmachern, bei denen ein Austausch bisher mit einer Operation verbunden ist.

Die Hauptnachfrage nach Mikro-Energie aus der Umgebung kommt aus mikro-systemtechnischen Anwendungen. Während zentrale Fragen der Fertigung und Systemintegration dort gelöst sind, stellt die Energieversorgung dezentraler und verteilter Mikrosysteme beim heutigen Stand der Technik ein weitgehend ungelöstes Problem dar.

Der Forschungsbedarf zur Realisierung eines »Micro Energy Harvesting« ist vielfach stark interdisziplinär und bisher in seiner gesamten Dimension und Vernetzung kaum erfasst. Das »Kraftwerk im Mikrosystem« muss nicht nur Energie liefern. Es muss zusätzlich spezifischen und vielfältigen Gegebenheiten des verteilten Systems genügen. Eine dem Applikationsort angepasste Größe und Funktion des Energiewandlers, eine hohe Konversionseffizienz, vollständige Wartungsfreiheit und die möglichst direkte Umsetzung in die gewünschte Energieform sind weitere Forderungen, die zu erfüllen sind. Die unterschiedlichen Zeitprofile von Energiewandlung und -verbrauch verlangen den Einsatz effizienter Zwischenspeicher. Elektrische Wandlungsmechanismen erzeugen häufig Spannungs- und Stromniveaus, die nicht mit den entsprechenden Niveaus des Verbrauchers harmonieren. Dies erfordert bisher kaum vorhandene elektronische Wandler, die eine optimale Energietransformation zwischen Quelle und Last durchführen. Nicht zuletzt besteht Bedarf nach möglichst einfachen und kostengünstigen Methoden zur Fertigung und Systemintegration von Mikrosystem und »Energy Harvesting«.

Als Konkurrenztechnologie für die Mikro-Stromerzeugung könnte sich für einige Anwendungen relativ schnell die Elektrizitätsübertragung mittels elektromagnetischer Resonanz durchsetzen, wie sie zurzeit am MIT entwickelt wird und erste kommerzielle Anwendungen in den nächsten Jahren erwarten lässt. Während die hierbei entstehende elektromagnetische Strahlung bei Anwendungen im Bereich von einigen Watt Leistung noch Probleme bereitet, dürfte sie im Milli- und Mikrowattbereich vernachlässigbar sein.



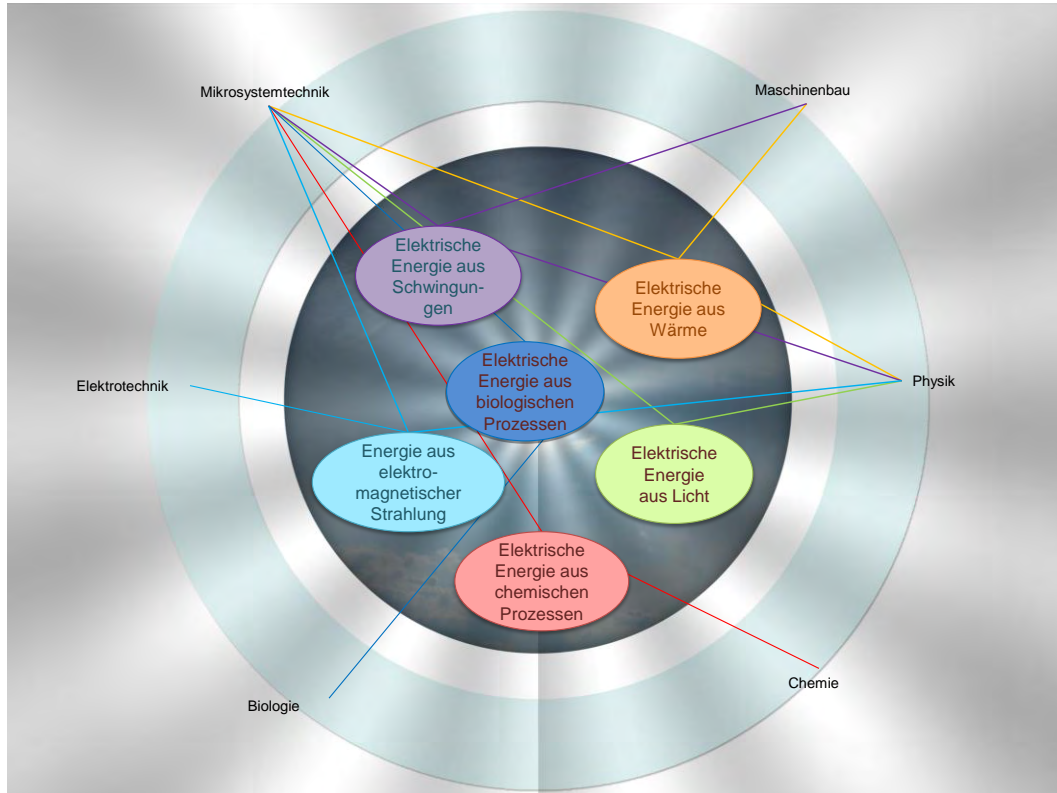


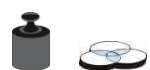
Abbildung 23: Zukünftig beteiligte Forschungsrichtungen

