Arbeitsgruppe
"Prospektion der Forschung"

Drs. 3387/98
Köln, 16.2.1998

Pilotstudie zu einer Prospektion der Forschung anhand ausgewählter Gebiete

Inhalt — Seite

Vorbemerkung 2

Zusammenfassung 7

1. Prospektive Analysen und Empfehlungen 13

   1.1. Molekulare Architektur 14
   1.2. Molekular- und Bioelektronik 25
   1.3. Durch innere Grenzflächen bestimmte Materialien 36
   1.4. Ergebnisse der Delphi-Befragung 48

2. Methoden und Verfahren 63

   2.1. Ziele und Perspektiven 63
   2.2. Zum gewählten Verfahren 68
   2.3. *Peer Review*: Anhörungen, Gespräche und Beratungen von Wissenschaftlern 73
   2.4. Bibliometrische Kartierung 78
   2.5. Delphi-Befragung zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik 100
   2.6. Zur Funktion und Leistung der eingesetzten Methoden 107

Forschungs- und technologiepolitischer Kontext (Voraussetzungen, Defizite, Perspektiven) 112

Vorbemerkung

Eine Verständigung über längerfristige Entwicklungsperspektiven in Forschung und Technologie erscheint in Anbetracht des intensiven internationalen Wettbewerbs um die Bearbeitung zukunftsweisender Gebiete und ihre erfolgreiche Nutzung notwendig. Der Wissenschaftsrat hat im Jahre 1994 empfohlen, eine wissenschaftsgeleitete und unabhängige Prospektion der Forschung in der Bundesrepublik Deutschland in systematischer Weise zu organisieren.[1] Prospektion ist der Versuch, Forschungsaufgaben zu identifizieren, deren Bearbeitung dazu beitragen soll, neue wissenschaftliche Erkenntnisse in sich herausbildenden oder bisher vernachlässigten Gebieten zu gewinnen. Prospektion für die Forschung soll

- einen Diskurs über Entwicklungsperspektiven in Forschung und Technologie im Sinne einer Verständigung und Selbststeuerung innerhalb der Wissenschaft ermöglichen,

- wissenschaftliche Potentiale bestimmter Forschungsfelder sowie die sich abzeichnenden Möglichkeiten für eine spätere nutzbringende bzw. wertschöpfende Anwendung identifizieren und

- Möglichkeiten für wissenschaftliche Schwerpunktbildungen frühzeitig und langfristig aufzeigen und einen Beitrag zur Förderung von Innovationsprozessen in Forschung und Technologie leisten.

---

[1] Wissenschaftsrat: Empfehlungen zu einer Prospektion für die Forschung. In: Empfehlungen und Stellungnahmen 1994, Köln 1995, S. 7-33.

Prospektion setzt die Sicherung einer breiten Wissensbasis voraus. Deshalb muß die Ausgewogenheit zwischen der Förderung einer sich thematisch frei entfaltenden Forschung und einer thematischen Schwerpunkten zugeordneten Forschung weiterhin bestehen bleiben.

Der Wissenschaftsrat hat in seinen Empfehlungen eine Organisationsform für eine Forschungsprospektion skizziert. Er hat empfohlen, zunächst mit einer Erprobungsphase zu beginnen, um Erfahrungen mit diesem neuen Instrument zu sammeln. Daraufhin haben die großen Wissenschaftsorganisationen Deutsche Forschungsgemeinschaft, Fraunhofer-Gesellschaft, Helmholtz-Gemeinschaft, Hochschulrektorenkonferenz, Max-Planck-Gesellschaft und Wissenschaftsrat sich darauf verständigt, gemeinsam eine aus Wissenschaftlern bestehende Arbeitsgruppe einzusetzen. Ihr Auftrag lautete, in einer Pilotstudie ausgewählte Forschungsfelder unter Fragestellungen einer Forschungsprospektion zu betrachten. Dies bedeutete eine intensive Befassung mit wissenschaftlichen Themen, die die Arbeitsgruppe selbst auszuwählen hatte. Außerdem war zu prüfen, unter welchen methodischen und forschungspolitischen Voraussetzungen Forschungsprospektion im deutschen Wissenschaftssystem organisiert werden kann. Die Arbeitsgruppe sollte also sowohl methodenbezogene als auch wissenschaftliche Themen bearbeiten; deshalb empfahl sich eine Beschränkung auf ein Forschungsgebiet. Da der Wissenschaftsrat mit seiner Stellungnahme zur außeruniversitären Materialwissenschaft[2] kurz zuvor wichtige Vorarbeiten im Blick auf inhaltliche und strukturelle Aspekte dieses Ge-

---

[2] Wissenschaftsrat: Stellungnahme zur außeruniversitären Materialwissenschaft, Köln 1996.

bietes geleistet hatte, bot es sich für weiterführende Untersuchungen an. Es wurden daher überwiegend Wissenschaftler vorgeschlagen, die in der Materialforschung tätig sind.

Ausgehend von der These, daß wissenschaftlich Neues vor allem "zwischen" den Disziplinen entstehe, verständigte die Arbeitsgruppe sich darauf, ein Schwergewicht auf interdisziplinäre Forschungsthemen zu legen.

Mit dieser Pilotstudie wurde also der Versuch unternommen, eine Prospektion der Forschung durchzuführen und dabei vor allem unterschiedliche Methoden und Arbeitsformen zu erproben, um längerfristige und interdisziplinär angelegte Forschungsaufgaben zu bestimmen. Die Ergebnisse der Beratungen werden in der vorliegenden Studie dokumentiert. Die angewandten Methoden und Verfahren einer Forschungsprospektion können künftig in entsprechenden Studien genutzt werden; sie sollten zugleich weiterentwickelt und um weitere Methoden ergänzt werden.

Adressaten prospektiver Analysen und Studien sind sämtliche Institutionen und Personen, die an langfristiger Forschung interessiert sind, namentlich die in Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen tätigen Wissenschaftler, die Wissenschaftsorganisationen, Bund und Länder, öffentliche und private Forschungsförderer, Stiftungen sowie forschende Wirtschaftsunternehmen und ihre Verbände.

Die Arbeitsgruppe legt den Wissenschaftsorganisationen diese Pilotstudie mit der Bitte um Beratung vor.

Wissenschaftliche Einrichtungen sowie staatliche und private Forschungsförderer werden gebeten, die vorgelegten Ergebnisse und Empfehlungen zu erörtern und zu prüfen, in welcher Weise sie diese nutzen können.

Mitglieder der Arbeitsgruppe "Prospektion der Forschung":[3]

Professor Dr. Dagmar Schipanski, Ilmenau (Vorsitz)[A)]
Professor Dr. Fritz Aldinger, Stuttgart[F)]
Professor Dr. Gerhard Ertl, Berlin[B)]
Dr. Herbert Gassert, Mannheim[A)]
Privatdozent Dr. Hariolf Grupp, Karlsruhe[C)]
Professor Dr. Dietrich Haarer, Bayreuth[E)]
Professor Dr. Karl-Heinz Hoffmann, München[A)]
Professor Dr. Günter Maaß, Braunschweig[D)]
Professor Dr. Wolfgang Maßberg, Bochum[E)]
Professor Dr. Anthony van Raan, Leiden (NL)[B)]
Professor Dr. Erwin Sommer, Freiburg[C)]
Professor Dr. Richard Wagner, Jülich[D)]

Die Arbeitsgruppe hat in ihren Sitzungen Gespräche mit in- und ausländischen Forschern und Sachverständigen geführt, denen sie für ihre vielfältigen Anregungen dankt. An diesen Gesprächen nahmen teil: Professor Dr. Brunner, Stuttgart, Professor Dr. Ehrfeld, Mainz, Professor Dr. Fromherz, Martinsried, Dr. Grünhagen, Ludwigshafen, Professor Dr. Jäger,

---

[3] Benannt von
A) Wissenschaftsrat
B) Deutsche Forschungsgemeinschaft
C) Fraunhofer-Gesellschaft
D) Helmholtz-Gemeinschaft
E) Hochschulrektorenkonferenz
F) Max-Planck-Gesellschaft

Heidelberg, Professor Dr. von Klitzing, Stuttgart, Professor Dr. Lehn, Straßburg, Professor Dr. Schuster, Wien, Dr. Stein, München. Für die Pilotstudie trägt die Arbeitsgruppe die Verantwortung.

Zusammenfassung

Prospektion ist der Versuch, Forschungsaufgaben zu identifizieren, deren Bearbeitung dazu beitragen soll, neue wissenschaftliche Erkenntnisse in sich herausbildenden oder bisher vernachlässigten Gebieten zu gewinnen. Mit ihr können attraktive Gebiete benannt, aber nicht Forschungsergebnisse vorhergesagt werden; Wissenschaft soll und wird immer wieder völlig überraschende Erkenntnisse finden.

Das Instrument der Forschungsprospektion wurde in Deutschland - anders als in Japan, Großbritannien oder den Niederlanden - bisher kaum eingesetzt. In der vorliegenden Pilotstudie wurde es erprobt, wobei interdisziplinären Forschungsansätzen und der Verbindung von grundlagenorientierten Fragestellungen mit Anwendungspotentialen besondere Beachtung geschenkt wurde. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse beruhen auf einer neuartigen Kombination unterschiedlicher Methoden und Arbeitsformen, die Peer Review, Bibliometrische Kartierungen und Delphi-Untersuchungen einbeziehen. Aus dem Gesamtgebiet der Materialforschung, zu dem jährlich etwa 100.000 wissenschaftliche Arbeiten publiziert werden, wurden für die prospektive Studie die folgenden Gebiete ausgewählt:

(1) Molekulare Architektur
(2) Molekular- und Bioelektronik
(3) Durch innere Grenzflächen bestimmte Materialien.

Auffällig ist, daß sich in allen Gebieten eine Entwicklung der Materialforschung in Richtung auf Funktionswerkstoffe

abzeichnet. Außerdem ergeben sich stärker werdende Brücken zu den Biowissenschaften.

(1) Die zunehmende Miniaturisierung der Mikroelektronik in den Nanobereich hinein einerseits und das gezielte Zusammenwirken einzelner Atome und Moleküle zu komplexen Einheiten mit steuerbaren Struktur- und Wirkungseigenschaften andererseits werden in absehbarer Zeit in vergleichbare Größendimensionen vorstoßen; dabei wird dann ein neuartiges Entwicklungspotential der Materialwissenschaft erschlossen werden. Die dabei zu bearbeitenden wissenschaftlichen Fragestellungen reichen von der Untersuchung und Nutzung der Prinzipien biomimetischer Materialherstellung über die molekulare Ionik und Informationsverarbeitung bis zur Synthese anorganischer Partikel in Vesikeln oder Zellen. Das Anwendungspotential liegt z.B. bei der Entwicklung neuartiger amorpher und kristalliner anorganischer Materialien in Form von dünnen Fasern, Schichten und kompakten Werkstoffen, die sich durch besondere Festigkeit, Härte, Korrosionsbeständigkeit oder durch spezielle funktionelle Eigenschaften auszeichnen.

(2) Die Gebiete der Molekularelektronik und der Bioelektronik beruhen auf vergleichbaren Grundprinzipien und nutzen ähnliche Modelle und Arbeitsmethoden. Bisher unterscheiden sie sich jedoch deutlich in der Größe der untersuchten Moleküle, die etwa bei Protein-Aggregaten annähernd tausendmal größer ist als bei üblichen organischen Funktionsmolekülen. Ein großer Entwicklungssprung ist zu erwarten, wenn diese Lücke von beiden Seiten durch neue Synthesen sowohl supramolekularer als auch einfacherer bioanaloger Systeme geschlossen werden könnte. Die wissenschaftli-

chen Fragestellungen werden z.B. auf die Synthese und Struktur funktionaler Moleküle mit besonderen elektrischen, optischen und ionischen Eigenschaften sowie auf das Verständnis der Organisation sehr großer Systeme (Selbstorganisation, Proteinfaltung) zielen und Methoden der kombinatorischen Chemie und der evolutiven Biologie einbeziehen. Anwendungsbereiche liegen bei organischen Photoleitern, Leuchtdioden und Transistoren, molekularen Datenspeichern, Biosensorik und "Biochips".

(3) Durch gezielte Beeinflussung der Struktur und Dichte innerer Grenzflächen lassen sich neue Werkstoffklassen und Materialkombinationen mit maßgeschneiderten Eigenschaften entwickeln. Insbesondere den mikrostrukturierten Materialkombinationen und den nanoskaligen Materialien, bei denen die Abmessungen der einzelnen Volumenphasen zwischen benachbarten Phasen- oder Korngrenzen oft nur wenige Nanometer betragen, kommt sowohl für Struktur- als auch Funktionswerkstoffe zunehmende Bedeutung zu. Da im Submikronbereich häufig quantenmechanische Effekte dominieren, können so gänzlich neue elektronische und magnetische Effekte erreicht werden. Zu den wissenschaftlichen Fragestellungen, die sich durch die Kombination verschiedenartiger Phasen ergeben, gehören die Aufklärung der Kopplungschemie und der Ionenleitung in den Grenzflächen, die Entwicklung biotechnologischer Verfahren zur Herstellung biologischer Schichten auf anorganischen oder polymeren Substraten, die Erzeugung nanokristalliner Materialien oder die Entwicklung neuer Herstellungs- und Bearbeitungstechnologien für Komponenten der Mikrosystemtechnik. Entsprechend der relativen Breite des Gebietes sind zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten denkbar, wie z.B. Chemosensoren, bioverträgliche Oberflächenschichten, Mikrosysteme für invasive Medizintechnik

sowie die Herstellung von Verbundwerkstoffen mit kontrollierten Architekturen, von Knochenimplantaten oder von Membranen.

Trotz deutlicher Abgrenzung der drei ausgewählten Gebiete ergeben sich bei den langfristig zu bearbeitenden Fragestellungen auch thematische Überschneidungen. Für eine erfolgreiche Bearbeitung aller drei Gebiete ist eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit verschiedener natur- und ingenieurwissenschaftlicher Disziplinen unerläßlich. Gegenüber der klassischen Materialforschung ist vor allem die künftig entscheidende Einbeziehung biowissenschaftlicher Disziplinen hervorzuheben, die zu einer bioinspirierten Chemie und Physik führt. Numerische Untersuchungen sowie mathematische Modellierungen der zu betrachtenden komplexen Systeme werden ebenfalls wertvolle Impulse beisteuern. Zur Erschließung anwendungsorientierter Potentiale in 10 bis 15 Jahren werden künftig Systembetrachtungen und Aspekte des "life cycle" notwendig sein.

Die bibliometrischen Analysen zeigen, daß Arbeitsgruppen aus Deutschland in den drei angeführten Gebieten insgesamt intensiv, aber unterschiedlich aktiv in den Gebieten und deren Teilgebieten publizieren. Dies bezieht sich sowohl auf die Gesamtzahl der Publikationen als auch den relativen internationalen Stand und die durch Vergleich von zwei Untersuchungszeiträumen in den 90er Jahren zu beobachtende Dynamik. So werden bei den elf wichtigsten Teilgebieten der molekularen Architektur nach den jeweils dominierenden Arbeiten aus den USA viermal zweite Positionen erreicht, die in den übrigen sieben Teilgebieten von japanischen Wissenschaftlern gehalten werden. Im Gebiet der molekularen Elektronik sind deutsche Arbeiten dagegen durchgehend auf dem

dritten oder vierten Platz zu finden. Die beiden Spitzenplätze werden ausnahmslos von den USA oder Japan eingenommen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Delphi-Studie, nach denen die USA in allen drei Gebieten vorn liegen, vor allem im Bereich der molekularen Architektur. Bei den grenzflächenbestimmten Materialien zeigen die bibliometrischen Analysen eine etwas schwächere Position deutscher Wissenschaftler (hinter Großbritannien), während die Ergebnisse der Delphi-Studie zu einer positiveren Selbsteinschätzung kommen. Bemerkenswert ist der hervorragende Stand einzelner deutscher Universitäten oder außeruniversitärer Institute in einzelnen Teilgebieten. Demgegenüber sind industrielle Forschungslabors aus Deutschland im Vergleich zu solchen aus USA und Japan nur in verschwindend geringem Umfang in einzelnen Teilgebieten aktiv, wie die Pilotstudie und das zugrundeliegende im Internet verfügbare umfangreiche Datenmaterial zeigen (http://sahara.fsw.leidenuniv.nl/ed/intro.html).

Die Studie hat darüber hinaus gezeigt, daß das Instrument einer Prospektion der Forschung sehr sorgfältig und methodisch reflektiert eingesetzt werden muß. Voraussetzung und entscheidende Grundlage der prospektiven Analysen waren die Fachkenntnisse von beteiligten Wissenschaftlern. Es hat sich als sinnvoll erwiesen, ergänzend empirische und quantitative bibliometrische Verfahren einzubeziehen. Die Verknüpfung unterschiedlicher Methoden war ein wichtiges Merkmal des Vorgehens. Insgesamt kann Prospektion als ein erfolgversprechendes, künftig vermehrt zu nutzendes Instrument angesehen werden. Bewährte Prinzipien und Elemente des Forschungssystems und der Forschungsförderung dürfen dabei nicht beeinträchtigt werden. Prospektion setzt die Sicherung einer breiten Wissensbasis voraus; deswegen muß die

Ausgewogenheit zwischen der Förderung einer sich thematisch frei entfaltenden Forschung und einer thematischen Schwerpunkten folgenden Forschung weiterhin bestehen bleiben.

Zu Beginn von umfangreichen Forschungsarbeiten sind begründete Aussagen über erwartete künftige wissenschaftlich-technische Sachverhalte selbstverständlich. Die weitere Forschung und Entwicklung erfordert jedoch einen fortwährenden Lern- und Anpassungsprozeß an neue Gegebenheiten. Das liegt zum einen an der prinzipiellen Offenheit und Dynamik von Forschungsprozessen, zum andern an der engen Wechselwirkung zwischen Forschung und neuen technologischen Möglichkeiten. Insofern verbieten sich "Dekadenfestlegungen" im Sinne einer unreflektierten Verfolgung einmal gesetzter Ziele. Die Ergebnisse von Prospektionsstudien müssen also beständig nachjustiert und korrigiert werden.

Adressaten prospektiver Analysen und Studien sind sämtliche Institutionen, Unternehmen, Wissenschaftler und andere Personen, die an langfristiger Forschung interessiert sind. Sie können sowohl die vorgelegten Ergebnisse und Empfehlungen dieser Pilotstudie erörtern und in ihre Planungen einbeziehen als auch das vorgestellte forschungspolitische Instrumentarium daraufhin prüfen, in welcher Weise es sich für ihre Zwecke als nützlich erweist.

1. Prospektive Analysen und Empfehlungen

Die in diesem Kapitel dargelegten prospektiven Analysen und Empfehlungen zu drei ausgewählten Forschungsfeldern der Materialwissenschaft, nämlich

- Molekulare Architektur,
- Molekular- und Bioelektronik,
- durch innere Grenzflächen bestimmte Materialien,

sind Ergebnis der Beratungen, Gespräche und Arbeiten der Gruppe "Prospektion der Forschung". Sie beruhen auf den in der Vorbemerkung dargelegten Voraussetzungen und Zielen dieser Arbeitsgruppe. Das Vorgehen sowie die für die Analysen und Empfehlungen eingesetzten Methoden werden in Kapitel 2 erläutert.

