

Foresight-Prozess – Im Auftrag des BMBF

Bericht

Zukunftsfelder neuen Zuschnitts

Auszug

Zeitforschung

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.

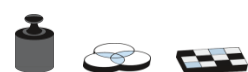
Ein laut Bibliometrie sehr dynamisches Zukunftsthema innerhalb der Zeitforschung ist die Chronobiologie, in der es erste Erkenntnisse zu einer zeitgenauen Medikamentierung gibt. Die Chronobiologie könnte der automatisierten Pharmazie (»Missile Drugs«, »Depots«, »Targeted Drugs«) einen Schub geben, möglicherweise 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.

1.1 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 Zeptophysik¹), biologische Uhren (Chronobiologie) sowie der Faktor Zeit in Synchronisierungs- und Parallelisierungsfragen (Effizienz) angesehen.

1.2 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 wird², so ist in der Physik die Debatte um eine größere Präzision der Zeitmessung (z. B. durch optische Uhren mithilfe von Femtosekundenlasern, Frequenzkammtech-

¹ Eine Femtosekunde ist eine millionstel Milliardstelsekunde (10^{-15} Sekunden), eine Attosekunde 10^{-18} s, und eine Zeptosekunde 10^{-21} s.

² Der Rekord liegt bei der Erzeugung von Lichtblitzen mit einer Dauer von 80×10^{-18} s (80 Attosekunden, Stand 2008).



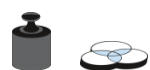
nik³ usw.) neu aufgekommen. Dies hat Relevanz für zahlreiche Anwendungsfelder und nicht für nur die Grundlagenforschung.

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 gehalten⁴:

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 Lokisationsaufgaben 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.

- ³ 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.
- ⁴ 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 Attosekundenlaser⁵ 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

⁵ 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.

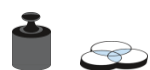


könne ein Zukunftsfeld sein. Die eigene Bibliometrie bestätigte die große Dynamik im gesamten Zukunftsfeld, besonders jedoch den Anstieg der Anzahl an Publikationen zu(r) Biologische(n) Uhr(en) bzw. zur Chronobiologie. Ein Diskussionspunkt der Publikationen ist, dass viele Menschen entgegen ihrer biologischen 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 Regulations- 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.

1.3 Langfristperspektive des Zukunftsfeldes

Entsprechende Forschungsfragen finden sich daher auf unterschiedlichen Ebenen. Abbildung 1 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?

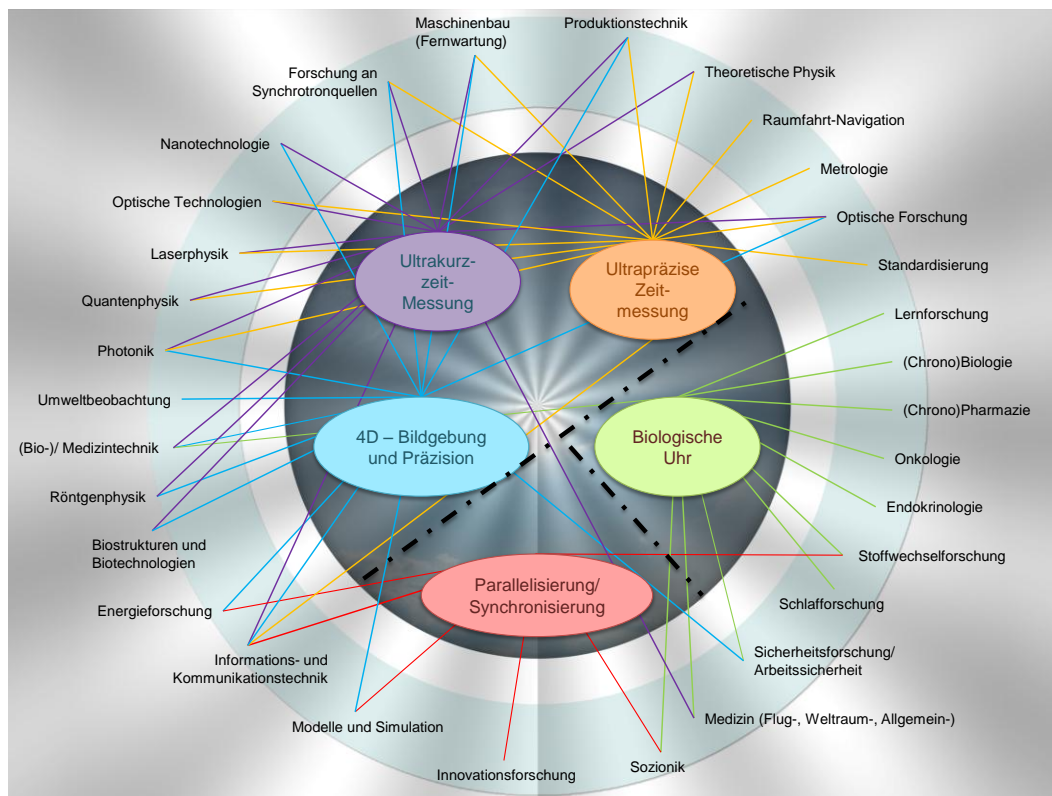
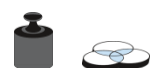


Abbildung 1: Zukünftig beteiligte Forschungsrichtungen

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.