9.2.4 Warum ist das Zukunftsfeld relevant?

Mikro-Stromerzeugung wird auch weiterhin ein relevantes Grundlagen-Forschungsthema bleiben, ihre kommerziellen Anwendungsfelder könnten zu ganz neuen Mikrosystemtechnik-Anwendungen führen.

Wenn ein »Internet der Dinge« realisiert wird und auch »Ambient Intelligence« in den Haushalten Einzug hält, werden viele Geräte über Mikro-Energie gesteuert werden müssen, weil keine direkten Stromzugänge möglich sind. Dann wird entweder eine drahtlose Stromübertragung ohne negative Auswirkungen notwendig werden oder die direkte Nutzung der Energie aus der Umgebung.

Bei Implantaten, insbesondere lebensnotwendigen wie Herzschrittmachern, würde sich eine gesteigerte Lebensqualität ergeben, denn Operationen zum Wechsel der Batterien würden unnötig. Viele andere Anwendungen wie Sensoren, Messgeräte vor Ort, Ampelschaltungen, mobile elektronische Geräte wären einfach nur »praktisch« – und würden, wenn technisch lösbar, ihren Markt finden.



9.2.5 Akteure im Innovationssystem heute

Die Forschung für die Mikro-Energiegewinnung aus der Umgebung erfordert einen ausgeprägten interdisziplinären und systemischen Ansatz. Beispiel für die erforderliche stark vernetzte Zusammenarbeit scheint das »Center for Energy Harvesting Materials and Systems« (CEHMS) zu sein, welches auf allen Gebieten der Mikroenergietechnik forscht. Es ist eine Kooperation von 14 Instituten der Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, der Clemson University, Clemson S.C. sowie der University of Texas, Dallas. Darüber hinaus kooperiert es mit dem »Center for Intelligent Material Systems and Structures« (CIMSS) und dem »Center for Embedded Systems for Critical Applications« (CESCA).

Einen ähnlich breiten Ansatz verfolgt das Graduiertenkolleg »Micro Energy Harvesting«, das vom Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) sowie vom Freiburger Materialforschungszentrum (FMF), beides Einrichtungen der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, getragen wird. Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (FhG-ISE) ist assoziierter Partner des Graduiertenkollegs. Modellierung, Design und Optimierung verschiedener Wandlungsmechanismen stellen dort den zentralen Kern der Forschungsarbeiten zum Energy Harvesting dar. Die Materialforschung trägt mit der Entwicklung neuer Werkstoffe zu Wandlungsmechanismen und Speichermethoden bei. Die Anpassung unterschiedlicher Spannungs- und Stromniveaus sowie das effiziente Management der Systemenergie bilden Schwerpunkte der Forschung im Energiemanagement. Forschungen zu Fertigung, Systemintegration und Applikationsbetrachtungen begleiten diese Arbeiten.

Im Bereich der Umwandlung von Schwingungsenergie in Elektrizität forschen mehrere akademische und industrielle Gruppen wie das Imperial College, London, das MIT, Boston, das Georgia Institute of Technology in Atlanta, die University of California, Berkeley, die Southampton University und die University of Singapore.

Auch im Bereich der Thermoelektrik sind zahlreiche Institute und Gruppen aktiv. In Deutschland ist hier das Forschungsprogramm »Nanostrukturierte Thermoelektrika« zu nennen, welches von der Universität Hamburg geleitet wird. Es besteht aus 45 Arbeitsgruppen, die unter anderem Forschung im Bereich der Thermoelektrik betreiben. Sechs Forschungsinstitute und sechs Firmen haben sich zur Deutschen Thermoelektrik Gesellschaft zusammengeschlossen; auch international gibt es eine entsprechende Vereinigung.



9.2.6 Empfehlungen

Getrieben durch die starke Nachfrage nach einer möglichst unbegrenzten und mobilen Energieversorgung für neue Technologien wie RFID, GPS, Mobilfunk, mobiler Unterhaltung sowie Gesundheitssystemen für eine alternde Bevölkerung ist in der Analyse eine deutliche Zunahme in den Forschungsaktivitäten im Bereich des Energy Harvesting festzustellen. Flankiert wird dies durch die Entwicklungen in der Mikrosystemtechnik und der Nanotechnologie, welche beitragen, die notwendigen Voraussetzungen für Fortschritte in der Gewinnung von Mikro-Energie aus der Umgebung zu schaffen.