Es wurden Analysen aus Sicht der Fachwissenschaft sowie bibliometrische Untersuchungen internationaler Publikationen zur Analyse und Strukturierung der ausgewählten Fachgebiete durchgeführt (vgl. die sich anschließenden Kapitel 1.1. bis 1.3.). Außerdem wurden die Ergebnisse der wissenschaftlichen Analysen mit Visionen einer Delphi-Befragung aus dem Jahre 1992/93 in Beziehung gesetzt (vgl. Kap. 1.4.).

In den wissenschaftlichen Analysen dieser Studie werden ausschließlich materialwissenschaftliche Themen mit einem Schwerpunkt auf Funktionsmaterialien behandelt; dabei werden aufgrund der überwiegend interdisziplinären Fragestellungen Forschungsansätze und -themen unterschiedlicher Disziplinen berücksichtigt. Die ausgewählten Forschungsfelder

Molekulare Architektur, Molekular- und Bioelektronik sowie durch innere Grenzflächen bestimmte Materialien sind einerseits deutlich voneinander abgegrenzt, andererseits ergeben sich bei den längerfristig angelegten Fragestellungen stets auch thematische Überschneidungen.

1.1. Molekulare Architektur

Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Materialforschung sind derzeit im wesentlichen von zwei Tendenzen geprägt:

- Weitere Miniaturisierung insbesondere auf dem Gebiet der Mikroelektronik in den Nanobereich wird dazu führen, daß einzelne Moleküle oder kleine atomare Einheiten als Funktionselemente eingesetzt werden.

- Umgekehrt führt das gezielte Zusammenwirken einzelner Atome und Moleküle zu neuen, komplexen Einheiten mit steuerbaren Struktur- und Wirkungseigenschaften ('molekulare Architektur').

Beide Entwicklungsrichtungen werden sich in absehbarer Zeit treffen und gegenseitig durchdringen, und es ist zu erwarten, daß damit ein großes neuartiges Entwicklungspotential der Materialwissenschaften erschlossen werden wird. Die Thermolyse präkeramischer Verbindungen, die biologische und supramolekulare Chemie, die biomimetische Materialherstellung und die molekulare Informationsverarbeitung werden als Beispiele betrachtet.

Die Thermolyse aus präkeramischen Verbindungen und Polymeren nutzt die Möglichkeit, mit Hilfe der klassischen Methoden der Molekülchemie metallorganische Moleküle zu synthetisieren, die bereits wesentliche Baueinheiten der daraus herstellbaren anorganischen Materialien enthalten. Auf diese einfache Weise können Materialien mit atomaren Strukturen und Gefügen fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht und neuartigen Eigenschaftskombinationen hergestellt werden. Neben der Festphasenthermolyse sind zur Herstellung derartiger Strukturen Verfahren zur Abscheidung aus der Gasphase (CVD) und der Lösungsphase (CLD) sehr aussichtsreich.

Ein besonderes Kennzeichen der biologischen Chemie besteht im Vorliegen spezifischer Wechselwirkungen zwischen komplexen Funktionseinheiten, wodurch eine 'molekulare Erkennung' stattfindet, die zu hochselektiven Reaktionen führt. Die Übertragung derartiger Prinzipien auf 'normale' Moleküle führt zum Gebiet der supramolekularen Chemie: Während innerhalb von Molekülen kovalente Bindungskräfte herrschen, bestehen zwischen Molekülen zusätzliche Wechselwirkungen (wie z.B. Wasserstoffbrücken-Bindungen, van der Waals-Kräfte oder elektrostatische Wechselwirkungen), die bei Partnern mit komplementären Eigenschaften sehr spezifisch sein können ('molekulare Erkennung') und durch dadurch ausgelöste Kopplungen selektive Reaktionen oder auch Transportvorgänge auslösen können. Die Kombination solcher funktioneller Übermoleküle mit geordneten polymolekularen Aggregaten (wie Membranen, dünnen Schichten, Vesikeln etc.) ermöglicht die Entwicklung entsprechender Funktionseinheiten, bei denen Signale durch die Einwirkung von Licht,

elektrischen oder magnetischen Feldern oder anderen physikalisch-chemischen Parametern ausgelöst werden können.

Entsprechend dem Vorbild der Natur mit der ständig stattfindenden Erzeugung anorganischer Strukturen in biologischen Systemen (Biomineralisation) wurden in letzter Zeit erfolgreiche Strategien zur Erzeugung bekannter und neuartiger anorganischer Materialien sowie von Hybridstrukturen aus dünnen Schichten dieser Materialien auf organischen Substraten entwickelt (Biomimetik).

Biologische Materialien (Muschelschalen, Eierschalen, Knochen, Zähne etc.) sind komplexe anorganisch-organische Verbundwerkstoffe. Ausgehend von vergleichsweise schlechten mechanischen Eigenschaften der Basismaterialien zeigen die resultierenden Verbunde bemerkenswerte mechanische Eigenschaften, die angepaßt sind an die spezifischen Anforderungen. Da sich die Prinzipien im Laufe der Evolution herausgebildet und entwickelt haben, kann die Entwicklung neuer Materialien darauf aufbauen, indem der Mechanismus dieser Prozesse erforscht wird und die Ergebnisse, verflochten mit den Kenntnissen der anorganischen Chemie, in die Materialentwicklung einfließen.

Die bisher gewonnenen Einblicke zeigen, daß die Synthese der biologischen Verbundmaterialien auf templatgesteuerter Anordnung beruht, in dem organisches Material wie Proteine und/oder Lipide selbständig ein dreidimensionales Baugerüst ausbildet, auf dem sich anorganisches Material (z.B. Hydroxylapatit, $CaCO_3$, SiO_2, Fe_3O_4) ablagern kann. Das organische Material ist dabei auf einer Längenskala von 1 bis 100 Nanometer so funktionalisiert (z.B. Sulfat, Carboxylat, Pho-

sphat) und strukturiert, daß die Abscheidung anorganischer Kristalle in gezielter Form und Orientierung bedingt wird. Durch Abgabe löslicher Proteine kann darüber hinaus auf die Kinetik und die Wachstumsrichtung der Kristalle Einfluß genommen werden. Die Organismen kontrollieren ferner die Konzentration der Lösung und den Grad der Übersättigung der abzuscheidenden Phase. Makroskopisches Wachstum wird erreicht durch Anlagerung vieler dieser inkrementalen Einheiten aneinander. Von Bedeutung ist vor allem, daß alle diese Prozesse in wäßriger Lösung und bei Temperaturen unter 100 °C stattfinden. Dabei werden wie in der belebten Natur der Ort und die Anzahl der Keimbildungszentren durch die organischen Matrices definiert und/oder die Orientierung des Kristallwachstums bestimmt und somit schablonenhaft auf die endgültige Morphologie der anorganischen Feststoffe übertragen.

Die vorgegebene Strukturierung kann vom nanoskopischen bis in den makroskopischen (> 0,1 Millimeter) Bereich erfolgen, wobei den anorganischen Materialien durch ihre spezielle Form, Abmessung und Textur neue Eigenschaften aufgeprägt werden. Damit wird die biomimetische Materialherstellung auch relevant für das Design von neuen Katalysatorsubstraten, von Membranen für die Trennung von Polymeren, Kolloiden und Zellen, von makroporösen Implantaten oder von Trägern für Arzneimittel - eine exemplarische Aufzählung, die bereits die fachübergreifenden Anwendungsmöglichkeiten der darzustellenden neuen Materialien aufzeigt.

Obwohl die Synthese solcher komplexer Materialien vielfach noch als Fernziel angesehen werden muß, unterstreichen

erste Ergebnisse die Bedeutung des biomimetischen Konzeptes. Während die traditionelle Zeolithsynthese zu Porengrößen im Subnanometerbereich führt, konnten unter Verwendung supramolekularer organischer Template mesoporöse Materialien (1,5-10 Nanometer) dargestellt werden. Die Abscheidung dünner Schichten aus wäßriger Lösung weist zahlreiche Vorteile gegenüber den konventionellen Techniken auf wie niedrige Abscheidetemperatur, geringe apparative Kosten, gleichförmige Beschichtung auch komplexer Körper, Eignung für polymere Werkstoffe und andere temperaturempfindliche Substrate. Die Biomimetik kann darüber hinaus Wege aufzeigen, die Kontrolle der Keimbildung und des Kristallwachstums in konventionellen Prozessen zu verbessern und/oder unerwünschte Kristallisationsprozesse zu verhindern.

Die 'molekulare Architektur' ermöglicht grundsätzlich den Aufbau größerer Systeme durch spontane Zusammensetzung molekularer Einheiten nach einem Plan, der auf molekularer Erkennung beruht ('self assembly'). Deshalb besteht ein sich daraus ergebendes Fernziel in der Entwicklung einer molekularen Informationswissenschaft, wobei die einzelnen molekularen Einheiten zur Speicherung und das durch die zwischenmolekularen Wechselwirkungen gebildete Netzwerk zur Signalverarbeitung dienen.

Längerfristig zu bearbeitende Fragestellungen

Es wird nachfolgend kursorisch eine Reihe von zu lösenden Forschungsaufgaben genannt, wobei keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden kann:

- Synthese und Strukturaufklärung funktionaler Moleküle mit gezielten elektrischen, optischen und ionischen Eigenschaften
- Weiterentwicklung von experimentellen Methoden zur Analyse und Manipulation molekularer Strukturen, insbesondere Rastersonden-Techniken, aber auch optische Methoden zur Detektion einzelner Moleküle
- Weiterentwicklung von Rechenmethoden zur theoretischen Behandlung inkl. Moleküldynamik-Simulation
- Molekulare Photonik, basierend auf der Lichtumwandlung durch intramolekulare Energieübertragung
- Plazierung bestimmter Moleküle auf Halbleitern
- Molekulare Ionik, wobei bewegliche Ionen als Träger für die Speicherung und Übertragung von Signalen dienen
- Synthese geeigneter Moleküle als Ausgangssubstanzen für die Entwicklung neuartiger Keramik-Werkstoffe. Hierzu erforderlich sind Untersuchungen über Gasphasenabscheidung, Thermolyse, Abscheidung aus Lösungen, Amorphisierung, Keimbildung und Kornwachstum etc.
- Abscheidung anorganischer Schichten auf funktionalisierte Metalle, Oxide oder Polymere
- Abscheidung anorganischer Schichten auf Langmuir-Blodgett-Filme
- Ausscheidung anorganischer Materialien in porösen funktionalisierten Polymeren
- Synthese anorganischer Partikel in Phospholipid-Vesikeln oder Micellen
- Weitere Aufklärung von Mechanismen der Biomineralisation und Übertragung der Erkenntnisse auf technisch interessante Stoffsysteme
- Aufklärung von Gefüge-Eigenschafts-Korrelationen

- Computersimulation von Gleichgewichts- und Ungleichgewichtszuständen, kinetischen Vorgängen, mesoskopischen Phänomenen und insbesondere von Struktur und Eigenschaften neuartiger Supramoleküle ('Molecular modeling').

Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen

Dieses ausgeprägt interdisziplinäre Gebiet erfordert die enge Zusammenarbeit von Chemikern (zur Synthese und Analyse neuartiger Verbindungen), Physikern (zur Untersuchung der physikalischen Eigenschaften und Konzeption des Systemaufbaus), Biologen und Materialwissenschaftlern (zur Erforschung und Entwicklung werkstoffkundlicher Aspekte) sowie im Einzelfall die Einbeziehung von Mathematikern, Ingenieurwissenschaftlern und insbesondere von Verfahrenstechnikern.

Anwendungsmöglichkeiten und Produktvisionen

Mittelfristig ist die Entwicklung neuartiger amorpher und kristalliner anorganischer Materialien in Form von dünnen Fasern, Schichten und kompakten Werkstoffen zu erwarten, die durch besondere thermische, chemische und mechanische Beständigkeit sowie durch spezielle funktionelle Eigenschaften ausgezeichnet sind und vielfältig eingesetzt werden können. Gleichzeitig können die Materialien morphologisch strukturiert und die Strukturmerkmale miniaturisiert werden.

Außerdem können Materialien mit gezielter Porenstruktur hergestellt werden, die z.B. als Filter und für Leichtbaustrukturen Anwendung finden können, oder heterogene Materialien, Composite und Verbundstrukturen erzeugt werden, die völlig neuartige Eigenschaftskombinationen erwarten lassen. Ferner können festkörperunterstützte Membranen als Grundlage für die biotechnologische Entwicklung von zum Beispiel hochspezifischen Rezeptoren für den Einsatz als Biosensoren dienen.

Langfristig besteht die Vision, die Informationstechnik auf molekularen Funktionseinheiten aufzubauen, wobei einzelne Moleküle durch elektrische oder optische Signale gesteuert und zur Datenverarbeitung herangezogen werden können.

Erläuterung zur Übersichtskarte "Molekulare Architektur"[4]

Für das Forschungsfeld "Molekulare Architektur" wurden mit der bibliometrischen Analyse insgesamt 13.500 Publikationen im Zeitraum von 1991-96 erfaßt. In den Jahren 1991-93 wurden 4.500 und von 1994-96 9.000 Publikationen veröffentlicht; es ist also eine Verdopplung der Veröffentlichungen zu verzeichnen. Die Übersichtskarte "Molecular Architecture" zeigt 11 Teilgebiete.[5] Diese Teilgebiete lassen sich weiter aufschlüsseln, wie in Kapitel 2.4 anhand eines Beispiels gezeigt wird; dort sind auch Einzelheiten der ver-

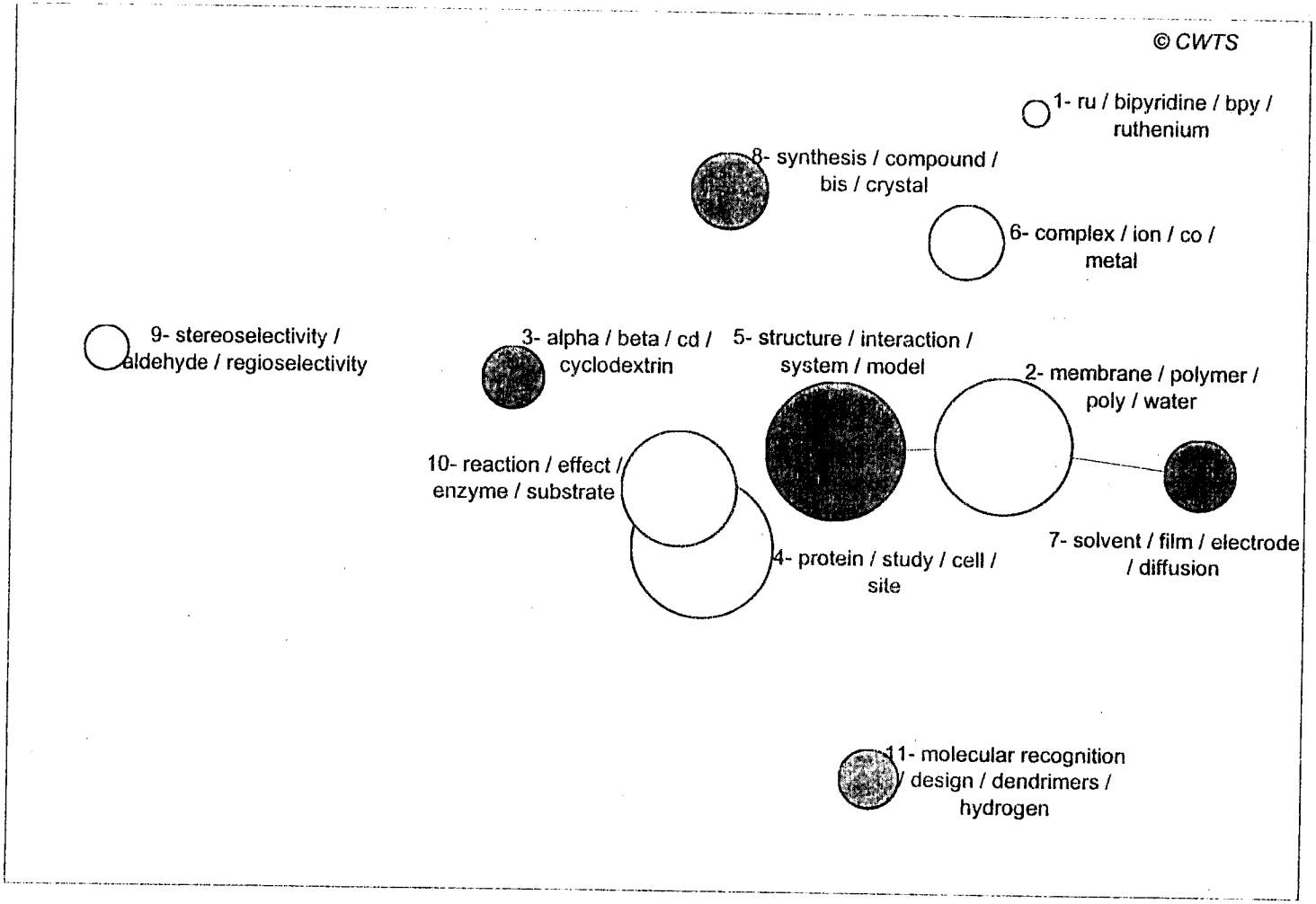
---

[4] Zur Methode der bibliometrischen Kartierung vgl. Kap. 2.4.

[5] Für diese Teilgebiete wurde kein einheitlicher Oberbegriff gewählt, sondern es werden die am häufigsten auftretenden Schlüsselbegriffe genannt.

Übersichtskarte „Molecular Architecture" (1994-1996)

Die Fläche der in der Karte wiedergegebenen Kreise für Teilgebiete ergibt sich aus der Anzahl der ihnen zuzuordnenden Publikationen. Ein geringer Abstand zwischen den Kreisen weist auf enge thematische Bezüge hin (zahlreiche gemeinsame Schlüsselbegriffe). Teilgebiete, in denen die Aktivitäten gegenüber dem Zeitraum 1991 - 1993 zunehmen, sind dunkelgrau gekennzeichnet (hellgrau: weitgehend gleichbleibende Aktivitäten).



wendeten bibliometrischen Methode dargestellt. Außerdem finden sich umfangreiche ergänzende Daten im Internet unter http://sahara.fsw.leidenuniv.nl/ed/intro2.html.

Übersicht A1:
Zahl der Publikationen pro Teilgebiet[6]

Teil-geb.	1991-93	1994-96	Insg.	Name
1	69	135	204	ru / bipyridine / bpy / ruthenium
2	1.276	3.194	4.470	membrane / polymer / poly / water
3	228	684	912	alpha / beta / cd / cyclodextrin
4	1.436	3.441	4.877	protein / study / cell / site
5	1.182	3.286	4.468	structure / interaction / system / model
6	378	940	1.318	complex / ion / co / metal
7	327	869	1.196	solvent / film / electrode / diffusion
8	343	1.005	1.348	synthesis / compound / bis / crystal
9	191	344	535	stereoselectivity / aldehyde / regioselectivity
10	902	2.259	3.161	reaction / effect / enzyme / substrate
11	199	621	820	molecular recognition / design / dendrimers /...