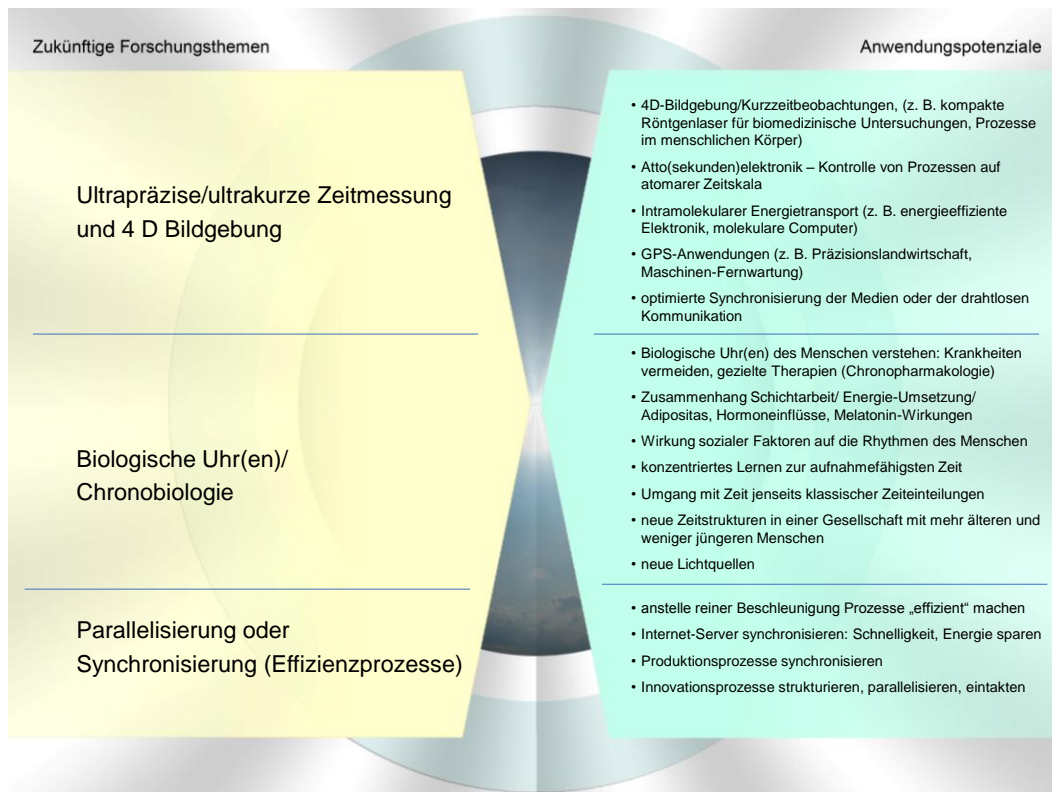


Abbildung 2: Zukünftige Forschungsthemen und Anwendungspotenziale im Zukunftsfeld »Zeitforschung«

1.4 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.

1.5 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.⁶

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-

⁶ 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)⁷ 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 1: Akteure der Ultrakurzzeitwissenschaften im Jahr 2009

⁷ <http://xfel.desy.de/>.



Das Zusammenwachsen dieser »Communities« wird auch auf EU-Ebene im Rahmen der »European Strategy Forum on Research Infrastructures« (ESFRI)⁸ und einigen Großvorhaben deutlich. Beispiele sind ELI (»Extreme Light Infrastructure«, Förderung: 400 Mio. Euro, Vorbereitungsphase 2008 bis 2010)⁹ 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)¹⁰, 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 2).

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 2: Akteure Chronobiologie im Jahr 2009

Seit 2006 gibt es ein europäisches Forschungsnetzwerk EUCLOCK¹¹ (Leitung Prof. Rönneberg, 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 an¹² und hat die Industrie in erste Vorgespräche einbezogen.

⁸ <http://cordis.europa.eu/esfri/>, eine der strategischen Technologieplattformen.

⁹ <http://www.extreme-light-infrastructure.eu/>.

¹⁰ <http://www.hiper-laser.org/>.

¹¹ <http://www.euclock.org>.

¹² <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.¹³

1.6 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-

¹³ 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 Zeitpolitik¹⁴) 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.

1.7 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-

¹⁴ 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 vorgebracht werden. Vom Zukunftsfeld würde die Industrie profitieren – besonders jedoch könnte die Lebensqualität der Menschen gesteigert werden.