Die Vielfalt der Umwandlungsprinzipien erschwert zwar die Forschung, bietet aber den Vorteil, für spezielle Anwendungsfälle geeignete Technologien verfügbar zu haben. Daher sollte nach Auffassung der Themenkoordinatoren diese Vielfalt unterstützt werden. Nicht vernachlässigt werden darf die Materialforschung für die Energieumwandlung und -speicherung, sowie die Systemtechnik für das Gesamtsystem einschließlich der Anwendung.

Die im Bereich der Forschung für die Mikro-Energiegewinnung aus der Umgebung tätigen etablierten Institute sollten dieser Einschätzung nach entsprechend gestärkt und neue Forschungsgruppen ermutigt werden. Neben der staatlich finanzierten Grundlagenforschung sollten die Institute Anreize für Kooperationen mit der Industrie für anwendungsorientierte Forschung erhalten.

Angesichts der starken internationalen Aktivitäten ist eine intensivere Förderung der Vernetzung im Bereich der Mikroenergiegewinnung relevanten Forschungsgruppen und -disziplinen sinnvoll, um Deutschlands Position auf dem zukunftssträchtigen Gebiet der Mikrosystemtechnik zu halten und weiter auszubauen. Ein strategischer Dialog bietet sich nach Auffassung der Themenkoordinatoren an, der die sehr unterschiedlichen Akteure zusammenbringt und in kreativer Weise neue Ideen zur Energiegewinnung diskutieren lässt. Danach erst sollten Wege erarbeitet und festgelegt werden, wie diese umzusetzen sind. Dazu könnte ein Programm gehören oder auch ein nationales Netzwerk der Akteure mit klar definierten Innovationsallianzen für einzelne Ansätze.

Themenkoordination:

Dr. Harald Bradke, ISI (harald.bradke@isi.fraunhofer.de),
Dr. Kerstin Cuhls, ISI (kerstin.cuhls@isi.fraunhofer.de) und
Dr. Philine Warnke, ISI (philine.warnke@isi.fraunhofer.de)



Literatur

„profil“ Nr. 21/06 vom 22.05.2006 Seite: 138, Ressort: Wissenschaft.

acatech (2006): Mobilität 2020: Perspektiven für den Verkehr von Morgen. Schwerpunkt Straßen- und Schienenverkehr. acatech berichtet und empfiehlt Nr. 1. acatech – Konvent für Technikwissenschaften der Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V., 2006 Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart.

Acatech (2009a): „Intelligente Objekte – klein, vernetzt, sensitiv“, acatech BEZIEHT POSITION Nr. 5, Berlin Heidelberg, Springer, 2009.

Acatech (2009b): „INTELLIGENTE OBJEKTE, Technische Gestaltung – Wirtschaftliche Verwertung – Gesellschaftliche Wirkung“, acatech DISKUTIERT, Berlin Heidelberg, Springer, 2009.

Acatech FORUM „Intelligente Objekte“, 28.05.2009, Berlin.

Ahlert, G. (1999): [Biogerontology: status and current developments]. In: Z Gerontol.Geriatr, 32 (2), S. 112-123.

Anderton, B. H. (2002): Ageing of the brain. In: Mech.Ageing Dev., 123 (7), S. 811-817.

Angerer, G.; Erdmann, L. et al. (2009): Rohstoffbedarf von Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffverbrauchs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. ISI und IZT 2009.

Angerer, G.; Erdmann, L.; Marscheider-Weidemann, F.; Scharp, M.; Lüllmann, A.; Handke, V.; Marwede, M. (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (= ISI-Schriftenreihe „Innovationspotenziale“).