Drei Teilgebiete weisen im Zeitraum 1991-96 jeweils deutlich über 4.000 Publikationen auf und können deshalb als aktuelle Hauptarbeitsgebiete bezeichnet werden, nämlich

- 4: protein / study / cell / site
- 2: membrane / polymer / poly / water
- 5: structure / interaction / system / model

Insbesondere im letzten Teilgebiet ist eine hohe Dynamik festzustellen (1991-93: 1.182, 1994-96: 3.286 Veröffentlichungen). Zu den großen Teilgebieten zählt darüber hinaus

---

[6] Die Gesamtzahl der nachstehend genannten Publikationen ist wegen ihrer Mehrfachzuordnung zu unterschiedlichen Teilgebieten höher als die Zahl der erfaßten Publikationen.

10: "reaction / effect ..." mit knapp 3.200 Publikationen. Unter den mittelgroßen Teilgebieten fallen die Gebiete 8, 7, 3 und 11 wegen ihrer hohen Dynamik auf.

Bei der Analyse wurden Datenbanken aus den Disziplinen Chemie, Biotechnologie, Biochemie und Biohysik, Neurowissenschaften und Materialwissenschaft berücksichtigt.

Ausgehend von der Zahl der Publikationen nach Ländern (vgl. Übersicht A2) nimmt Deutschland in vier der elf Teilgebiete Rang 2 (4, 5, 8 und 11) ein, Rang 3 in weiteren sechs Teilgebieten (2, 3, 6, 7, 9 und 10) und einmal Rang 4 (1). Vergleicht man die Zeiträume 1991-93 und 1994-96 miteinander, so entsprechen die Aktivitäten in Deutschland ganz überwiegend der allgemein festzustellenden hohen Dynamik (Ausnahme: Teilgebiet 9).

Übersicht A2:
Rangfolge der Länderaktivitäten
nach Zahl der Publikationen in den Teilgebieten
(Positionen 1-5)

Teilgeb. / Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA
2	J	J	J	D	D	J	J	D	J	J	D
3	Ital	D	D	J	J	D	D	J	D	D	J
4	D	F	F	GB	GB	F	F	GB	F	GB	GB
5	GB	GB	Span	F	F	GB	India	F	GB	F	F

Unter methodischen Gesichtspunkten ist zu berücksichtigen, daß hier zunächst eine Aktivitätsanalyse vorgelegt wird. Eine Leistungs- oder *Impact*-Analyse, die Aufschluß über Rezeption und internationale Wirkung von Publikationen

gibt, liegt damit nicht vor. Diese würde das Bild von der Bedeutung (nationaler) *Leistungen* an Stelle von Aktivitäten weiter differenzieren.

1.2. Molekular- und Bioelektronik

Molekularelektronik und Bioelektronik haben mit Blick auf die ihnen zugrundeliegenden Prinzipien und Modelle sowie der eingesetzten wissenschaftlichen Arbeitsmethoden große Ähnlichkeit. Sie werden daher in der näheren Zukunft miteinander verschmelzen.

Gegenwärtig befaßt sich die molekularelektronische Forschung mit Molekülen, deren aktive Gruppen bei Molmassen zwischen 100 und 1.000 liegen. Die teilweise involvierten makromolekularen Ketten, deren Molmassen größer als 10.000 sein können, spielen beim heutigen Stand der Technik nur die Rolle eines ungeordneten amorphen Strukturmaterials.

Im Gegensatz dazu handelt es sich bei den echten **Biomolekülen** um Protein-Aggregate, deren Molmasse 10^5 übersteigen kann. Diese sind daher fast 1.000 mal größer als die mit heutigen Methoden synthetisierbaren Funktionsmoleküle oder Moleküle der supramolekularen Chemie. Der entscheidende Konstruktionsvorteil der Biomoleküle ist die Präzision, mit der die großen molekularen Aggregate gebaut sind: Die Proteinstrukturen eines gegebenen Biomoleküls sind identisch und daher auch reproduzierbar; man kann daher mit Biomolekülen wesentlich spezifischere Wirkungen erzielen als mit den heute gebräuchlichen Makromolekülen. So ist z.B. das bakterielle Photoreaktionszentrum, in dem der Primärprozeß

der Photosynthese stattfindet, so genau definiert, daß eine völlige Aufklärung durch Röntgenstrukturanalyse erfolgen konnte (Nobelpreis 1988). Aufgrund der genau bekannten Struktur dieses Biomoleküls kann exakt bestimmt werden, welchen molekularen Weg das Elektron im Reaktionszentrum einschlägt, nachdem durch Lichteinstrahlung ein Elektron-Loch-Paar gebildet wurde. Genauso kann vorausgesagt werden, welchen Weg die Gegenladung (das Loch) einschlägt. Man hat es hier sozusagen mit einem molekularen Gleichrichter zu tun, wie er oft von der Molekularelektronik angestrebt, jedoch bis jetzt nicht erreicht wurde.

Molekularelektronik kann derzeit als eine Wissenschaft beschrieben werden, die mit molekularen Bausteinen der Größe eines Farbstoffmoleküls folgende elementaren Prozesse durchführt:

- Ladungsträgertransport
- Licht-induzierte Elektron-Loch-Trennung
- Reversible und irreversible Photochemie, Protonentransfer, Photochromie
- Tunnelprozesse von Ladungen oder von Protonen
- Molekulare Energietransferprozesse

In der **Bioelektronik** sind es dieselben Prozesse wie die zuvor erwähnten, es kommen jedoch durch die Größe der Systeme noch andere Gesichtspunkte dazu, wie:

- Selbstorganisation großer molekularer Systeme
- Raumstruktur biologischer Makromoleküle
- Selektivität großer Biomoleküle (zum Beispiel Schlüssel-Schloß-Prinzip von Biomolekülen und Biorezeptoren)

- Gentechnische Herstellung von Proteinen
- Gentechnische Modifikation von Proteinen

Mit diesen, für Biomoleküle spezifischen Gesichtspunkten, werden dann wieder die unter der Molekularelektronik genannten Elementarprozesse (Ladungstransfer etc.) durchgeführt. Diese Prozesse können jedoch aufgrund der hochgeordneten Struktur der Biomoleküle spezifischer und selektiver ausgeführt werden.

Die molekularelektronischen und bioelektronischen Systeme sind viel komplexer als die heutigen, auf Einkristallen beruhenden technischen Systeme. Sie haben im allgemeinen auch eine kürzere Lebensdauer. Eine organische Druckerfolie hält etwa 30.000 Druckprozesse aus; daraufhin wird die gesamte aktive Kartusche (Photoleiter, Toner etc.) thermisch entsorgt. Materialien der organischen Funktionssysteme sind jedoch umweltverträglich und leicht zu entsorgen.

Ein großer Entwicklungssprung ist zu erwarten, wenn die noch bestehende Lücke zwischen den kleinen Molekülen (Molmasse 100 - 1.000) und den größeren Biomolekülen durch Fortschritte auf beiden Seiten überwunden ist. Dies wird auf der einen Seite durch neue Synthesen supramolekularer Systeme erfolgen (Nobelpreis 1987). Auf der anderen Seite werden voraussichtlich einfachere biologische Systeme erzeugt, die den heutigen synthetischen Molekülen ähnlicher sind und eventuell mit einfacherem Aufbau vergleichbare Eigenschaften wie komplizierte Biomoleküle aufweisen.

Die mathematischen Simulationsmethoden werden beim Fortschritt aller genannter Thematiken eine Rolle spielen.

Interessant wird sein, ob die ab initio-Methoden, die derzeit nur relativ kleine Moleküle bis zur Größe eines Farbstoffes bewältigen, auch auf größere Systeme übertragen werden können. Sollte das nicht der Fall sein, so muß die Qualität der semi-empirischen Methoden wesentlich verbessert werden.

Längerfristig zu bearbeitende Fragestellungen

Auch hier ist zwischen den kleineren Molekülen der Molekularelektronik und den Biomolekülen zu unterscheiden, da die Synthese von Biomolekülen über gentechnische Methoden andere Ansätze ermöglicht und da kleine Moleküle sterisch wesentlich einfachere, dafür aber keine hochselektiven Strukturen aufweisen (Packung der Moleküle; Kristallstruktur). Biomoleküle verfügen neben ihrer chemischen Primärstruktur (bei Proteinen: Sequenz der Aminosäuren) vor allem auch über Sekundärstrukturen (bei Proteinen: α-Helix, ß-Faltblatt) und Tertiärstrukturen (bei Proteinen: räumliche Anordnung der Helices und Faltblätter). Diese Strukturen führen dann zu dem sehr hohen Ordnungsgrad **von Biomolekülen** und zu sehr hoher Selektivität.

Die Fragestellungen bei **kleinen Molekülen** werden vor allem sein:

- Synthese und Struktur funktionaler Moleküle mit besonderen elektrischen, optischen und ionischen Eigenschaften
- Entwicklung von Techniken zur Detektion molekularer Strukturen; Tunnelmikroskopie, Kraftmikroskopie, Optische Einzelmoleküldetektion sowie Weiterentwicklung von kern-

magnetischer Resonanz, Methoden der Synchrotonstrahlung etc.
- Erweiterung von Rechenmethoden zur ab initio-Berechnung von Energie und Struktur größerer Moleküle (Vergleich mit semi-empirischen Methoden)
- Berechnung molekularer Parameter höherer Ordnung, wie z.B. der molekularen Nichtlinearität zweiter und dritter Ordnung (Eigenschaften, die man für Schalt- und Verstärkungsprozesse benötigt)

Bei den **Biomolekülen** ergeben sich Fragestellungen wie:

- Verständnis der Organisation sehr großer Systeme mit Aspekten der Selbstorganisation, Proteinfaltung
- Einbezug von Methoden der kombinatorischen Chemie und der evolutiven Biologie
- Verständnis der Biofunktionalität großer Systeme (Untersuchung kleinerer biologischer oder quasi-biologischer Modellsysteme, um in die Nähe der klassisch-synthetisch herzustellenden Materialien zu gelangen)
- Untersuchung elektronischer und optischer Eigenschaften von Biosystemen (fluoreszierende Proteinsysteme; biologische Elektron-Transportsysteme etc.)
- Struktur-Funktions-Beziehungen

Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen

Für Molekular- und Bioelektronik werden als zentrale Disziplinen Chemie und Physik notwendig sein, außerdem wesentliche Arbeitsbereiche der Biologie und Bioverfahrenstechnik. Die Modellierung der komplexen Systeme kommt vor allem

Mathematik und Informatik zu. Erst in einer Phase, in der Produkte der Bioelektronik zu erwarten sind, werden auch die Ingenieurwissenschaften in diesem Bereich eine wesentliche Rolle spielen.

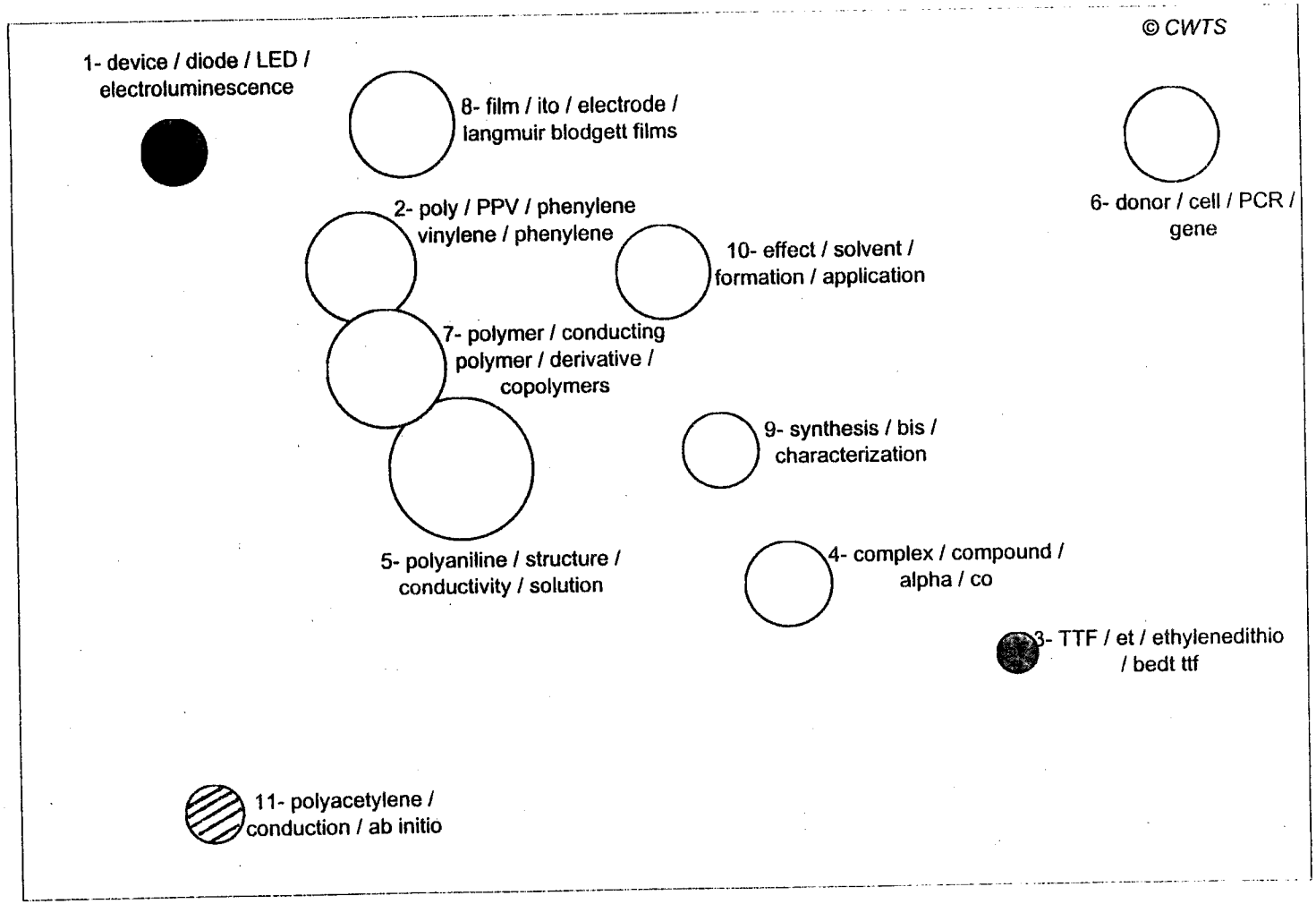
Anwendungsmöglichkeiten und Produktvisionen

Für die Molekular- und Bioelektronik ergeben sich folgende Anwendungsmöglichkeiten:

- Schnelle organische Photoleiter
- Organische Leuchtdioden
- bei Raumtemperatur arbeitende molekulare Datenspeicher (bei Tieftemperatur jetzt bereits realisiert)
- Organische Transistoren
- Selbstorganisierende Systeme mit kleinen Molekülen (Flüssigkristalle etc.)
- Molekulare Label-Systeme zur biologischen und medizinischen Diagnose aufgrund optischer oder elektrischer Eigenschaften
- durch Siebdruck hergestellte Transistor- und Diodensysteme
- Wegwerfelektronik (Preisschilder, Eintrittskarten etc.)
- Molekulare Datenspeicher
- Biochip
- Neue Stoffklassen basierend auf neuen Verfahren kombinatorische Chemie oder Gentechnik
- Neue medizinische 'Ersatzteile' (sensitive künstliche Haut etc.)
- Biosensorik

Übersichtskarte „Molecular Electronics" (1994-1996)

Die Fläche der in der Karte wiedergegebenen Kreise für Teilgebiete ergibt sich aus der Anzahl der ihnen zuzuordnenden Publikationen. Ein geringer Abstand zwischen den Kreisen weist auf enge thematische Bezüge hin (zahlreiche gemeinsame Schlüsselbegriffe). Teilgebiete, in denen die Aktivitäten gegenüber dem Zeitraum 1991 - 1993 zunehmen, sind dunkelgrau gekennzeichnet (hellgrau: weitgehend gleichbleibende Aktivitäten; schraffiert: abnehmende Aktivitäten).



- Interface zwischen Elektronik und neuronalen Systemen (künstliches Auge)
- Neuronale Netze mit Fehlertoleranz

Erläuterung zur Übersichtskarte "Molekulare Elektronik"[7]

Für das Forschungsfeld "Molekulare Elektronik" wurden mit der bibliometrischen Analyse insgesamt 7.100 Publikationen im Zeitraum von 1991-96 erfaßt. In den Jahren 1991-93 wurden 2.600 und von 1994-96 4.500 Publikationen veröffentlicht; es ist also eine deutliche Zunahme der Veröffentlichungen zu verzeichnen. Die Übersichtskarte "Molecular Electronics" zeigt 11 Teilgebiete.

Übersicht A1:
Zahl der Publikationen pro Teilgebiet[8]

Teil-geb.	1991-93	1994-96	Insg.	Name
1	77	361	438	device / diode / LED / electroluminescence
2	504	967	1.471	poly / PPV / phenylene vinylene / phenylene
3	64	140	204	TTF / et / ethylenedithio / bedt ttf
4	339	622	961	complex / compound / alpha / co
5	1.020	1.671	2.691	polyaniline / structure / conductivity / solution
6	414	715	1.129	donor / cell / PCR / gene
7	662	1.153	1.815	polymer / conducting polymer / derivative / copolymers
8	487	899	1.386	film / ito / electrode / langmuir blodgett films
9	236	477	713	synthesis / bis / characterization
10	383	721	1.104	effect / solvent / formation / application
11	229	285	514	polyacetylene / conduction / ab initio

[7] Zur Methode der bibliometrischen Kartierung vgl. Kap. 2.4.

[8] Die Gesamtzahl der nachstehend genannten Publikationen ist wegen ihrer Mehrfachzuordnung zu unterschiedlichen Teilgebieten höher als die Zahl der erfaßten Publikationen.

Mit rund 2.700 Publikationen im Zeitraum von 1991-96 ist das Teilgebiet 5 "polyaniline / structure ..." das größte. Im Mittelfeld liegen weitere fünf Teilgebiete zwischen 1.100 und 1.800 Publikationen, nach absteigender Größe: Teilgebiete 7, 2, 8, 6 und 10. Unter den kleineren Teilgebieten 1, 3, 4, 9 und 11 befinden sich zwei mit deutlich zunehmenden Aktivitäten, nämlich

- 1: device / diode / LED / electroluminescence (1991-93: 77, 1994-96: 361)
- 3: TTF / et / ethylenedithio / bedt ttf (1991-93: 64, 1994-96: 140)

Außerdem findet sich ein Gebiet, das - im Vergleich mit den stets deutlich zunehmenden Aktivitäten in den anderen Gebieten - stagniert:

- 11: polyacetylene / conduction / ab initio (1991-93: 229, 1994-96: 285)

Bei der Analyse wurden Datenbanken aus den Disziplinen *Natural and Life Sciences*, Chemie, Biotechnologie, Biochemie und Biophysik, Neurowissenschaften sowie Materialwissenschaft berücksichtigt. Eine Analyse der am häufigsten betroffenen Zeitschriften nach disziplinärer Zuordnung zeigt, daß die Molekular-Elektronik stark interdisziplinär strukturiert ist, wobei allerdings Physik und Chemie sowie deren Subdisziplinen dominieren; Ausnahme ist das biochemisch-medizinische Teilgebiet 6. Zur interdisziplinären Struktur der einzelnen Gebiete ist hervorzuheben:

- in Teilgebiet 6 herrschen Biochemie und Medizin vor (Disziplinen: *biochemistry, genetics, hematology, physical chemistry, immunology*),
- in Teilgebiet 1 finden sich *condensed matter physics, physical chemistry, applied physics, metallurgy, material science,*
- in den Teilgebieten 3 sowie 4, 9 und 10 sind die dominanten Disziplinen: *physical chemistry, condensed matter physics, polymer science, chemistry,*
- in den Teilgebieten 2, 5, 7, 8 sowie 11 dominiert ebenfalls die Physikalische Chemie.