- Baltes, P. B. (2002): Stellungnahme für den Deutschen Bundestag: Ausschuss für Bildung, Forschung und Technologiefolgenabschätzung Thema: Altersforschung, Max Planck Institut für Bildungsforschung (Hrsg.).
- Bartsch, U.; Bretthauer, C.; Hehn, T.; Mack, B.; Ungan, T.; Manoli, Y.; Paul, O.; Reindl, L.; Reinecke, H.; Wallrabe, U.; Woias, P. (2007): Angewandtes "Micro Energy Harvesting"-Systemkonzept für energieautarke Mikrosysteme, Proc. MikroSystemTechnik-Kongress 2007, 15.-17. Oktober 2007, Dresden, S. 797-800.
- Basset, J. (2009): Innovation in an ageing society - Innovation Policy Workshop # 3, INNO-GRIPS Global Review of Innovation Intelligence and Policy Studies (Hrsg.).
- BBR (2005): Raumordnungsbericht 2005. Bonn: Selbstverlag.
- BBR (2009): Tendenzen der Stadtentwicklung. Internet-Ressource, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), URL:
http://www.bbr.bund.de/cIn_015/nn_115406/BBSR/DE/Fachthemen/Stadtentwicklung/StadtentwicklungDeutschland/Tendenzen/tendenzen__node.html?__nnn=true
- Bengtson, V. L.; Gans, D.; Putney, N. M.; Silverstein, M. (2009): Handbook of Theories of Aging, Second Edition. New York: Springer Publishing Company.
- Bergek, A.; Jacobsson, S.; Carlsson, B.; Lindmark, S.; Rickne, A. (2008): Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis. In: Research Policy, 37 (3), S. 407-429.
- Besold, G.; Kremer, K. (2004): Werkstoffe nach Wunsch?, in: Physik Journal 3 (5), S. 41-47.
- BMBF (2008): Grundlagenforschung Energie 2020+ - Die Förderung der Energieforschung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2008.
- BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2008) (Hrsg.): Die dritte industrielle Revolution – Aufbruch in ein ökologisches Jahrhundert. Berlin.
- BMVBW, BBR (2005): Öffentliche Daseinsvorsorge und demographischer Wandel. Erprobung von Anpassungs- und Entwicklungsstrategien in Modellvorhaben der Raumordnung, Berlin/Bonn.

- Börsch-Supan, A.; SHARE-Project team (2009): SHARE - Survey of Health, Ageing and Retirement in Europe. Online: <http://www.share-project.org/> (Stand: 15.06.2009).
- Braungart, M., McDonough, W., Bollinger, A. (2007): Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions - a strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production* 15 (2007), S. 1337-1348.
- Brosche, T.; Sieber, C. (2003): Biochemische und genetische Prozesse bei der Alterung - Möglichkeiten der Einflussnahme. In: *Aktuel Ernähr Med*, 28, S. 227-230.
- Chalasani, S.; Conrad, J. M. (2008): A survey of energy harvesting sources for embedded systems. In: (Hg.): *Proceedings of Southeastcon 2008*, Huntsville, AL, 3-6 April 2008. New York: IEEE, S. 442 - 447.
- Clausen, J. (2009): „Man, machine and in between“, *Nature* 457 (7233) 2009, S. 1080-1081.
- Coenen, C. (2008): Konvergierende Technologien und Wissenschaften. Der Stand der Debatte und politischen Aktivitäten zu »Converging Technologies«, Hintergrundpapier Nr. 16, TAB.
- Cuhls, K.; von Oertzen, J.; Kimpeler, S. (2007): Zukünftige Informations-technologie für den Gesundheitsbereich. Ergebnisse einer Delphi-Befragung, FAZIT-Schriftenreihe (Hrsg.), Stuttgart.
- Daskala, B.; Maghiros, I. (2006): „Digital Territories“, *IET Conference Publication*, 2, no. 518, S. 221-226.
- de Greef, P./ Zsiros, C. (2008): Ein Wasserplan für Rotterdam, in: *Garten + Landschaft* 11, S.22-25.
- Denley, S.; Bell, D. (2007): Ageaction „Changing Expectations of Life“, Monday 23 April 2007, The Sage Gateshead - Ageaction „Changing Expectations of Life“: The Institute for Ageing and Health, Newcastle University.
- Dinse, H.; Eysel, U. (2003): Leistungssteigerung und Plastizität bis ins hohe Alter. In: *NEUROubin*, S. 17-21.

- EC 2008 - ICT-Information and communication technologies, Work Programme 2009-2010, European Commission 2008.
- Ehlers, W. (2009): Challenges of Porous Media Models in Geo- and Biomechanical Engineering including Electro-Chemically Active Polymers and Gels, in: International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics 1 (2009), S. 1-24, Springer.
- Ernst, G. (2005): Integration von Produkt und Dienstleistung – Hybride Wertschöpfung, DLR-PT des BMBF, Arbeitsgestaltung und Dienstleistungen, Bonn, Februar 2005.
- Gassmann, O.; Reepmeyer, G. (2004): Das Zukunftspotential „Gerontechnologie“. In: Technische Rundschau, 23, S. 50-52.
- Geels, F.W.; Schot, J. (2007): Typology of sociotechnical transition pathways. In: Research Policy, 36 (3), S. 399-417.
- Gesellschaft Deutscher Chemiker (Hrsg.) (2003): Green Chemistry - Nachhaltigkeit in der Chemie von Weinheim Juni 2003.
- Geyer, G. (2008): Altersforschung in Österreich: Entwicklung, Institutionalierungsgrad, Forschungsförderung: Facultas Universitätsverlag.
- Gleich, A. von; Gößling-Reisemann, St. (Hrsg.) (2008): Industrial Ecology - Erfolgreiche Wege zu nachhaltigen Industriesystemen. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Gruss, P. (2007): Die Zukunft des Alterns – Die Antworten der Wissenschaft, Gruss, P. (Hrsg.), München: C.H.Beck.
- Fleischhauer, B.; A. Kloke, S. Rubenwolf, K. Schuh, C. Schlipf, M. Krüger, O. Prucker, H. Reinecke, J. Rühle, F. v. Stetten, R. Zengerle, P. Woias (2007): "Micro Energy Harvesting" durch Mikrobrennstoffzellen, Proc. MikroSystemTechnik-Kongress 2007, 15-17. Oktober 2007, Dresden, S. 349-352.
- Frost & Sullivan (2007): ADVANCES IN ENERGY HARVESTING TECHNOLOGIES. DOC2 www.frost.com.
- Hergersberg, P. (2008): Magnesium simuliert Magnete, in: MaxPlanckForschung, 4, 2008, S. 33-35.

- Hiessl, H.; Toussaint, D.; Dyrbusch, A.; Geisler, S.; Herbst, H.; Prager, J.U. (2005): AKWA 2100: Alternativen der kommunalen Wasserversorgung und Abwasserentsorgung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, (=ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale).
- Huber, J. (2000): Industrielle Ökologie. Konsistenz, Effizienz und Suffizienz in zyklusanalytischer Betrachtung. In: Kreibich, R.; Simonis, U. E. (Hg.): Global Change. - Berlin: Verlag Arno Spitz, 2000. S. 109-126.
- Ionescu T. B.; Piater A., Scheuermann W., Laurien E., Iosup A. (2009): An Aspect-Oriented Approach for Disaster Prevention Simulation Workflows on Supercomputers, Clusters, and Grids, Proceedings of the 13th IEEE/ACM Symposium on Distributed Simulation and Real-Time Applications - ISBN 978-0-7695-3868-6, ISSN 1550-6525 13 (2009), 21-30, IEEE Computer Society.
- Jesse, K. (2005): Femtosekundenlaser. Einführung in die Technologie der ultrakurzen Lichtimpulse, Springer: Heidelberg, New York, Berlin.
- Juengst, E. T.; Binstock, R. H.; Mehlman, M.; Post, S. G.; Whitehouse, P. (2003): Biogerontology, „anti-aging medicine“, and the challenges of human enhancement. In: Hastings Cent.Rep, 33 (4), S. 21-30.
- Kapteyn et al. (2007): Review: Harnessing Attosecond Science in the Quest for Coherent X-rays. Science 10. August 2007, 317 (5839), S. 775 – 778.
- Kelner, K. L. (2008): Physiology: Tick Tock Liver Clock. The Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A. 105, 15172.
- Kienberger, R.; Krausz, F. (2009): Elektronenjagd mit mit Attosekundenblitzen. SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, Februar 2009.
- Kindsmüller, M. C.; Leuchter, S.; Schulze-Kissing, D.; Urbas, L. (2004): Modellierung und Simulation menschlichen Verhaltens als Methode der Mensch-Maschine-System-Forschung, in MMI-Interaktiv, Nr. 7, Juni 2004, ISSN 1439-7854.