Ausgehend von der Zahl der Publikationen nach Ländern nimmt Deutschland in allen Teilgebieten Rang 3 oder Rang 4 (in den Teilgebieten 5 und 11) ein, wobei USA und Japan jeweils führend sind.[9] Vergleicht man allerdings die Zeiträume 1991-93 und 1994-96 miteinander, so ist festzustellen, daß die Aktivitäten in Deutschland nur in den Teilgebieten 1, 2, 3 und 8 deutlich zunehmen. Zwar steigen auch die Aktivitäten in den anderen Teilgebieten leicht an, sie halten aber mit der Dynamik in anderen Ländern nicht Schritt.

---

[9] Die am Ende des vorgehenden Kapitels gegebenen methodischen Hinweise zur Erfassung von Aktivitäten gelten auch in diesem Fall.

Übersicht A2:
Rangfolge der Länderaktivitäten nach Zahl der Publikationen in den Teilgebieten
(Positionen 1-5)

Teilgeb. / Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA	J	USA	USA	J
2	J	J	J	J	J	J	J	USA	J	J	USA
3	D	D	D	D	F	D	D	D	D	D	F
4	GB	GB	F	F	D	F	F	F	F	F	D
5	Swe	F	Span	Ind	GB	GB	GB	GB	SKor	GB	Ind

Auffällig ist die Dominanz von Japan. Obwohl für die 'totale' Länderaktivität für jedes Teilgebiet meistens die Vereinigten Staaten an erster Stelle stehen, finden sich bei Betrachtung institutioneller Aspekte häufig japanische Universitäten in einer führenden Position; d.h. sie haben die meisten Publikationen in dem jeweiligen Teilgebiet. Dies betrifft fast alle Teilgebiete und bezieht sich vor allem auf die Universitäten Kyoto und Osaka. Die Ursache liegt primär an der Konzentration der Forschung in wenigen japanischen Einrichtungen. In den Vereinigten Staaten und in Deutschland herrschen dagegen dezentrale institutionelle Strukturen vor.

Weitere umfangreiche Daten finden sich im Internet unter http://sahara.fsw.leidenuniv.nl/ed/intro3.html.

1.3. Durch innere Grenzflächen bestimmte Materialien

Die physikalischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften von Grenzflächen zwischen zwei festen Phasen unterscheiden sich im allgemeinen wesentlich von den entsprechenden Volumeneigenschaften der aneinandergrenzenden Stoffe. Dabei dominieren die Grenzflächeneigenschaften über die Volumeneigenschaften um so mehr, je höher bei konstanter Anzahl der Anteil der Atome oder Moleküle wird, die sich in den Grenzflächen befinden. Auf dieser Grundlage lassen sich durch intelligentes Design der Struktur und Dichte (d.h. Grenzfläche/Volumen) innerer Grenzflächen[10] neue Werkstoffklassen und Materialkombinationen mit für den jeweiligen Anwendungsbereich "maßgeschneiderten" Eigenschaften entwickeln. Unter diesen kommen insbesondere den mikrostrukturierten Materialkombinationen und den nanoskaligen Materialien, bei denen die Abmessungen der einzelnen Volumenphasen ('Bulk') zwischen benachbarten Phasen- oder Korngrenzen unter 1 Mikrometer (10^{-6} m) bis zu wenigen Nanometern (10^{-9} m) betragen, eine zunehmende Bedeutung sowohl im Bereich der Strukturwerkstoffe[11] als auch im Bereich der Funktionswerkstoffe zu. Bei letzteren werden deren elektronische und magnetische Eigenschaften bei der Reduzierung der 'Bulk'-Abmessungen in den Submikronbereich zunehmend

---

[10] Äußere Grenzflächen/Oberflächen, die bei der Entwicklung von polymeren und biologischen Membranen in der Katalyse, Wärmedämmschicht- und Oxidationsschutzentwicklung, Tribologie, Kontaktmechanik, Schmiermittelentwicklung und anderen medizinischen, pharmazeutischen und technischen Bereichen eine große Bedeutung haben, werden in diesem Kapitel nicht betrachtet.

[11] Dieser Begriff wird im folgenden synonym zu "Konstruktionswerkstoffen" verwendet.

von quantenmechanischen Effekten bestimmt. Dies kann zu gänzlich neuen elektronischen und magnetischen Effekten führen. Beispiele hierfür sind die Quantum-Dot- und Quantum-Wire-Strukturen sowie die magnetischen Vielfach-Dünnschichten. Letztere, die aus einer Vielzahl dünner ($\sim 10^{-9}$ m) alternierender Schichten aus ferromagnetischen und nichtmagnetischen Schichten bestehen, zeigen eine sprunghafte Änderung des elektronischen Widerstands beim Anlegen eines kleinen äußeren Magnetfeldes. Diese in Deutschland gemachte Entdeckung, der sog. "Riesenmagnetowiderstandseffekt", hat große technologische Bedeutung für die zukünftige Informations- und Sensortechnik. Auch die elektrischen Eigenschaften von Funktionswerkstoffen, die durch Raumladungseffekte an inneren Grenzflächen kontrolliert werden, lassen sich durch die Dichte an inneren Grenzflächen einstellen.

Bei vielen keramischen, metallischen und polymeren Strukturwerkstoffen können die ursprünglichen 'Bulk'-Eigenschaften durch Erhöhung der Dichte und durch spezielles Design der inneren Grenzflächen z.T. drastisch verbessert werden: Grobkristalline Keramiken sind spröder und brechen bereits bei geringer mechanischer Belastung. Dieser vorrangig auf inneren Spannungen beruhende Effekt erfordert Strategien zur Entwicklung spannungsausgleichender bzw. -tolerierender Grenzflächen. Die Härte von nanokristallinen Legierungen, bei denen bis zu 50 % aller Atome sich in inneren Grenzflächen befinden, ist um den Faktor 10 bis 20 höher als in den entsprechenden polykristallinen Werkstoffen mit typischen Korngrößen von einigen Mikrometern. Analog läßt sich die Koerzitivfeldstärke als 'magnetische Härte' von einigen neuen hartmagnetischen Materialien durch Herstellung in

feinstkristalliner Form deutlich steigern. Bei grobkristallinen Werkstoffen fehlt noch weitgehend ein Verständnis der Kohäsion von Korn- und Phasengrenzflächen. Dies gilt auch für Fragen nach Segregation an und Stabilität von inneren Grenzflächen bei höheren Temperaturen, die in die zur Zeit diskutierten Korngrenzen-Zustandsdiagramme münden. Bei vielen Kunststoffen kontrolliert die Grenzflächenbindungsstärke zwischen den Domänen zweier nicht mischbarer Homopolymere deren Festigkeit und damit deren Anwendungsbereich als Strukturwerkstoff. Durch Einbau von "unlegierten" Copolymerketten in die Domänengrenzfläche kann die Kompatibilität im Grenzflächenbereich maßgeschneidert und somit die Festigkeit verbessert werden. Auch bei den mit keramischen Kurz- oder Langfasern verstärkten Polymer-Matrix-, Keramik-Matrix- oder Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen kontrollieren Chemie und Struktur der Matrix/Faser-Grenzfläche die mechanischen Eigenschaften dieser Hybridwerkstoffe.

Standen bislang vornehmlich Grenzflächen zwischen gleichen Materialklassen im Vordergrund der Materialforschung, so werden zukünftig - im Sinne der bioinspirierten Chemie und Physik - mit der Entwicklung von Biosensoren und biokompatiblen Materialien sowie bei der biomimetischen Herstellung von Biomineralien Struktur, Eigenschaft und Design von anorganisch/organischen, anorganisch/biologischen und von polymer/biologischen Grenzflächen eine große Bedeutung gewinnen. Hierbei werden Fragen des Andockens von Lipiden, Proteinen und bioverträglichen Molekülen an das anorganische bzw. polymere Substrat im Zentrum des Interesses stehen. Eine herausragende Stellung wird dabei vermutlich die Grenzfläche zwischen Silicium und biomolekularer Schicht im

Bereich der Biosensorik einnehmen, die auf der hochentwickelten Mikroelektronik aufbaut.

Die Herstellung und Synthese von nanostrukturierten und mikrostrukturierten Materialien sowie von grenzflächenkontrollierten Materialverbünden erfordert im allgemeinen Prozeßführungen, die weit entfernt vom thermodynamischen Gleichgewicht erfolgen (z.B. Pulvermetallurgie, Schmelzinfiltration, Plasma-Vakuumspritzen) und/oder nicht bei höheren Temperaturen stattfinden (z.B. Sputter-Dünnschichttechnologie, Sol-Gel-Verfahren, Thermolyse präkeramischer Verbindungen, biomimetische Synthese). Zur Herstellung von biofunktionalisierten und biokompatiblen Oberflächen auf anorganischen bzw. polymeren Substraten müssen ebenfalls neue Verfahren, möglicherweise biotechnologisch gesteuert, entwickelt werden. In der Mikrosystemtechnik erfordert die Miniaturisierung der einzelnen Bauteile aus z.T. ganz unterschiedlichen Materialklassen ebenfalls neue, größtenteils noch zu entwickelnde Herstellungsverfahren, die zu reproduzierbaren Abmessungen und Funktionen führen.

Die Optimierung der Funktionalität von grenzflächenkontrollierten Materialien wird künftig vermehrt über ein spezifisches Grenzflächendesign erfolgen. In dieses fließt eine genaue Kenntnis der atomaren/molekularen Struktur in der Grenzfläche, deren chemische Zusammensetzung, die z.T. durch lokalisierte Segregationsphänomene oder herstellungsbedingte Reaktionen in der Phasengrenzfläche sehr komplex sein kann, sowie ein besseres Verständnis der atomaren/molekularen Wechselwirkungen und der Transportvorgänge (Ionen- bzw. Elektronenleitung, Diffusion) in der Grenzfläche ein. Die chemische und strukturelle Information kann

ansatzweise bereits heute mittels analytischer Verfahren mit lateraler Auflösung im Bereich der Dicke von inneren Grenzflächen (typischerweise weniger als 1 Nanometer) sowie mittels abbildender Methoden mit atomarer Auflösung, unterstützt durch Kontrastsimulation, gewonnen werden. Weitere Fortschritte im Bereich der mikro- und nanoskaligen Analytik zeichnen sich ab.

Computer-Simulationen, wie sie heute bereits auf der Basis von Monte-Carlo- und Molekulardynamischen Methoden zur Berechnung der Korngrenzenstruktur von Metallen, der Heterogrenzfläche Metall/Keramik sowie der Struktur von Grenzflächen in Polymermischungen und Copolymersystemen angewendet werden, werden zukünftig auch im Verständnis und Design von Metall-, Polymer- und Keramiksubstraten einerseits und biologischen Molekülschichten bzw. makromolekularen Schichten andererseits eine wachsende Bedeutung erlangen. Hierfür sind verbesserte Kenntnisse von realistischen Wechselwirkungspotentialen zwischen einzelnen Atomen und Molekülen in der Grenzfläche und deren ortsaufgelöste Analyse der Zusammensetzung und Struktur unabdingbare Voraussetzungen.

Bei den faserverstärkenden Verbundwerkstoffen wird die mikromechanische Modellierung zur Optimierung der Grenzflächenstruktur und -eigenschaften und zur Vorhersage des Versagensverhaltens auf mikroskopischer Ebene zukünftig ebenfalls eine wichtige Rolle spielen.

Längerfristig zu bearbeitende Fragestellungen

- Eigenschaftsanalysen von Grenzflächen(z.B. Ionenleitung)
- Analyse von Raumladungen an Grenzflächen
- Aufklärung der Kopplungschemie bei anorganisch/biologischen, insbesondere halbleitenden/biologischen Grenzflächen
- neue Herstellungs- und Bearbeitungstechnologien für Komponenten der Mikrosystemtechnik, z.T. auf den in der Mikroelektronik etablierten Verfahren aufbauend
- Entwicklung biotechnologischer Verfahren zur Herstellung biologischer Schichten auf anorganischen bzw. polymeren Substraten
- neue Verfahren zur Herstellung nanokristalliner Materialien
- Entwicklung funtionalisierter und vorstrukturierter Schichten für selbstorganisiertes anorganisches Kristallwachstum (Biomineralisation) mit definierter Orientierung und Architektur
- Struktur und Wirkungsweise von spezifischen haftvermittelnden Schichten zwischen Implantatsubstrat und biokompatiblen Oberflächenschichten
- wirtschaftliche Herstellungstechnologien für faserverstärkte Verbundwerkstoffe inkl. Faserherstellung und Aufklärung des Benetzungsverhaltens von Fasern
- mikromechanische Modellierung mit dem Ziel, Grenzflächenstruktur und -chemie zu optimieren
- Elektrochemische Prozeßabläufe (Ladungstransport) und Grenzflächen

Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen

Die mikroanalytische Untersuchung und Modellierung von Grenzflächen erfordert eine Kooperation zwischen Festkörper-, Grenzflächen- und Werkstoffphysik, der Mathematik und theoretischen Festkörperphysik bei komplexen Modellierungen sowie zusätzlich von Biologie und Medizin bei der Entwicklung und Nutzung biokompatibler Implantate. Bei der Herstellung von biologischen Filmen/Oberflächen auf anorganischen bzw. polymeren Substraten ist die Einbindung der Biotechnologie und bioorganischen Chemie erforderlich.

Bei den Verbundstrukturwerkstoffen, deren jeweilige Entwicklung sich bereits frühzeitig an den durch das Bauteil bzw. System definierten Spezifikationen orientieren muß, müssen Physiker, Chemiker, Ingenieure und Konstrukteure zusammenarbeiten.

Anwendungsmöglichkeiten und Produktvisionen

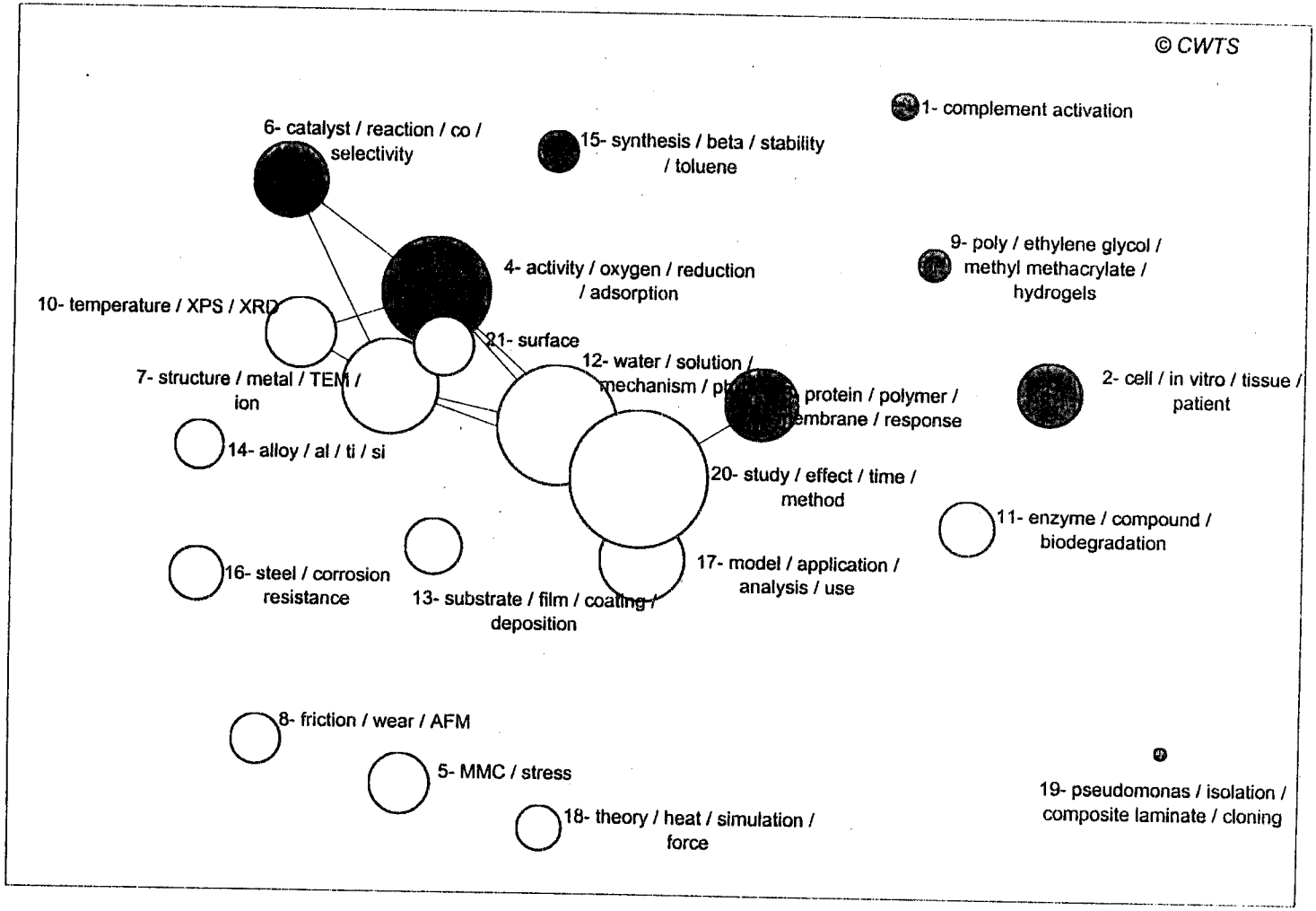
Diese zeichnen sich ab:

- Biosensoren für zum Beispiel Lebensmittel-, Agrar-, Drogenkontrolle ('künstliche Nasen und Gaumen')
- Chemosensoren für pharmazeutische Anwendungen
- bioverträgliche Oberflächenschichten und für das jeweilige Substrat spezifisch wirksame Haftvermittlungsschichten für Implantate im Bewegungsapparat und für Gewebeersatz (für eine Vielfalt von infolge biologischer Unverträglichkeit bislang nicht einsetzbaren Werkstoffen wie z.B. Verbundwerkstoffen)

- Kollagene für Gewebeersatz
- Mikrosysteme für invasive Medizintechnik und chemische Prozeßtechnologien
- Herstellung von organisch (polymeren)/anorganischen (metallischen) Verbundwerkstoffen bzw. Vielfachschichten mit kontrollierten Architekturen, z.B. für optische Anwendungen
- Herstellung von Knochenimplantaten durch Biomineralisation
- Membranen mit verbesserter Ionenleitfähigkeit für Brennstoffzellen
- Faserverbundwerkstoffe im Motoren- und Triebwerksbau (z.B. Metallmatrix-Verbundwerkstoffe für Verbrennungskraftmaschinen, Zylinder, Gehäuse, Turbinenschaufeln)
- kohlenstoffaserverstärkte Kohlenstoffbündel, die durch Siliciumcarbidumhüllungen vor Oxidation geschützt sind, zum Einsatz in Bremsscheiben, Hitzeschildern und verschleißfesten Bauteilen, wie z.B. Düsenstrukturen sowie Nanocomposites
- Aktive Dämpfungselemente durch Kombination von Struktur- und Funktionswerkstoffen

Übersichtskarte „Grenzflächenbestimmte Materialien" (1994-1996)

Die Fläche der in der Karte wiedergegebenen Kreise für Teilgebiete ergibt sich aus der Anzahl der ihnen zuzuordnenden Publikationen. Ein geringer Abstand zwischen den Kreisen weist auf enge thematische Bezüge hin (zahlreiche gemeinsame Schlüsselbegriffe). Teilgebiete, in denen die Aktivitäten gegenüber dem Zeitraum 1991 - 1993 zunehmen, sind dunkelgrau gekennzeichnet (hellgrau: weitgehend gleichbleibende Aktivitäten).