- Kloub, H.; Hoffmann, D.; Folkmer, B.; Manoli, Y. (2008): Capacitive Energy Harvesters, Proc. VDE/VDI 5. GMM-Workshop "Energieautarke Sensorik", November 12-13, 2008, Düsseldorf, Germany.
- Knell, S.; Weber, M. (2009): Länger leben?, Frankfurt am Main: suhrkamp taschenbuch wissenschaft.
- König, J. (2009): Studie zur Energietechnologie „Thermoelektrik“. Fraunhofer IPM.
- Koziol, M., Walther, J. (2006): Ökonomische Schwellenwerte bei der Rücknahme von technischer Infrastruktur in der Stadt, in: Informationen zur Raumentwicklung 5, S.259-269.
- Kruse, A. (2007): Was stimmt? Alter. Die wichtigsten Antworten., Freiburg/Basel/Wien: Herder.
- Lehr, U. (2007): Psychologie des Alterns, Quelle & Meyer Verlag, Wiesbaden 2007.
- Leist, H.-J. (2007): Wasserversorgung in Deutschland. Kritik und Lösungsansätze, oekom Verlag, München (=Hochschulschriften zur Nachhaltigkeit; HSN 35).
- Lemmer, B. (2007): Chronopharmacology of cardiovascular medications. In: Biological Rhythm Research, 38(3), S. 247-258.
- Liedtke, C.; Kuhndt, M. (2009): ProduzierenKonsumieren2.0 -Systemischer Wandel für zukunftsfähige Wertschöpfungsformen. Zentrale Forschungsfragen aus Sicht der Forschungsgruppe Nachhaltiges Produzieren und Konsumieren des Wuppertal Instituts. Gutachten im Auftrag des Fraunhofer ISI.
- Lucke, J. C.; Hall, W. (2005): Who wants to live forever? In: EMBO Rep, 6 (2), S. 98-102.
- Luther et al. (2004): Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt. VDI Technologiezentrum (Hrsg.). Zukünftige Technologien Nr. 53. September 2004. Düsseldorf.
- m4d (2009): mobility for development, World Business Council for Sustainable Development 2009.

- Mainzer, K. (2007): *Thinking in Complexity: The Computational Dynamics of Matter, Mind, and Mankind*. 5. edition, Springer, Berlin [u. a].
- Mainzer, K. (2009): alpha-Forum, Interview mit Prof. Dr. Klaus Mainzer, 09.01.2009, 20:15, Auf den Seiten von www.br-online.de
- Maurath, D.; Peters, C.; Hehn, T.; Lotze, N.; Mohamed, S.; Mintenbeck, D.; Becker, P.; Manoli, Y. (2008): *Low-Power Electronics in Autonomous Systems*, Proc. VDE/VDI 5. GMM-Workshop "Energieautarke Sensorik", November 12-13, 2008, Düsseldorf, Germany.
- Marx, D.; Hutter, J. (2009): *Ab Initio Molecular Dynamics, Basic Theory and Advanced Methods*. Cambridge University Press, Cambridge UK.
- Medvedev, Z. A. (1990): An attempt at a rational classification of theories of ageing. In: *Biol Rev Camb.Philos.Soc*, 65 (3), S. 375-398.
- Müller, M. et al. (2009): *Micro Energy Harvesting: Stand der Technik in Industrie und Wissenschaft*, in: ders. (Hg.): *Ambient Assisted Living: Tagungsband des 2. Deutscher Kongress mit Ausstellung, Technologie – Anwendungen – Management*, 27.-28. Januar 2009, Berlin. Berlin, Offenbach: VDE Verlag
- Müller, M.; Freunek, M.; Ungan, T.; Reindl, L. M. (2009): *Micro Energy Harvesting: Stand der Technik in Industrie und Wissenschaft*, Proc. Ambient Assisted Living Kongress, 27.-28. Januar 2009, Berlin.
- Müller, M.; Freunek, M.; Reindl, L. M. (2008): *Energy Harvesting im Ambient Assisted Living Sector*, Proc. Ambient Assisted Living Kongress, 30. January – 1. Februar 2008, Berlin, S. 209-214.
- Neue Zürcher Zeitung 17.10.2007, Nr. 241, S. 65.
- NISTEP (= National Institute of Science and Technology Policy) (ed.) (2005a): *Science and Technology Foresight Center, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT): Kagakugijutsu no chûchôki hatten ni kakawaru fukanteki yosoku chôsa (The 8th Science and Technology Foresight Survey – Future Science and Technology in Japan, Delphi Report) Report no. 97, Tôkyô: NISTEP (Japanisch)*.

NISTEP (= National Institute of Science and Technology Policy) (ed.) (2005b): Science and Technology Foresight Center, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT): Kyûsoku ni hattenshitsu aru kenkyû ryûiki chôsa (The 8th Science and Technology Foresight Survey – Study on Rapidly-developing Research Area) Report no. 95, Tôkyô: NISTEP (Japanisch).

NISTEP (= National Institute of Science and Technology Policy) (ed.) (2005c): Science and Technology Foresight Center, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT): Kagakugijutsu no chûchôki hatten ni kakawaru fukanteki yosoku chôsa (The 8th Science and Technology Foresight Survey, Needs Survey) Report no. 94, Tôkyô: NISTEP (Japanisch).

NISTEP (= National Institute of Science and Technology Policy) (ed.) (2005d): Science and Technology Foresight Center, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT): Kagakugijutsu no chûchôki hatten ni kakawaru fukanteki yosoku chôsa (The 8th Science and Technology Foresight Survey – Scenarios) Report no. 96, Tôkyô: NISTEP (Japanisch).