Erläuterung zur Übersichtskarte "Grenzflächenbestimmte Materialien"[12]

Für das Forschungsfeld "Grenzflächenbestimmte Materialien" wurden mit der bibliometrischen Analyse 40.000 Publikationen im Zeitraum von 1991-96 und damit der größte Datensatz erfaßt.[13] In den Jahren 1991-93 wurden 15.000 und von 1994-96 25.000 Publikationen veröffentlicht; es ist also eine Zunahme um knapp 70 % zu verzeichnen. Die Übersichtskarte "Grenzflächenbestimmte Materialien" zeigt 21 Teilgebiete.

Ein Teilgebiet weist im Zeitraum 1991-96 15.000 Publikationen (20), ein weiteres über 10.000 Publikationen auf (12; vgl. Übersicht A1); beide sind jedoch recht unspezifisch für das Gebiet. 8 Teilgebiete haben eine hohe Dynamik; unter den großen Teilgebieten zählen dazu 4 (9.000 Veröffentlichungen), bei den mittelgroßen Teilgebieten 2, 3 und 6, bei den kleineren Teilgebieten 1, 9, 15 und 19.

Bei der Betrachtung der Zahl der Publikationen nach Ländern fällt noch stärker als bei den anderen Forschungsfeldern die durchgängig führende Rolle der Vereinigten Staaten und Japans auf. Bis auf wenige Ausnahmen folgen dann Großbritannien (2 mal Rang 2, 8 mal Rang 3, 4 mal Rang 4), Deutschland (7 mal Rang 3, 10 mal Rang 4) und Frankreich (5 mal Rang 3, 5 mal Rang 4). Nur im kleinsten Teilgebiet (19)

---

[12] Zur Methode der bibliometrischen Kartierung vgl.Kap. 2.4.

[13] Dabei wurde das Thema nicht auf "innere Grenzflächen", wie in der wissenschaftlichen Analyse geschehen, beschränkt.

ist Deutschland nicht unter den führenden fünf Staaten vertreten (Rang 6).

Vergleicht man die Zeiträume 1991-93 und 1994-96 miteinander, so entsprechen die Aktivitäten in Deutschland ganz überwiegend der allgemein festzustellenden hohen Dynamik; nur die Teilgebiete 10, 13, 16 und 18 bleiben zurück.[14]

Übersicht A1:
Zahl der Publikationen pro Teilgebiet[15]

Teilg.	1991-93	1994-96	Insg.	Name
1	141	393	534	complement activation
2	753	2.215	2.968	cell / in vitro / tissue / patient
3	1.208	2.868	4.076	protein / polymer / membrane / response
4	2.679	6.291	8.970	activity / oxygen / reduction / adsorption
5	983	1.995	2.978	MMC / stress
6	1.291	3.029	4.320	catalyst / reaction / co / selectivity
7	2.510	4.937	7.447	structure / metal / TEM / ion
8	605	1.327	1.932	friction / wear / AFM
9	229	595	824	poly / ethylene glycol / methyl methacrylate / ...
10	1.311	2.731	4.042	temperature / XPS / XRD
11	778	1.688	2.466	enzyme / compound / biodegradation
12	3.478	7.739	11.217	water / solution / mechanism / ph
13	859	1.728	2.587	substrate / film / coating / deposition
14	789	1.320	2.109	alloy / al / ti / si
15	387	918	1.305	synthesis / beta / stability / toluene
16	954	1.665	2.619	steel / corrosion resistance
17	1.855	4.004	5.859	model / application / analysis / use
18	519	1.104	1.623	theory / heat / simulation / force
19	43	102	145	pseudomonas / isolation / composite laminate /...
20	4.651	10.356	15.007	study / effect / time / method
21	876	1.938	2.814	surface

[14] Die am Ende des Kapitels 1.1. gegebenen methodischen Hinweise zur bibliometrischen Erfassung von *Aktivitäten* im Unterschied zu Leistungen bzw. Wirkungen gelten auch in diesem Fall.

[15] Die Gesamtzahl der nachstehend genannten Publikationen ist wegen ihrer Mehrfachzuordnung zu unterschiedlichen Teilgebieten höher als die Zahl der erfaßten Publikationen.

Übersicht A2:
Rangfolge der Länderaktivitäten
nach Zahl der Publikationen in den Teilgebieten
(Positionen 1-5)

Teilgeb. / Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA
2	J	J	J	J	GB	J	J	J	J	J	J
3	D	GB	GB	F	J	F	F	D		F	D
4	GB	D	F	D	D	GB	D	F	D	D	GB
5	F	F	D	GB	F	D	GB	GB	CHIN	CHIN	F

Teilgeb. / Position	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA	USA
2	J	J	J	J	J	GB	J	J	J	
3	GB	GB	D	D	GB	D	GB	GB	GB	D
4	D	F	GB	F	D	J	D	CAN	D	F
5	F	D	F	GB	India	F	F	S	F	GB

Bei der Analyse wurden Datenbanken aus den Disziplinen Chemie, Biotechnologie, Biochemie und Biophysik, Neurowissenschaften und Materialwissenschaft berücksichtigt.

Weitere umfangreiche Daten finden sich im Internet unter http://sahara.fsw.leidenuniv.nl/ed/intro1.html.

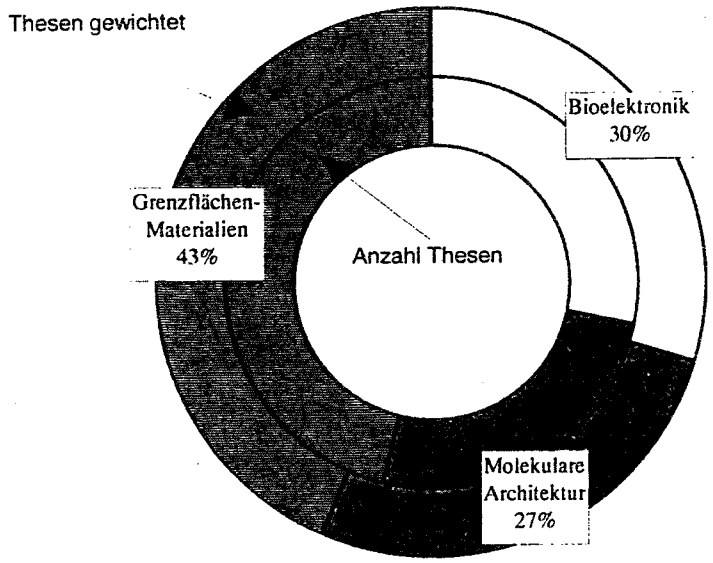
1.4. Ergebnisse der Delphi-Befragung

Um den Aufwand zu minimieren, hat die Arbeitsgruppe keine eigene Erhebung nach der Delphi-Methode durchgeführt. Vielmehr wurde die vorliegende Untersuchung des BMBF aus dem Jahre 1993 (Publikationsjahr) nachträglich dahingehend ausgewertet, welche Erkenntnisse für die drei betrachteten Gebiete der Pilotstudie daraus gewonnen werden können. Vorteilhaft ist bei dieser Vorgehensweise, daß man vergleichbare Erhebungen in drei Ländern (Deutschland, Japan und Frankreich) heranziehen kann und damit auch zu einer interkulturellen Absicherung kommt. Die Nachteile liegen in der geringeren Aktualität (die Umfrage wurde bereits 1992 durchgeführt) und dem Umstand, daß die damalige Befragung nicht auf die Untersuchungsgebiete dieser Prospektionsstudie zugeschnitten war.

1.4.1. Repräsentationsgrad der Umfrage

Unter den 1147 Thesen der Umfrage zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik nach der Delphi-Methode von 1993 wurden 56 Thesen als für die drei Untersuchungsgebiete zutreffend erkannt, das sind immerhin fast 5 % der Umfrage. Acht Mitglieder der Arbeitsgruppe haben diese Thesen den drei Untersuchungsgebieten zugeordnet, zum Teil mehrfach. Dabei zeigt sich, daß erhebliche Überlappungen bestehen und 19 der 56 Thesen zweifach, drei sogar allen drei Gebieten zugeordnet werden müssen. Ferner wurden die Thesen gewichtet, um eine große bzw. mittlere Einschlägigkeit für die Untersuchungsgebiete der Pilotstudie zu unterscheiden.

Abbildung 1: Verteilung der Delphi-Thesen auf die drei Untersuchungsgebiete der Pilotstudie[16]



Die Verteilung der Delphi-Thesen auf die drei Untersuchungsgebiete ist annähernd uniform, wobei allerdings das Gebiet grenzflächenbestimmte Materialien in der BMBF-Untersuchung stärker repräsentiert war. Gewichtet man allerdings nach Einschlägigkeit, so bleibt diesem Gebiet ein Anteil von 43 % an allen ausgewählten Thesen, der geringer ist als die Anzahl der Thesen. Die Thesen zur Molekular- und Bioelektronik und zur molekularen Architektur sind mithin einschlägiger für die ausgewählten Gebiete, aber nicht so zahlreich.

---

[16] Das Gebiet "Molekular- und Bioelektronik" wird nur "Bioelektronik" genannt, das Gebiet "Durch innere Grenzflächen bestimmte Materialien" nur "Grenzflächenmaterialien".

1.4.2. Merkmale der Untersuchungsgebiete

Die Delphi-Untersuchung ist in 16 disziplinäre Fragebögen aufgeteilt worden, die von Material- und Biowissenschaften über die Großgerätephysik bis zum Verkehrswesen, der Raumfahrt und der Medizin reichen. Eine Gegenüberstellung der ausgewählten Thesen mit der Gesamtheit der Umfrage würde daher erhebliche Fragen der Vergleichbarkeit aufwerfen, so daß die Arbeitsgruppe beschlossen hat, als Grundgesamtheit für eine Gegenüberstellung nicht die ganze Delphi-Umfrage, sondern nur die beiden Fragebögen zur Materialforschung und zu den Biowissenschaften heranzuziehen. Für den disziplinären Hintergrund der gewählten Untersuchungsgebiete ist allerdings zu beachten, daß einzelne Thesen weder aus dem disziplinären Fragebogen der Material- noch der Biowissenschaften entstammen, sondern zum Beispiel im Fragebogen zur Festkörperphysik, zur Elektronik oder zur Medizin enthalten sind. Dies unterstreicht die interdisziplinäre Verankerung der drei untersuchten Gebiete.

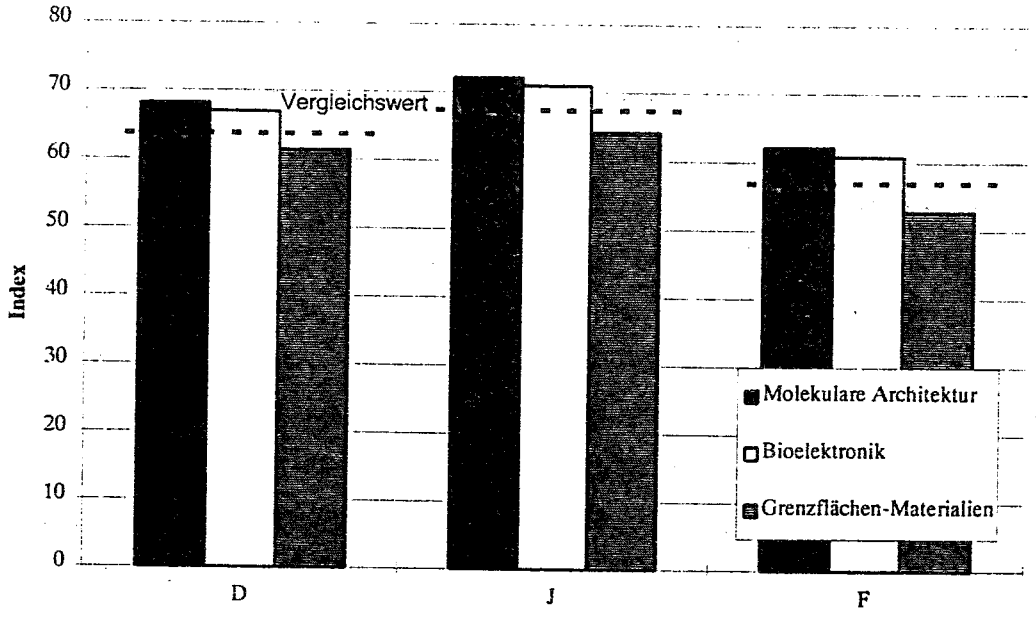
Über die Interdisziplinarität hinaus ergeben sich weitere Merkmale aus der BMBF-Befragung dadurch, daß man die diversen Antwortkategorien der im Jahre 1992 befragten Experten ökonometrisch auf Auffälligkeiten hin untersucht.[17]

---

[17] Mit einem Probit-Modell können sämtliche Antworten gemäß der dreifach binären Unterscheidung: "Gehört zur molekularen Architektur, zur Molekular- und Bioelektronik oder zu den grenzflächenbestimmten Materialien" regressionstechnisch untersucht werden. Damit kann die Signifikanz der Unterschiede festgestellt werden, was durch ein bloßes Betrachten der Mittelwerte nicht möglich ist.

Die Fachleute stuften ihren Kenntnisstand zu jeder These nach den Kategorien "höchste Kenntnis, da mein eigenes Arbeitsgebiet", "mittlere Kenntnis, da mit der Primärliteratur vertraut" oder "geringe Kenntnis, da nur über Diskussionen oder aus der Sekundärliteratur vertraut" ein; der daraus errechnete Kenntnisindex fällt also immer dann hoch aus, wenn viele aktiv Forschende in der Stichprobe waren. Demnach haben die Antwortenden aus Deutschland einen signifikant niedrigeren Kenntnisstand im Bereich der Molekular- und Bioelektronik angegeben (nach Eigeneinschätzung). Das bedeutet nicht, daß der Kenntnisstand der deutschen Forschung auf diesem Gebiet besonders niedrig wäre, sondern dies bedeutet, daß die beiden anderen Gebiete bereits jetzt besser erforscht werden, denn der momentane Kenntnisstand bei einer repräsentativ ausgewählten Menge von Befragten gründet sich auf eigene Forschungserfahrungen.

Abbildung 2: Geschätzte Wichtigkeit der drei Untersuchungsgebiete nach der Umfrage von 1993 (gemäß den Erhebungen in Deutschland „D", Japan „J" und Frankreich „F"; Vergleichswert: gesamte Bio- und Materialwissenschaften)



In der Umfrage wurde die Wichtigkeit für den Fortschritt der Wissenschaft selbst, für die Wirtschaft oder die Gesellschaft in allen drei Ländern erfragt (Deutschland, Japan und Frankreich). Die Mittelwerte der Thesen ergeben zwar etwas unterschiedliche Absoluteinschätzungen der Wichtigkeit, jedoch keinen interkulturellen Unterschied in der Reihung der Gebiete: am wichtigsten werden die prospektiven Projekte im Bereich der molekularen Architektur sowie der Molekular- und Bioelektronik eingestuft. Die Projekte im Bereich der durch innere Grenzflächen bestimmten Materialien werden als weniger wichtig verstanden; der entsprechende Index liegt auch unterhalb des Vergleichswerts der gesamten Disziplinen. Aus den Umfragedaten in Deutschland ergibt sich, daß der Unterschied

in der Einstufung zwischen den durch innere Grenzflächen bestimmten Materialien und den übrigen beiden Gebieten signifikant ausfällt, während die molekulare Architektur und die Molekular- und Bioelektronik in dieser Hinsicht nicht signifikant zu unterscheiden sind.[18]

Die Expertenumfrage macht auf ein allgemeines Dilemma im Zusammenhang mit der Beurteilung der prospektionsrelevanten Kenntnisse in Deutschland aufmerksam: die Einschätzung der Wichtigkeit korreliert mit dem nationalen Kenntnisstand. Es ist bekannt, daß Gutachter auf denjenigen Forschungsgebieten, die sie überblicken, zutreffender urteilen können als anderswo. Dies ist bei interdisziplinären Gebieten häufig damit verbunden, daß Schwerpunktbildungen der Vergangenheit sich leichter perpetuieren lassen als (für das Land) neue Themen an den Rändern der jeweiligen Disziplinen. Dieser meist nur qualitativ beschriebene Sachverhalt kann durch die Umfrage für die drei hier betrachteten Gebiete belegt werden: auf einem Signifikanzniveau von < 0,1 % korreliert der selbst eingeschätzte Kenntnisstand in den einzelnen prospektiven Projekten mit der Einschätzung ihrer Wichtigkeit. Außerdem werden diejenigen Thesen für besonders wichtig erachtet, bei denen gleichzeitig die Einschätzung vorherrscht, daß in Deutschland genügend ausgebildetes Humankapital zur Verfügung steht. Dieser Befund unterstreicht über die Einzelaussage zur vorliegenden Pilotstudie hinaus den Sinn des Einsatzes von Prospektionsmethoden überhaupt,

---

[18] Dies ergibt sich aus dem oben erwähnten Probit-Modell, das alle Antwortkategorien zwischen den drei Gebieten simultan vergleicht. Das Signifikanzniveau der erwähnten robusten Schätzung ist kleiner als 1 %.

vor allem solcher, zu denen viele Sachkenner aus verschiedenen Disziplinen beitragen.

1.4.3. FuE-Stand in Deutschland und Globalisierungsaspekte

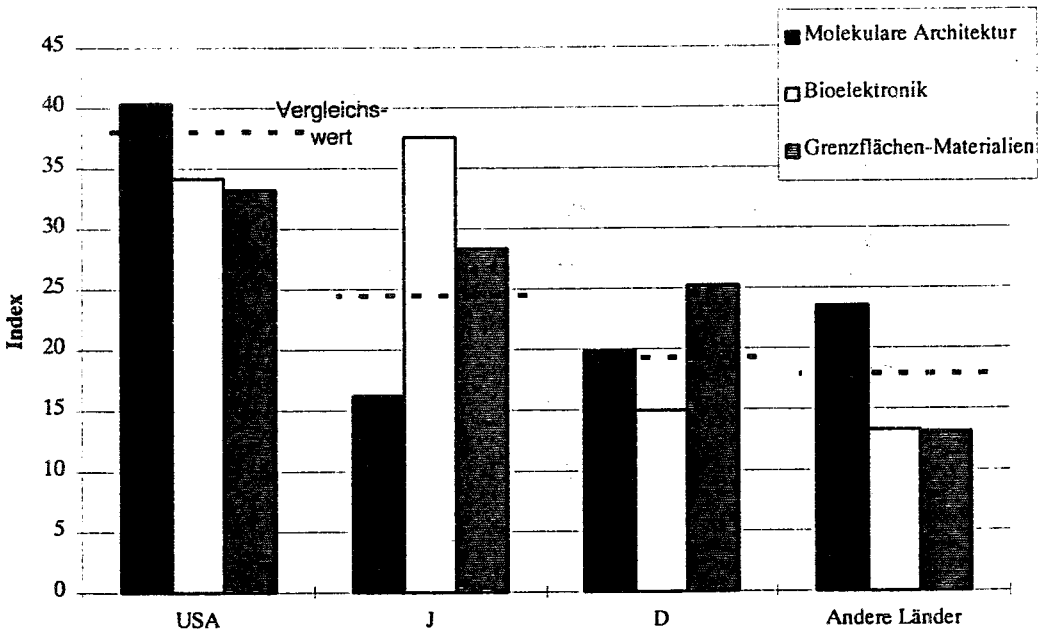
Bestandteil der Befragung war die Erhebung des momentanen FuE-Stands in Deutschland im Vergleich zu anderen Ländern pro Einzelthese. Zwar sind Antworten auf diese Frage im Einzelfall schwierig und die Zahl der auswertbaren Antworten entsprechend geringer.[19] Die Stichprobengüte ist für belastbare Aussagen jedoch noch gut genug. Die Mittelwerte zur Einschätzung des FuE-Leistungsstands beziehen sich auf das Jahr 1992 und brauchen nicht notwendigerweise den heutigen Einschätzungen zu entsprechen.
Als generell führend werden die Vereinigten Staaten angesehen, vor allem im Gebiet der molekularen Architektur. Japan wird als besonders stark im Gebiet der Molekular- und Bioelektronik eingestuft, gleichauf oder den USA leicht überlegen. Deutschlands Stärke liegt im Bereich der durch innere Grenzflächen bestimmten Materialien, wo im Vergleich zu den Gesamtdisziplinen ein deutlich überdurchschnittlicher FuE-Stand reklamiert wird. Im Bereich der molekularen Architektur ist er wie in den sonstigen Disziplinen einzuschätzen, während im Bereich der Molekular- und Bioelektronik ein Rückstand diagnostiziert wird. Dies paßt gut mit dem niedrigeren Kenntnisstand zusammen und unterstreicht erneut das Dilemma der Evaluation durch

---

[19] Insgesamt liegen mit geringen Schwankungen etwa 160 auswertbare Antworten pro Thema vor; zur Frage des FuE-Standes nur etwa drei Viertel davon.

Fachgutachter außerhalb ihres eigenen Gebiets. Anderen Ländern als den drei genannten wird vor allem im Bereich der molekularen Architektur ein hoher Stand zugebilligt; leider geben die Umfragedaten keine näheren Hinweise darauf, welche Länder gemeint sind.

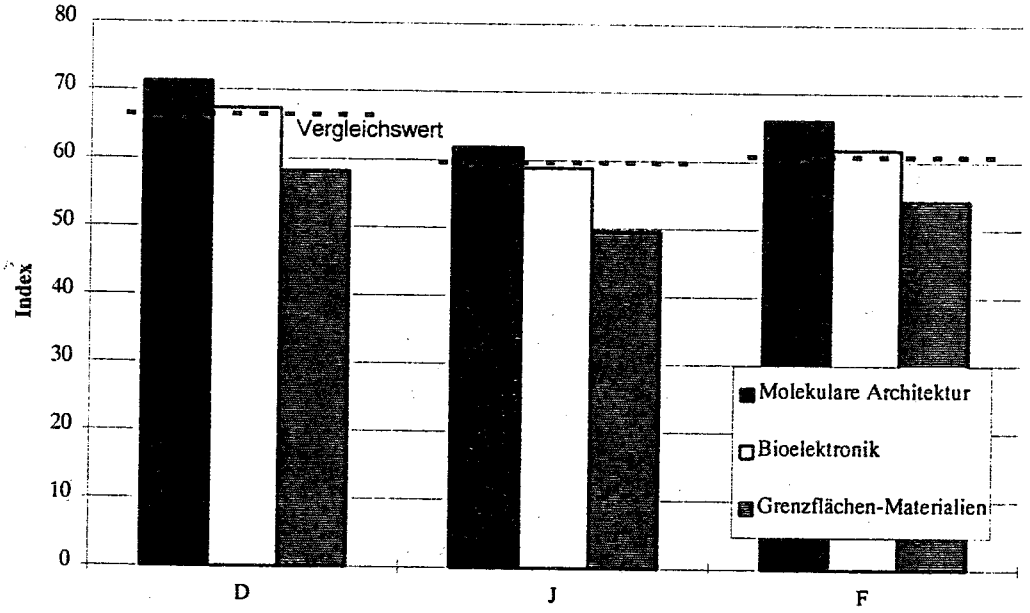
Abbildung 3: FuE-Leistungsstand in führenden Ländern nach Prospektionsgebieten (deutsche Einschätzung von 1992)



Seit Jahrzehnten sind wichtige Gebiete der Forschung wie etwa die Hochenergiephysik oder die Raumfahrtforschung internationalisiert. Zunehmend ergreift die Forschungsstätten der Privatwirtschaft ebenfalls eine Globalisierungswelle. Im Rahmen der Befragung wurde auch erhoben, inwieweit die internationale Kooperation ein Erfolgsrezept für die prospektiven Themen darstellt. Im Ergebnis

zeigt Abbildung 4 hohe Werte, die teilweise noch höher als die Vergleichswerte liegen. Eine besonders hohe Notwendigkeit zur internationalen Zusammenarbeit wird im Bereich der molekularen Architektur erkannt, eine besonders geringe im Bereich der durch innere Grenzflächen bestimmten Materialien. Wiederum ist die Einschätzung in Deutschland, Japan und Frankreich nach Absolutwerten

Abbildung 4: Einschätzung der Delphi-Experten zur Notwendigkeit der internationalen Kooperation

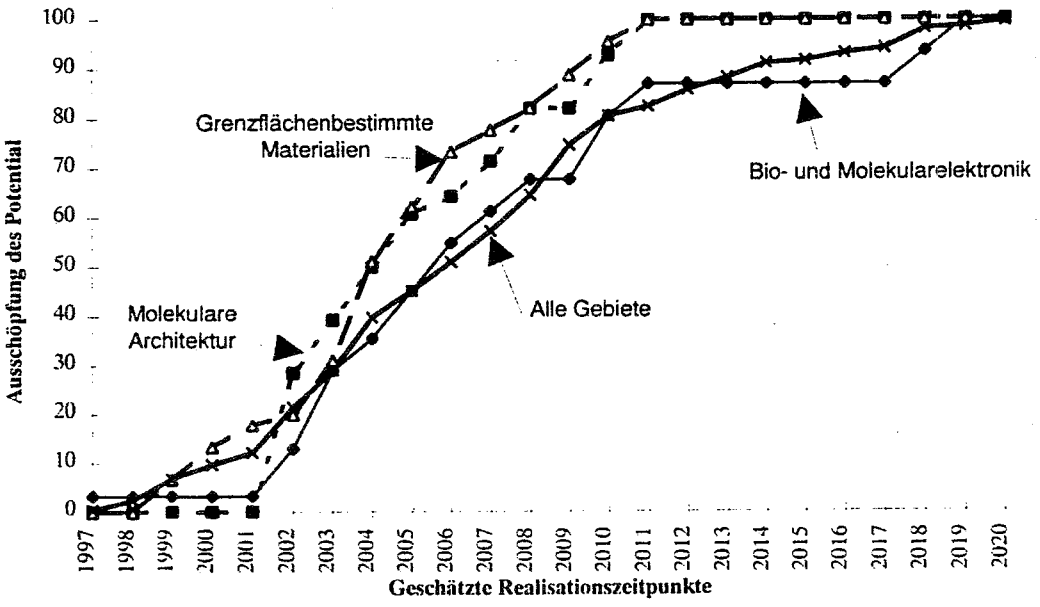


leicht unterschiedlich, der Rangfolge der drei Prospektionsgebiete nach jedoch identisch. Die europäischen Länder schätzen die Notwendigkeit der internationalen Zusammenarbeit (in Europa) naturgemäß höher ein als die Science Community auf den japanischen Inseln. Prospektive Forschungsförderung im nationalen Rahmen sollte diesem Umstand Aufmerksamkeit schenken.

1.4.4. Zeithorizonte in den Prospektionsgebieten

Die Arbeitsgruppe hat sich vorgenommen, für die Prospektionsaufgabe in der Pilotstudie Gebiete auszuwählen, die in der Grundlagenforschung verankert sind, aber gleichzeitig ein anwendungsorientiertes Potential in mittelfristiger Hinsicht von ungefähr 10 bis 15 Jahren aufweisen. Anhand der Daten läßt sich prüfen, ob die selbst gestellte Aufgabe auch von der größeren Gruppe der 1992 schriftlich Befragten geteilt wird. Abbildung 5 verdeutlicht, daß in der Tat der Großteil der Thesen einen Realisierungszeitpunkt zwischen etwa 2002 und 2011 aufweist und im Mittel zehn Jahre in der Zukunft liegt, vom Zeitpunkt der Beratungen der Gruppe aus gerechnet. Dies trifft den Erwartungshorizont ziemlich genau.

Abbildung 5:Zeitliche Dynamik der Prospektionsgebiete
(nach deutscher Einschätzung von 1992)



Die zeitliche Dynamik in den Gesamtgebieten der Material- und Biowissenschaften wird ähnlich eingeschätzt. Die Molekular- und Bioelektronik unterscheidet sich von den gesamten Disziplinen im wesentlichen darin, daß in den nächsten fünf Jahren ein geringeres Ausschöpfungspotential besteht und auch ein letzter Teil an denkbaren Lösungen besonders lange auf sich warten läßt. Demgegenüber sind sowohl die durch innere Grenzflächen bestimmten Materialien wie auch die molekulare Architektur am Anfang des nächsten Jahrhunderts von stärkerer Dynamik gekennzeichnet, was vor allem für die letztere gilt.

Die einzelnen Thesen lassen sich in zeitlicher Hinsicht signifikant unterscheiden:[20] je weiter in die Zukunft eine These projiziert wird, desto niedriger wird der FuE-Stand in Deutschland eingeschätzt. In Teilthemen, in denen die deutsche Fachwelt sich heute bereits besonders viel zutraut, wird also auch mit früherer Realisierung gerechnet. Besonders früh ist ferner dann mit einem praktischen Durchbruch zu rechnen, wenn die Kosten kein Hemmnis darstellen und Vorschriften, Gesetze oder sonstige Regelwerke die Markteinführung nicht behindern. Da die an der Umfrage beteiligten Fachleute den statistischen Zusammenhang ihrer Einzelantworten nicht kennen konnten und im übrigen die Befragung vor den Beratungen und dem Zuschnitt der Prospektionsgruppe stattfand, handelt es sich bei diesem Ergebnis um einen echten Blindversuch, der die hohe Plausibilität der Schätzungen unterstreicht. Der ge-

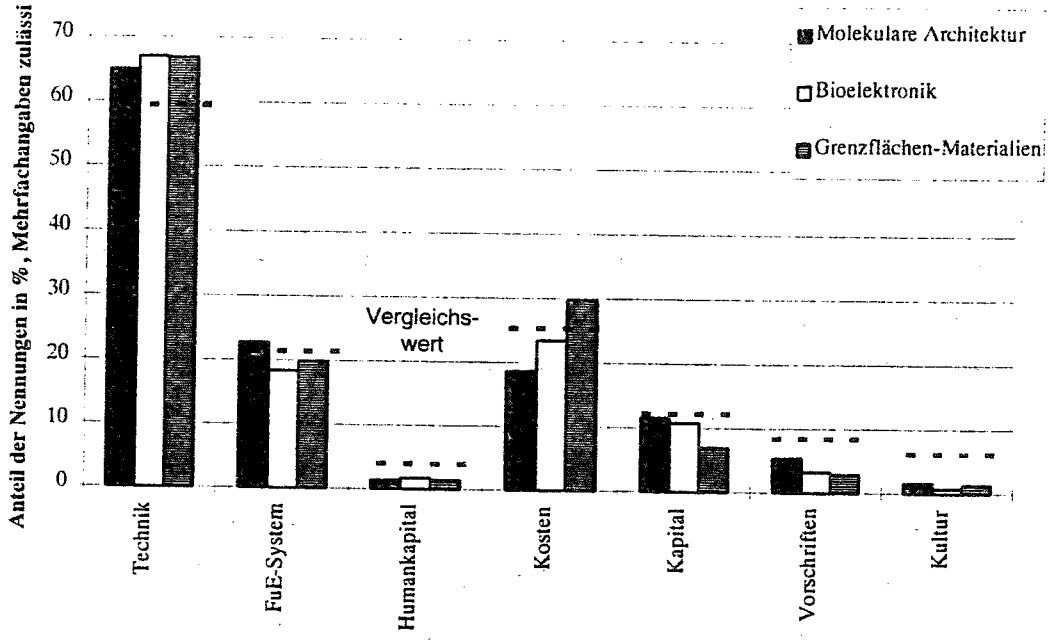
[20] Grundlage ist ein lineares multiples Regressionsmodell sämtlicher Delphi-Daten.

fundene Zusammenhang zur Erklärung früherer oder späterer Realisierung gilt für alle drei Prospektionsgebiete gleichermaßen.

1.4.5. Ansatzpunkte für Fördermaßnahmen

In der Umfrage nach der Delphi-Methode wurden die wichtigsten Hemmnisse erhoben, die einer baldigen Realisierung des jeweiligen Themas entgegenstehen und die es abzubauen gilt, falls das jeweilige Projekt aus forschungs- oder technologiepolitischer Perspektive beschleunigt werden soll. Es wurden sowohl innerwissenschaftliche Hemmnisse betrachtet, die in der Natur der Materie selbst liegen (wissenschaftlich-technische Problematik), wie auch der Zustand des FuE-Systems (Einrichtungen der Wissenschaftsorganisationen etc.), die Verfügbarkeit von spezifisch ausgebildeten Personen (Humankapital), die Kostensituation, Schwierigkeiten der Kapitalbeschaffung (zum Beispiel Risikokapital für Innovatoren), das Gesetzeswerk (inklusive Normen und Vorschriften) sowie kulturelle und gesellschaftliche Hemmnisse, die in moralischen oder anderen Kategorien liegen.

Abbildung 6: Realisierungshemmnisse in den Prospektionsgebieten nach der deutschen Umfrage 1992



In allen Gebieten wie auch in den ausgewählten Prospektionsgebieten werden die innerwissenschaftlichen Schwierigkeiten ("Technik" in Abb. 6) am häufigsten genannt.[21] Es liegt also jeweils eine große Herausforderung vor, wissenschaftlich-technische Durchbrüche zu erzielen. In den Prospektionsgebieten der Pilotstudie liegt der Hinweis auf technische Umsetzungsschwierigkeiten noch einmal deutlich und signifkant höher als in allen Gebieten. In den Prospektionsgebieten - wohl wegen ihrer Interdisziplinarität - sind Wissenschaft (für die Grundlagen) und Technik (für die Anwendungspotentiale) in besonderer Weise herausgefordert. Zwischen den drei Gebieten sind in

[21] Multiple Antworten zulässig, daher addieren sich die Prozentzahlen auf mehr als 100 %.

dieser Beziehung keine signifikanten Unterschiede festzustellen.

An zweiter Stelle werden im Bereich der molekularen Architektur Unzulänglichkeiten im FuE-System in Deutschland genannt, während im Bereich der durch innere Grenzflächen bestimmten Materialien eine ungünstige Kosten-Nutzen-Situation befürchtet wird. Auch im Bereich der Molekular- und Bioelektronik stellen die Kosten wohl das größere Problem dar im Vergleich zur institutionellen Infrastruktur. Diese Unterschiede der relativen Einschätzung dieser beiden Kategorien zueinander ist signifikant.[22]

Im Mangel an investivem Kapital wird ebenfalls ein Hemmnis gesehen, das allerdings komplementär zu den Kosten eingestuft wird. Daß das heutige Gesetzes- und Regelwerk eine Ausschöpfung der wissenschaftlich-techischen Potentiale verhindert, kann hingegen nur in wenigen Gebieten behauptet werden und ist jedenfalls weniger wichtig als in anderen Gebieten der Bio- oder Materialforschung. Zu den hemmenden Vorschriften, die etwa die Projekte der molekularen Architektur betreffen, gehören vor allem Vorschriften im Bereich der medizinischen Diagnostik und im klinischen Bereich.

In dem Maße, wie in der Umfrage Hemmnisse genannt werden, kommen forschungs- und technologiepolitische Maßnahmen in Betracht. In den drei ausgewählten Prospektionsgebieten müßten sich diese vor allem auf überkritische Kapazitäten

---

[22] Gemäß dem bereits erwähnten Probit-Modell

in Forschung und Entwicklung selbst richten, da bei der Realisierung der denkbaren Lösungen in Labor und Praxis die größten Schwierigkeiten gesehen werden. In mehreren Fällen ist der institutionelle Rahmen unzureichend bzw. es wird kein günstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis gesehen. Werden die Gebiete als prioritär verstanden, müßte eine zukünftige Markteinführung wohl subventioniert werden. Insgesamt zeichnet die Delphi-Befragung ein mit den qualitativen Bewertungen im Einklang befindliches, hoch differenziertes und belastbares Bild der mutmaßlichen Entwicklung in den ausgewählten Gebieten in den nächsten 10 bis 15 Jahren. Über Plausibilität hinaus können Einschätzungen erhalten werden, die anderweitig - und insbesondere von einer kleinen Gruppe - kaum zu bekommen sind. Der länderübergreifende Vergleich sichert die Aussagen darüber hinaus ab. Ein gezielter Einsatz von Delphi-Befragungen für ausgewählte Fragestellungen zukünftiger Prospektionsstudien sollte daher erwogen werden.

2. Methoden und Verfahren

2.1. Ziele und Perspektiven

(1) Notwendigkeit

Ziel einer Forschungsprospektion ist es, solche Aufgaben insbesondere mit interdisziplinärem Charakter zu identifizieren, die sich mittelfristig[23] zu zentralen Herausforderungen und Problemen in Forschung und Technologie entwickeln können. Ihre wissenschaftliche Bedeutung sowie Notwendigkeit und Form ihrer Bearbeitung müssen dabei rechtzeitig, d.h. möglichst früh, begründet und bestimmt werden. Dabei verdienen Gebiete mit hohem Anwendungs- und Nutzungspotential in Wirtschaft oder Gesellschaft besondere Aufmerksamkeit. Auf diese Weise kann neben der wissenschaftlichen auch die technologische und wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit gesichert werden.