NISTEP (= National Institute of Science and Technology Policy) (ed.) (2005e): Science and Technology Foresight Center, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT): The 8th Science and Technology Foresight Survey – Delphi Analysis, Report no. 97, Tôkyô: NISTEP (English).

NISTEP (= National Institute of Science and Technology Policy) (ed.) (2005f): Science and Technology Foresight Center, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT): Comprehensive Analysis of Science and Technology Benchmarking and Foresight, Report no. 99, Tôkyô: NISTEP (English).

Nordmann, A., Schummer, J., Schwarz, A. (Hg.) (2006): Nanotechnologien im Kontext. Philosophische, ethische und gesellschaftliche Perspektiven. Berlin.
www.zit.tu-darmstadt.de/cipp/tudzit/custom/pub/content,lang,1/oid,959/ticket,guest

Olshansky, S. J.; Hayflick, L.; Carnes, B. A. (2002): No Truth to the Fountain of Youth. In: *Sci.Aging Knowl. Environ.*, 27, S. 92-95.

- Opaschowski, H. W. (2009): Vision Deutschland“. Neue Wege in die Welt von morgen. In: Forschung aktuell, 30 (215), S. 1-7.
- Oswald, W. D.; Lehr, U.; Sieber, C.; Kornhuber, J. (Hrsg.) (2006): Gerontologie. Medizinische, psychologische und sozialwissenschaftliche Grundbegriffe. Stuttgart: Kohlhammer.
- Overbeck, G.; Sommerfeldt, P.; Köhler, S.; Birkmann, J. (2009): Klimawandel und Regionalplanung. Ergebnisse einer Umfrage des ARL-Arbeitskreises „Klimawandel und Raumplanung“. Raumforschung und Raumordnung – RuR 2/09: 193-203.
- Paradiso, J. A.; Starner, T. E (2005): Energy scavenging for mobile and wireless electronics. in: IEEE Pervasive Computing 4/1 (2005), S. 18-27.
- Peik, E.; Sterr, U. (2008): Optische Uhren. Zeitmessung mit kalten Atomen und Laserlicht. In: Physik in unserer Zeit, 6/2008 (39), Weinheim.
- Reichwald, R.; Piller, F. (2006): Interaktive Wertschöpfung : Open Innovation, Individualisierung und neue Formen der Arbeitsteilung, Wiesbaden: Gabler.
- Reidenbach, M.; Henckel, D.; Meyer, U.; Preuß, T.; Riedel, D. (2005): Neue Baugebiete: Gewinn oder Verlust für die Gemeindekasse? Fiskalische Wirkungsanalyse von Wohn- und Gewerbegebieten. Bd. 3 der Edition Difu – Stadt Forschung, Deutsches Institut für Urbanistik (difu).
- Reinhart, G.; Effert, C.; Grunwald, S.; Piller, F.; Wagner, W. (2000): Minifabriken für die marktnahe Produktion. ZWF 95 (2000) 12, S. 597-600.
- Reinhart, G.; Effert, C.; Grunwald, S.; Piller, F.; Wagner, W. (2000): Minifabriken für die marktnahe Produktion. ZWF 95 (2000) 12, S. 597-600.
- Rieber, D. K. (2005): Erkenntnisse der Altersforschung - Sind unsere derzeitigen Altersgrenzen mit den Forschungsergebnissen der Gerontologie vereinbar?: Universität Konstanz Fachbereich Rechtswissenschaften.
- Rogers, M. W. (2003a): Nano-, Bio-, Info-, Cogno- Converging to new genre of technologies and products In: Foresighting Europe 2, ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/foresight/docs/for_newsletter2.pdf, S. 2-4.

- Rollwagen, I. (2008): Zeit und Innovation. Zur Synchronisation von Wirtschaft, Wissenschaft und Politik bei der Genese der Virtual-Reality-Technologien, transcript, Bielefeld.
- Roloff, N.; Beckert, B. (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).
- Rotmans, J., Kemp, R. (2005): The Management of the Co-Evolution of Technical, Environmental and Social Systems, in: Weber, M. and Hemmelskamp, J. (eds.): Towards Environmental Innovation Systems, Berlin: Springer, S. 33-56.
- Saage, R. (2006): Konvergenztechnologische Visionen und der klassische Utopiediskurs. In: Nordmann et al. 2006, S. 179-194
- Saage, R. (2007): Politik und Konvergenztechnologien in den USA. In: Leviathan 35/4, S. 540–559
- 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>
- Schellnhuber, H. J.; Pietsch, J. (2008): Nachhaltige Revolutionäre gesucht. In BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2008 (Hrsg.): Die dritte industrielle Revolution – Aufbruch in ein ökologisches Jahrhundert. Berlin. S. 77-79.
- Schiller, G.; Gutsche, J.-M.; Siedentop, S. (2009): Von der Außen- zur Innenentwicklung in Städten und Gemeinden. Das Kostenparadoxon der Baulandentwicklung, Umweltbundesamt (= Texte 31/2009).
- Schinarakis, K. (2008): Supercomputing – Höchstleistung für die Forschung, Jülich Forschungszentrum.
- Schmidt-Bleek, F. (1993): „Wieviel Umwelt Braucht Der Mensch? MIPS – Das Mass für ökologisches Wirtschaften“, Basel/Boston/Berlin 1993.

- Siedentop, S.; Koziol, M.; Walther, J.; Gutsche, J.-M. (2006): Siedlungsentwicklung und Infrastrukturfolgekosten – Bilanzierung und Strategieentwicklung. Internet-Ressource, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), URL: http://www.bbr.bund.de/cIn_015/nn_21840/BBSR/DE/FP/AO/Infrastruktur/Siedlungsentwicklung/Infrastrukturfolgekosten/05__Veroeffentlichungen.html
- Smits, R.; Kuhlmann, S. (2004): The rise of systemic instruments in innovation policy. In: International Journal of Foresight and Innovation Policy, 1 (1/2), S. 4-32.
- Spork, P. (2004): Chronobiologie – Leben mit der Zeit. In: Das Uhrwerk der Natur. Reinbek bei Hamburg, August 2004.
- Spreemann, D.; P. Becker (2008): Energieautarke Sensorik im Kraftfahrzeug gespeist aus einem elektromagnetischen Vibrationswandler, 4. Internationales Forum Mechatronik 2008, Sept. 22-23, Stuttgart.
- Spreemann, D.; B.Folkmer, D. Maurath, Y. Manoli (2006): Innovative „Energy Harvesting“ Prinzipien zur Wandlung von kinetischer Energie, Proc. VDE/VDI 4. GMM-Workshop „Energieautarke Sensorik“, Sept. 14-15, 2006, Karlsruhe, Germany, S. 7-12.
- SRI Consulting Business Intelligence (2008): Disruptive Civil Technologies. Six technologies with potential impacts on US interests out to 2025, National Intelligence Council (NIC) (Hrsg.): National Intelligence Council (NIC).
- Steward, F. (2008): Breaking the Boundaries. Transformative Innovation for the global good. NESTA.
- Stubenrauch, J. (2005): Rotlicht verhilft zu Röntgenlicht. Chemische Rundschau Nr. 5, 17. Mai 2005.
- The President's Council on Bioethics; Kass L.R. (2003): Beyond Therapy: Biotechnology and the Pursuit of Happiness, Washington, D.C.: The President's Council on Bioethics.
- Thumann, J. R.; Schnappauf, W. (2008): BDI-Manifest für Wachstum und Beschäftigung – Deutschland 2020, Eine Publikation des BDI und seiner Mitgliedsverbände sowie von BDI initiativ – Innovationsstrategien und Wissensmanagement.

- TU Dresden (2009): Forschungscluster, Internet-Ressource, Innovationszentrum Gestaltung von Lebensräumen, URL: <http://www.habitat-design.tu-berlin.de/menue/forschungscluster/>
- Tukker, A.; Butter, M. (2007): Governance of sustainable transitions: about the 4(0) ways to change the world. *Journal of Cleaner Production* 15 (2007), S. 94-103.
- Ungan, T.; Reindl, L.M. (2008): Energieversorgung autarker Mikrosysteme durch Nutzung von HF-Strahlungsquellen, Proc. Ambient Assisted Living Kongress, 30. January – 1. Februar, 2008, Berlin, Germany, S. 433-435.
- von Bredow, R. (2005): Altersforschung. Die Abschaffung des Sterbens. (Stand: 08.07.9 A.D.).
- Walker, A. (2009): European Research Area in Ageing (ERA-AGE). Online: <http://era-age.group.shef.ac.uk/> (Stand: 15.06.2009).
- Wickens, A. P. (2001): Ageing and the free radical theory. In: *Respir.Physiol.*, 128 (3), S. 379-391.
- Ziv J.-C.; Cox, W. (2007), Megacities and affluence: transport & land use considerations, Presentation to the World Conference on Transport Research Berkeley June 2007.

Bildrechte:

© 3d-Master - Fotolia.com

© Andrzej - Fotolia.com

© iStock.com/Freder

© iStock.com/GRAZVYDAS

© iStock.com/KingWu

© iStock.com/Özgür Donmaz

© MichaelJordan - Fotolia.com