(2) Prospektive Analysen und Studien

Ziel entsprechender prospektiver Analysen und Studien ist es, grundlegende Fragestellungen, Anwendungsmöglichkeiten sowie eine Reihe von forschungspolitischen Aspekten in bestimmten Feldern zu prüfen und dabei auch die Eignung der vorhandenen Forschungspotentiale für ihre Bearbeitung zu berücksichtigen. In den Studien gilt es, so läßt sich zusammenfassen, Themen und Aufgaben der anwendungsorientierten Grundlagenforschung zu bestimmen, die

---

[23] Unter "mittelfristig" wird ein Zeitraum von 10 bis 15 Jahren verstanden.

- von herausragender wissenschaftlicher Bedeutung sind,
- interdisziplinären Charakter haben,
- mit ihren wissenschaftlich-technologischen Ergebnissen wirtschaftliche oder gesellschaftliche Anwendungsmöglichkeiten eröffnen,
- Forschung in mehreren Sektoren, d.h. in wissenschaftlichen Einrichtungen und in Unternehmen einbeziehen können.

(3) Wissenschaftssystem und Innovationssystem

Prospektion bezieht sich damit zum einen auf Forschung im Wissenschaftssystem, zum andern auch auf die Interaktion zwischen Wissenschafts- und Innovationssystem. Wesentlicher Bestandteil des Wissenschaftssystems ist die öffentlich und privat finanzierte Forschung, die der Erzeugung neuen Wissens dient. Dieses neue Wissen kann für Innovation genutzt werden oder wird dazu gezielt erzeugt; insofern ist von Anwendung zu sprechen. Unter technischer Innovation sind dabei "alle *technisch* neuen oder verbesserten Produkte und Verfahren und deren Einführung in den Markt bzw. in die Produktion (zu verstehen), die überwiegend auf Forschung und Entwicklung zurückführbar sind"[24]. Deshalb gelten die Grundfragen prospektiver Analysen zum einen den längerfristig zu bearbeitenden Fragestellungen

---

[24] BMFT: Deutscher Delphi-Bericht zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik, Bonn 1993, S. 3. Zum Innovationsbegriff vgl. auch Hauschildt, Jürgen: Keine Scheu vor dem Unbekannten. Innovation als Überschreitung gegebener Grenzen. In: Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft: Wirtschaft & Wissenschaft, 3/1996, S. 44 ff.

zur Erzeugung neuen Wissens, zum anderen den damit verbundenen Anwendungsmöglichkeiten.

Es ist zu beachten, daß sich Innovationsprozesse nicht linear-sequentiell vollziehen[25]; sie sind häufig nicht planbar. Sie beruhen auf komplexen Wechselwirkungen zwischen Grundlagen- und angewandter Forschung sowie experimenteller Entwicklung auf der einen mit weiteren Einflußfaktoren des Innovationsprozesses auf der anderen Seite (Innovationstrategien von Unternehmen, Marktanforderungen, Produktverbesserungen).[26] Technologische Durchbrüche werden außerdem oft überraschend erzielt.

(4) Forschungs- und technologiepolitische Funktion

Dem Instrument der Forschungsprospektion kann eine erhebliche Bedeutung für die Verständigung über herausragende und mittel- und langfristig zu bearbeitende Themen in Forschung und Technologie und ihre Nutzung im Innovationsprozeß zukommen. Während andere europäische Staaten seit Ende der 80er Jahre *Research* bzw. *Technology Foresight* - in verschiedenen Spielarten und zum Teil in gro-

---

25 Eine traditionelle Vorstellung geht von der Reihenfolge Wissenschaftliche Forschung - Produktentwicklung - Produktion - Vermarktung aus.

26 "Technik ist nicht mehr nur ein Anwendungsfall von Wissenschaft, vielmehr ist die Wissenschaft durch die Technik und durch neuartige Technologien - und die mit ihnen gegebene Beobachtungsgenauigkeit und Beherrschung von Komplexität - entscheidend vorangetrieben worden." Wissenschaftsrat: Empfehlungen zu einer Prospektion für die Forschung, a.a.O., S. 9.

ßer Breite - einsetzten[27], wurde das Instrument in Deutschland teils aufgeschlossen aufgenommen, teils mit methodischem Zweifel konfrontiert. Im Vordergrund der Diskussion standen zwei Aspekte, nämlich der Wert von Aussagen über Forschungsaufgaben und -ziele und die Einbettung einer Forschungsprospektion in bestehende forschungspolitische Strukturen.

Zu diesen beiden Aspekten läßt sich feststellen:

a) Forschungsprospektion ist kein Instrument, um Forschungsergebnisse vorherzusagen; künftige wissenschaftliche Erkenntnisse können nie gesichert vorhergesagt werden, und es werden immer wieder völlig überraschende Ergebnisse gefunden[28]. Bei prospektiven Analysen und Empfehlungen handelt es sich insofern um Prognosen als "begründete Aussagen über erwartbare zukünftige Sachverhalte" formuliert werden. Es geht dabei nicht um die Frage, ob solche Aussagen *sicher* oder *unsicher* sind, vielmehr ist entscheidend, daß das Eintreten zukünftiger Sachverhalte relativ zu einem (immer gegenwärtigen) Wissen *erwartet* werden kann. Es besteht daher nicht die Aufgabe 'die Zu-

---

27 Vgl. Martin, Ben, Irvine, John: Research Foresight. Priority Setting in Science. London, New York 1989.

28 Dies betonten bereits die "Väter der Prospektion" in der RAND-Corporation Ende der 40er Jahre. - Vgl. auch Renn, Ortwin: Kann man die technische Zukunft voraussagen? Zum Stellenwert der Technikfolgenabschätzung für eine verantwortbare Zukunftsvorsorge. In: Pinkau, Stahlberg (Hgg.): Technologiepolitik in demokratischen Gesellschaften. Stuttgart 1996, S. 23-51, insb. S. 33 f.

kunft zu erkennen', sondern unseren gestaltenden Umgang mit der Zukunft zu optimieren.[29]

In einem weiteren Sinne geht es um eine Verständigung über gegenwärtige und mutmaßlich zukünftige Voraussetzungen und Wirkungen von Forschung und Technologie - in Anerkennung der Offenheit der Zukunft und der notwendigen Autonomie der Grundlagenforschung. So kommt es bei prospektiven Studien und Analysen zunächst vor allem auf den Prozeß an, in dem Aussagen gewonnen werden. Prospektion ist insbesondere bei interdisziplinären Themen Anlaß für Wissenschaftler, über neuartige Themen und wissenschaftspolitische Aufgaben zu kommunizieren und sich dabei auf mittelfristige Ziele zu konzentrieren. Die eingehende Abstimmung kann zu einem sonst nicht erzielbaren Konsens über künftige Forschungsziele und deren Bearbeitung führen.[30]

---

29 Vgl. zum Begriff "Prognose": Albers, Willi et al. (Hgg.): Handwörterbuch der Wirtschaftswissenschaft (HdWW). Stuttgart, New York 1977, Bd. 6., S. 334 ff. und Europäische Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen: Technikfolgenbeurteilung der Erforschung und Entwicklung Neuer Materialien. Perspektiven in der Verkehrstechnik. Ahrweiler 1997, S. 30-33.

30 Man spricht in diesem Zusammenhang von den sog. "fünf K" bzw. "C": eine verbesserte Kommunikation, eine stärkere Konzentration, ein größerer Konsens über eine gemeinsame "Vision der Zukunft", eine bessere Koordination der Forschungs- und Entwicklungsperspektiven sowie eine größere Bereitschaft (Commitment), die Resultate der prospektiven Analysen, Studien und Empfehlungen auch in der Förderung entsprechender Aktivitäten einzulösen.

b) Gegen das Instrument der Prospektion wird eingewandt, damit solle oder könne versucht werden, wesentliche Forschungsgebiete einer externen Steuerung im Sinne eines *top down*-Ansatzes zu unterwerfen und diese mit entsprechenden Mittelbindungen bzw. -zuweisungen durchzusetzen. Der Verwechselung von Prospektion mit *top down*-Verfahren oder (wissenschaftsferner) Forschungsplanung ist entgegenzuhalten, daß Wissenschaftler in allen Phasen der prospektiven Analysen und Studien maßgeblich beteiligt sind; Prospektion ist dem *bottom up*-Prinzip verpflichtet. Sie ist also - im Gegensatz zu Verfahren programmorientierter Forschung - in der Themenfindung und in den Vorschlägen zu ihrer Bearbeitung wissenschaftsgeleitet. In der Identifizierung von Forschungsaufgaben mit Hilfe sorgfältig erstellter wissenschaftlicher und forschungspolitischer Informationen liegt die wichtigste Aufgabe entsprechender Gruppen, die Prospektion durchführen. Die Entscheidung über die Mittelvergabe fällt dagegen den klassischen Forschungsförderern zu. Prospektion in Gebieten der Grundlagenforschung soll also das bewährte System der Forschungsförderung nicht ersetzen, vielmehr um ein zusätzliches wissenschaftsgeleitetes Element ergänzen.

2.2. Zum gewählten Verfahren

Auf der Grundlage der Empfehlungen des Wissenschaftsrates zu einer "Prospektion für die Forschung" bestand das Ziel darin, eine Studie mit Pilotcharakter zu verfassen.[31] Mit der Studie sollen ausgewählte Forschungsfelder unter prospektiven Fragestellungen betrachtet werden. Außerdem war

---

[31] Vgl. auch die Erläuterungen in der Vorbemerkung.

zu prüfen, unter welchen methodischen und forschungspolitischen Voraussetzungen Forschungsprospektion im deutschen Wissenschaftssystem durchgeführt werden kann. Bei dieser Pilotstudie waren also sowohl wissenschaftliche Inhalte zu bewerten als auch Methoden der Prospektion zu erproben und teilweise weiter zu entwickeln. Eine gezielte Erprobung des Instruments war notwendig, da in Deutschland nur erste Ansätze einer Vorausschau in Forschung und Technologie vorhanden und im Ausland überwiegend Verfahren gewählt worden waren, die wegen struktureller Unterschiede der Forschungssysteme nicht unmittelbar übertragbar erschienen.

(1) Einsetzung einer Arbeitsgruppe

Vor Benennung der Mitglieder einer Arbeitsgruppe hatten sich die entsendenden Wissenschaftsorganisationen darauf verständigt, überwiegend Wissenschaftler vorzuschlagen, die in ihren Arbeiten materialwissenschaftliche Themen bearbeiten; eine solche Auswahl war notwendig, um die wissenschaftliche Kompetenz von Beginn an thematisch zu bündeln. Die Wahl dieses Gebietes bot sich an, weil der Wissenschaftsrat mit seiner Stellungnahme zur außeruniversitären Materialwissenschaft kurz zuvor wichtige Vorarbeiten für eine prospektive Studie im Blick auf inhaltliche und strukturelle Aspekte dieses Gebietes sowie seine forschungs- und technologiepolitische Bedeutung bis hin zur Darstellung und Bewertung materialwissenschaftlicher Einrichtungen geleistet hatte.

Da die Mitglieder neben wissenschaftlichen Inhalten auch Methoden der Prospektion zu beraten hatten, wurden außer-

dem ausgewiesene Wissenschafts- und Innovationsforscher in die Gruppe berufen.

(2) Verständigung über Themen und Methoden

Aufgrund dieser Zusammensetzung verständigten sich die Mitglieder der Arbeitsgruppe darauf, die erforderlichen Informationen und Analysen zu Themen und Methoden für einen Teil der Beratungen selbst zu erbringen, zusätzlich aber auch externe Sachverständige anzuhören. Dabei wurde Wert darauf gelegt, auch Wissenschaftler aus der industriellen Forschung und aus dem Ausland einzubeziehen.

In einem heuristischen Sinne wurden Gebiete der Materialwissenschaft ausgewählt, die näher betrachtet werden sollten: Mikrosystemtechnik, Nanotechnologie und Biologische Materialien sowie Funktion und Leistung der mathematischen Modellierung und Simulation in diesen Gebieten.

Parallel zur Bestimmung der Themenfelder wurden die Chancen, aber auch die Grenzen einer Forschungsprospektion bei internen Beratungen sowie mit Gästen eingehend erörtert. In diesen methodenorientierten Gesprächen hat sich die Arbeitsgruppe speziell über folgende Themen informiert:

- international angewandte Methoden zur Beobachtung und Vorausschau in Wissenschaft und Technik,
- Datenbank-gestützte bibliometrische Analysen zur Erfassung, Analyse und Kartierung ausgewählter Forschungsgebiete,

- Bestimmung von künftigen Märkten und Technologien unter besonderer Berücksichtigung der Unsicherheit von Planungsprozessen aus Sicht eines international tätigen, renommierten Beratungsunternehmens.

(3) Gewinnung von Informationen - Analyse gegenwärtiger Entwicklungen - prospektive Analysen

Bei ihrem weiteren Vorgehen zur Erarbeitung einer Prospektionsstudie setzte die Arbeitsgruppe folgende Methoden und Arbeitsformen ein:

- *Peer Review*: Gespräche mit externen Sachverständigen und interne Beratungen
- Bibliometrische Kartierung mit einem eigenen Untersuchungsprojekt
- Auswertung von Delphi-Befragungen

Die gewählten Verfahren werden in den folgenden Kapiteln ausführlich dargestellt (2.3.-2.5.) und im Hinblick auf ihre Funktion bei einer Forschungsprospektion charakterisiert (2.6.).

Nach den Anhörungen und der Auswertung der Beiträge zeigte sich, daß die erste Themenauswahl noch zu allgemein war. Außerdem erwiesen sich einzelne Gebiete wie zum Beispiel Mikrosystemtechnik als technologisch bereits sehr weit fortgeschritten. Vor diesem Hintergrund wurden die Themen auf folgende Felder verdichtet:

- Molekulare Architektur,
- Molekular- und Bioelektronik,

- durch innere Grenzflächen bestimmte Materialien sowie
- Beitrag der mathematischen Modellierung für diese Felder.

Für die ersten drei Themenfelder wurden die gewählten Methoden und Arbeitsformen eingesetzt, deren Ergebnisse in Kapitel 1 der vorliegenden Studie dokumentiert sind: Wissenschaftler der Gruppe sowie externe Sachverständige wurden um Vorschläge und schriftliche Ausarbeitungen zu den Themen gebeten. Es wurden außerdem - ausgehend von Stichworten zu den Gebieten - ausführliche Datenbankrecherchen und detaillierte bibliometrische Analysen auf der Grundlage der internationalen Publikationen durchgeführt. Geeignete Visionen aus dem Delphi-Bericht (1993) wurden der Arbeitsgruppe mit der Bitte um Zuordnung zu den Forschungsfeldern und um Prioritätenbildung im Blick auf die Wichtigkeit der Visionen vorgelegt; die Antworten wurden anschließend ausgewertet und für die Darstellung in Kapitel 1 aufbereitet.

(4) Integration der Informationen, Vorschläge etc.

Bei der Erarbeitung der prospektiven Analysen und Empfehlungen kam es also darauf an, qualitative und empirisch-quantitative Methoden einzusetzen und die erzielten Ergebnisse am Ende miteinander zu verbinden.

Die einzelnen Kapitel, nämlich

- die wissenschaftlichen Analysen,
- die bibliometrischen Untersuchungen und
- die Integration der Ergebnisse der Delphi-Befragung

wurden in wechselseitiger Abstimmung von den Mitgliedern der Gruppe erarbeitet.

2.3. *Peer Review:* Anhörungen, Gespräche und Beratungen von Wissenschaftlern

2.3.1. Voraussetzungen und Ziele

Peer Review im herkömmlichen Sinn bedeutet die in Deutschland und in anderen Ländern übliche Praxis der Begutachtung wissenschaftlicher Vorhaben oder Leistungen durch Wissenschaftler. In einem weiteren Sinne soll über die verbreitete Praxis der *Evaluation* von Projekten und Forschungseinrichtungen hinaus damit auch die maßgebliche Beteiligung von Wissenschaftlern oder wissenschaftlich ausgebildeten Experten an einer *Forschungsprospektion* verstanden werden. *Peer Review* ist notwendig, weil keine andere Gruppe oder Institution über den unerläßlichen wissenschaftlichen Sachverstand verfügt. Die wichtigste Aufgabe besteht in der Überprüfung und Sicherung der Qualität wissenschaftlicher Ideen, Vorschläge und Vorhaben. Wenn Wissenschaftler sich über Bedeutung und Wert von Forschungsaufgaben im Sinne von Prognosen äußern, müssen diese reflektiert, auf ihre Verwirklichung überprüfbar, nachvollziehbar und konsistent sein. Sachverstand und Neutralität sind die wichtigsten Voraussetzungen für die Akzeptanz ihrer Analysen und Stellungnahmen in Wissenschaft, Forschungsförderung und Öffentlichkeit.

Der Wissenschaftsrat hat Prospektion entsprechend als einen wissenschaftsgeleiteten Prozeß bezeichnet, an dem Forscher in allen Phasen maßgeblich beteiligt sein müs-

sen. Grundlage jeder Analyse ist ein innerwissenschaftlicher Diskurs über geeignete Ziele der Forschung.

2.3.2. Verfahren

Das allgemeine Vorgehen der Arbeitsgruppe ist in Kapitel 2.2. beschrieben. Die Gespräche und Beratungen gestalteten sich in der nachstehend skizzierten Weise. Zu den von der Arbeitsgruppe ausgewählten Themenfeldern wurden Wissenschaftler aus dem In- und Ausland angehört, die nicht Mitglieder der Gruppe waren. Jedes wissenschaftliche Thema war nach folgenden Gesichtspunkten prospektiv darzustellen:

- Längerfristig zu bearbeitende wissenschaftliche Fragestellungen (zur Erzeugung neuen Wissens),
- dabei erforderliche Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen,
- Anwendungsmöglichkeiten,
- Produktvisionen.

Die eingeladenen Wissenschaftler wurden gebeten, ihre Themenvorschläge auch schriftlich zu dokumentieren. In gleicher Weise trugen die Mitglieder der Arbeitsgruppe prospektive Analysen und Vorschläge zu ausgewählten Forschungsaufgaben vor. Die wichtigsten Ergebnisse der Anhörungen und Gespräche wurden schriftlich festgehalten; sämtliche internen und externen Beiträge wurden gesammelt und der Gruppe mit weiteren Informationsmaterialien sowie wissenschaftlichen Publikationen zur Verfügung gestellt.

In den Beratungen der Arbeitsgruppe wurden die Ergebnisse der bibliometrischen Analysen vorgestellt und den Mitgliedern im Internet mit der Bitte zugänglich gemacht, die Daten und Karten in die Vorschläge und Analysen zur Prospektion einzubeziehen (vgl. Kap. 2.4.).

Eine Auswertung ergab außerdem, daß 56 Delphi-Visionen des Berichts aus dem Jahre 1993 im Blick auf die von der Arbeitsgruppe ausgewählten Felder thematisch einschlägig sind. Die Mitglieder wurden gebeten, die Visionen zu prüfen, zu gewichten und den einzelnen Feldern zuzuordnen, damit sie in die weitere Analyse einbezogen werden können (vgl. Kap. 2.5.).

In einer abschließenden Phase übernahmen es Mitglieder der Arbeitsgruppe, die einzelnen Themenfelder im Lichte der Anhörungen, der bibliometrischen Karten, von Fachliteratur sowie der Delphi-Anregungen schriftlich auszuarbeiten. Dazu wurden übergreifende Gliederungspunkte verwendet:

- Forschung (Thematik, längerfristig zu bearbeitende Fragestellungen, dabei erforderliche Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen, Anwendungsmöglichkeiten, Produktvisionen)
- Weitere Aspekte (mathematische Simulation, "life cycle", "System")
- Rahmenbedingungen (Wettbewerbsposition aus deutscher Sicht, öffentliche Förderung, Engagement der Wirtschaft)

Die Entwürfe wurden dann in der Arbeitsgruppe und in Kooperation mit externen Wissenschaftlern abschließend beraten und überarbeitet.

Im Rahmen der Experten-Anhörungen wurde auch ein Gespräch mit einem technologiepolitisch erfahrenen Unternehmensberater geführt. Dabei wurde einerseits die Auffassung vertreten, daß mittel- und längerfristige Schwerpunktbildungen forschungspolitisch notwendig sind, weil aufgrund der raschen Zunahme des wissenschaftlichen Wissens Forschung aus strukturellen und finanziellen Gründen nicht an allen möglichen Fronten gleichzeitig mit hoher Intensität betrieben werden kann; bei neuen Forschungschwerpunkten muß wissenschaftliche Exzellenz nachhaltig gefördert werden. Allerdings darf Prospektion andererseits nicht zu "Dekadenfestlegungen" führen, indem einmal gesetzte Ziele ohne Berücksichtigung sich neu ergebender Kontexte und des tatsächlich erzielten Forschungserfolgs weiter verfolgt werden. Forschungsprospektion muß vielmehr um ein aktives Forschungsmanagement mit geeigneten Steuerungs- und Evaluationsverfahren ergänzt werden.

2.3.3. Schlußfolgerungen

Für eine Forschungsprospektion sind die Kenntnisse von Wissenschaftlern unterschiedlicher Fachrichtungen essentiell, ihre maßgebliche Beteiligung in allen Phasen der Prospektion ist grundlegende Voraussetzung für den Erfolg. Gleichwohl ist zu bedenken, daß Wissen und Erfahrung auch der besten Forscher aufgrund der fortgeschrittenen Ausdifferenzierung wissenschaftlicher Gebiete und der damit verbundenen (internationalen) Arbeitsteilung

begrenzt sind. Außerdem haben die an einer Prospektion beteiligten Wissenschaftler durchaus unterschiedliche Erwartungen und Interessen.

Wegen der Begrenztheit des individuellen Wissens ist es daher stets notwendig, eine größere Anzahl von Wissenschaftlern mit unterschiedlichen Arbeitsschwerpunkten zu beteiligen. Außerdem führen intensive Beratungen in Gruppen zu einer Optimierung der wissenschaftlichen und forschungspolitischen Aussagen. Aus pragmatischen Gründen dürfen diese Gruppen und die Zahl der zusätzlich einbezogenen Sachverständigen jedoch nicht zu groß sein, damit eine effektive Beratung und Verständigung sowie ein Abschluß der Arbeiten in überschaubaren Zeiträumen gewährleistet sind. Dies führt dazu, daß die aufgegriffenen Themen und Forschungsfelder niemals "vollständig" und "abschließend", sondern lediglich ausschnitthaft und prozeßhaft bearbeitet werden können.

Vor diesem Hintergrund erscheint es methodisch sinnvoll, die Erkenntnisse und Beiträge (kleinerer) Gruppen mit bibliometrischen Struktur-Informationen zu ergänzen, um auf diese Weise internationale Tendenzen in der Forschung noch genauer berücksichtigen zu können. Für zukunftsorientierte Überlegungen bietet sich der Einsatz von Delphi-Befragungen mit einem Angebot potentieller naturwissenschaftlich-technischer Lösungen an. Insgesamt ist eine Kombination mehrerer Methoden notwendig. Im Blick auf *Peer Review* erscheint es entscheidend, Wissenschaftler aus unterschiedlichen Disziplinen und aus verschiedenen (Hierarchie-)Ebenen zu gewinnen; es sollten daher auch jüngere Wissenschaftler einbezogen werden.

2.4. Bibliometrische Kartierung

2.4.1. Voraussetzungen und Ziele

In vielen Forschungsgebieten nimmt die Zahl der Veröffentlichungen rasch zu. Allein in der Materialwissenschaft werden jährlich rund 100.000 Artikel in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht. Für einzelne Wissenschaftler, aber auch für Forschungsförderer wird es zunehmend schwieriger, einen Überblick über wichtige Entwicklungen jenseits von Spezialgebieten zu gewinnen.

Eine Orientierungsfunktion können in diesem Fall quantitativ-statistische Verfahren übernehmen; als ein Teilbereich der Informationswissenschaften hat sich die Bibliometrie herausgebildet, die es ermöglicht, Literatur- und Patentdatenbanken nach bestimmten Suchkriterien auszuwerten und auf diese Weise zum Beispiel thematische Schwerpunkte und Trends, "kognitive Strukturen" einzelner Wissensgebiete und schleichend sich vollziehende Veränderungen in Forschung und Technologie mit quantitativen Methoden zu identifizieren. Wichtigster Gegenstand bibliometrischer Analysen sind Veröffentlichungen in internationalen wissenschaftlichen Zeitschriften. Eine wissenschaftliche Publikation gilt als Dokumentation einer Erkenntnis und damit als Nachweis wissenschaftlicher Produktivität.[32] Die wichtigste und bekannteste Datenbank, die bei quantitativen Analysen genutzt wird, ist diejenige, die dem *Science Citation Index* zugrundeliegt.

---

[32] Eine Zitierung dieser Publikation in anderen wissenschaftlichen Veröffentlichung zu einem späteren Zeitpunkt gilt dann als deren Wirkung.

Als ein spezielles Verfahren der Bibliometrie erlaubt die Methode der bibliometrischen Kartierung, Forschungs- und Technologiefelder unter verschiedenen Gesichtspunkten zu analysieren. So können mit Hilfe von Karten die "Größe" einzelner (Teil-)Gebiete und ihre Beziehung zu anderen Gebieten im Sinne von Nähe oder Ferne dargestellt werden. In Analysen zurückliegender Jahre können Veränderungen wie Zu- oder Abnahme der Zahl der Veröffentlichungen in bestimmten Gebieten, Verschmelzung mit anderen Gebieten, aber auch "Jargonwechsel" mit Hilfe von Karten visualisiert werden. Die Daten für diese Karten werden aus internationalen Datenbanken gewonnen.

Aussagen über die Existenz von wissenschaftlichen Arbeitsgebieten, ihre Größe, Entwicklung, Beziehung zu anderen Gebieten etc. werden für die Erfassung, Beschreibung und Analyse von Forschungsfeldern genutzt und können als strukturierte Informationen für prospektive Studien dienen.

In der vorliegenden Pilotstudie wurden für die Gebiete Molekulare Architektur, Molekular- und Bioelektronik und Grenzflächenbestimmte Materialien unterschiedlich detaillierte Karten sowie darüber hinausgehende Informationen erarbeitet. Unter den Übersichtskarten über die Gebiete befinden sich jeweils - in feinerer Auflösung - Detailkarten mit Teilgebieten. Aus diesen Übersichts- und Detailkarten lassen sich weitere Daten und Informationen erschließen. Diese sind vollständig im Internet niedergelegt[33], z.B. Zahl der Publikationen (auch nach Ländern),

---

[33] Vgl. http://sahara.fsw.leidenuniv.nl/ed/intro.html

(Inter-) Disziplinarität, Aktivitäten von Universitäten sowie außeruniversitären Einrichtungen etc.

Bibliometrische Verfahren können für Analysen von Forschungsfeldern eingesetzt werden, um folgende Ziele zu erreichen:

- Vor dem Hintergrund der zunehmenden "Unübersichtlichkeit" wissenschaftlichen Wissens sollen aktuelle, detaillierte, strukturierte und objektive Informationen ermittelt werden. Diese Informationen sind in einer solchen außerordentlich breiten und zugleich komprimierten Weise auf anderem Wege nicht zu erhalten.

- Wissenschaftliche Leistungen und Kommunikationsprozesse sowie bestimmte forschungspolitische Entwicklungen können sowohl im nationalen als auch im internationalen Kontext vergleichend analysiert werden. Dabei können sie auch unabhängig von institutioneller Bindung und wissenschaftlicher Reputation der veröffentlichenden Wissenschaftler unter verschiedenen Aspekten betrachtet werden (Strukturierung von Fachgebieten und Analyse interdisziplinärer Arbeiten, Bearbeitungsintensität bestimmter wissenschaftlicher Fragestellungen etc.).

- In der vorliegenden Studie werden solche Methoden eingesetzt, um international sich abzeichnende Tendenzen erkennen und die Position der Forschung in Deutschland bestimmten zu können. Im Blick auf die ausgewählten interdisziplinären Forschungsfelder (vgl. Kap. 1.1.-1.3.) besteht die Erwartung, daß sie mittelfristig Anwendungsbezüge enthalten; gegenwärtig wird eine Vielzahl grundlegender Arbeiten durchgeführt, deren Ergeb-

nisse in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht werden. Es gilt also, diese Ausgangsposition objektiv zu erfassen und dabei mögliche Defizite zu erkennen (zum Beispiel ein fehlendes Engagement auf international stark bearbeiteten Feldern).

Bei der Nutzung bibliometrischer Verfahren ist zu beachten, daß die Analysen nur von erfahrenen Wissenschaftsforschern durchgeführt werden sollten. Für den sachgemäßen Einsatz sind vielfältige wissenschaftlich-technische Kenntnisse und Erfahrungen mit internationalen Datenbanken notwendig; dies betrifft insbesondere Leistungen und Grenzen der Datenbanken, Entwicklung und Einsatz spezieller Software sowie die Vereinheitlichung bibliometrischer Daten etc.

2.4.2. Verwendete Techniken[34]

(1) Grundlegende Aspekte

Der Ansatz der Kartierung (wie auch anderer bibliometrischer Verfahren) besteht darin, Verbindungen zwischen einzelnen Publikationen herzustellen - dies geschieht durch die Ermittlung eines oder mehrerer gemeinsamer Merkmale.[35] Für die bibliometrische Kartierung bildet das

---

[34] Die folgende Darstellung schließt sich zum Teil an ein unveröffentlichtes Manuskript von Hariolf Grupp und Sybille Hinze zur Einführung in Kartographieverfahren an: "Kartierung ausgewählter FuE-Strukturen mit Hilfe von Indikatoren".

[35] Entsprechende bibliometrische Analysen werden mit "Co-" bezeichnet, wie Co-Klassifikationsanalyse, Co-Wortanalyse, Co-Stichwortanalyse, Co-Autorenanalyse, Co-Zitierungsanalyse.

Auftreten gemeinsamer Schlagwörter in miteinander sonst unverbundenen Publikationen aus verschiedenen Ländern, von verschiedenen Forschungseinrichtungen oder sogar aus verschiedenen Forschungsgebieten die grundlegende Information.

Wenn größere Mengen von Publikationen häufig gemeinsame Merkmale zeigen, kann man davon ausgehen, ein Phänomen gefunden zu haben, das gewissen Teilgebieten insgesamt eigen ist. Aus der Stärke der Verwandtschaft und ihrer zeitlichen Veränderungen, die durch die Zunahme oder Abnahme des Auftretens der gemeinsamen Merkmale festgestellt wird, kann man Aussagen über die innere Struktur von Wissenschaftsgebieten treffen sowie auf das Zusammenwachsen oder die Differenzierung solcher Gebiete schließen. Im Rahmen dieser Pilotstudie wurde von der "Co-Wortmethode" Gebrauch gemacht.

Es ist ein Vorzug der bibliometrischen Kartierung, aus den weltweit größten Datenbanken schöpfen und die sich herausbildenden Forschungsgebiete anhand von Forschungsarbeiten identifizieren und strukturieren zu können. Diese Methoden sind auch deshalb von großer Bedeutung, weil gerade bei neu entstehenden und interdisziplinären Gebieten die weltweit einheitliche Verwendung von bestimmten Schlüsselbezeichnungen noch nicht feststeht, sondern sich ebenfalls erst herausbildet. In solchen Fällen haben sich in aller Regel noch keine festen wissenschaftlichen *Communities* gebildet, und die disziplinäre Verankerung ist noch nicht abgeschlossen, selbst die Verwendung von Begriffen ist noch uneinheitlich.

(2) Kartographische Techniken

Nach der Beschaffung von Datenbankinformationen und insbesondere der Angaben über das gemeinsame Auftreten von Merkmalen liegt in der Regel eine Vielzahl tabellarischer Informationen vor, die in dieser Form für Zwecke der Interpretation und Analyse allerdings noch nicht brauchbar sind. Zur Reduktion dieser Komplexität haben sich Kartographieverfahren bewährt, die aus der mathematisch-statistischen Theorie der multivariaten Verfahren entwickelt wurden. In den vorliegenden Karten wird die Veranschaulichung der großen Datenmenge in eine zweidimensionale Karte vorgenommen, d.h. es findet eine Umsetzung der tabellarischen Informationen über die gemeinsamen Merkmale in eine graphische Darstellung in Form zweidimensionaler Karten statt.

Diese Karten werden mit mathematischen Methoden der multidimensionalen Skalierung (MDS) errechnet. Objekte mit besonders häufigen gemeinsamen Merkmalen werden als ähnlicher zueinander angesehen als andere. Das Ähnlichkeitsmaß ist dabei die Zahl der Mehrfachklassifikationen oder des mehrfachen Auftretens gemeinsamer Begriffe ("co-occurrence" der *keywords*, also "co-words"). Die Entfernungen in der Karte repräsentieren die inversen Ähnlichkeiten, wobei Optimierungsverfahren angewendet werden müssen, um die widersprüchlichen bilateralen Positionen zwischen den Objekten in der Karte zu minimieren.

Das Kartographieverfahren dient der Ermittlung einer Konfiguration der Werte in der Art, daß die Werte der Matrix als Distanzmaße zwischen den Merkmalsausprägungen betrachtet werden. Die Güte einer solchen Ähnlichkeitsbe-

trachtung kann berechnet werden, so daß strenge mathematische Aussagen über den Repräsentationsgrad möglich sind.

(3) Vorgehen bei den vorliegenden Analysen (am Beispiel der "Molekular-Elektronik")

Für die Erstellung der Karten wurde folgendes Vorgehen gewählt:

(a) Erarbeitung von Übersichtskarten (erste Ebene)[36]

Die Wissenschaftler der Arbeitsgruppe gaben rund 25 Schlüsselbegriffe (sog. *primary keywords*) für das Gebiet "Molekular-Elektronik" an, die wichtige Forschungsthemen bezeichnen. Für die Erschließung und Analyse dieses interdisziplinär strukturierten Gebietes mit Hilfe dieser Schlüsselbegriffe wurden verschiedene Datenbanken des *Institute for Scientific Information, Philadelphia (ISI)*, genutzt:

- "Natural and Life Sciences"
- Chemie,
- Biotechnologie,
- Biochemie und Biophysik,
- Neurowissenschaften,
- Materialwissenschaften.

Aus diesen Datenbanken wurden alle Veröffentlichungen ausgewählt, die mindestens einen der Schlüsselbegriffe in ihrer Zusammenfassung oder im Titel aufwiesen. Auf diese

---

[36] Vgl. Abbildung S. 31

Weise wurden insgesamt etwa 6.000 einschlägige Publikationen ermittelt, die sich auf zwei Zeiträume verteilen:

- ca. 2.600 Veröffentlichungen in den Jahren 1991-1993
- ca. 3.500 Veröffentlichungen in den Jahren 1994-1996

In einem Publikationsregister sind für jeden Artikel alle wesentlichen Angaben enthalten, zum Beispiel Publikationstyp, Titel, Autoren, deren institutionelle Zugehörigkeit, Name der Zeitschrift, Band, Seitenangabe, Zusammenfassung, Liste der zitierten Publikationen (Referenzen).

Mit Hilfe der 'primary keywords' werden also sämtliche Publikationen identifiziert und gesammelt. Diese Publikationen bilden *per definitionem* das Fachgebiet; für Molekular-Elektronik sind es (1991-1996) insgesamt etwa 6.000, für das Fachgebiet Molekulare Architektur etwa 14.000 und für das Fachgebiet der Grenzflächenbestimmten Materialien etwa 40.000.

Titel und Zusammenfassungen aller Publikationen eines Fachgebiets werden in einem zweiten Schritt grammatisch zergliedert (engl.: *parse*); auf diese Weise werden pro Fachgebiet etwa 200-400 'parsed keywords' gewonnen.

Für die Übersichtskarte ('erste Ebene') werden dann nur die parsed keywords aus den Titeln verwendet, und von diesen etwa 100, die am häufigsten auftreten. Die Begriffe aus den Titeln werden gewählt, weil diese meistens allgemeiner und deshalb für eine Übersichtskarte geeigneter sind (Titel-Begriffe fungieren damit als 'classification words'). Mit diesen etwa 100 parsed keywords aus den

Publikationstiteln wird eine Co-Word Matrix aufgebaut: Für jedes Paar dieser parsed keywords wird festgestellt, wieviel Publikationen diese beiden Keywords zusammen im Titel oder in der Zusammenfassung aufweisen. So bildet sich eine erste Ebene der Co-Word Matrix (100*100).

Im Anschluß daran wird ein Clusterverfahren auf die erste Ebene der Co-Word Matrix angewandt und so etwa 10 bis 20 optimierte Cluster identifiziert. Im Falle der Molekular-Elektronik sind es 11 Cluster. Die Annahme lautet, daß die gefundenen Cluster als 'Teilgebiete' betrachtet werden können.

Da mit 'co-words' gearbeitet wird, sind die Cluster Anhäufungen von Schlüsselbegriffen. Dies bedeutet, daß einzelne Publikationen zu mehreren Clustern (Teilgebieten) gehören können, weil sie mehrere Schlüsselbegriffe in Titel und Zusammenfassung enthalten. Cluster haben also immer eine bestimmte Zahl von Publikationen gemeinsam. Je mehr sie gemeinsam haben, desto 'verwandter' sind die Cluster. Man kann also eine Ähnlichkeit der Cluster auf Basis der gemeinsamen Publikationen berechnen. Diese 'Cluster-Ähnlichkeiten' bilden also eine 11*11 Cluster-Ähnlichkeits-Matrix. Die Matrix wird mit Hilfe von weiteren mathematischen Techniken (multidimensionale Skalierung, MDS) in eine Karte umgesetzt; die Technik kann man mit der Transformation einer Kilometer-Abstands-Tabelle zu einer 'Landschaft' oder Karte vergleichen. Die Übersichtskarten sind also 'Cluster-Ähnlichkeits-Karten'.

(b) Erarbeitung von Detailkarten (zweite Ebene)[37]

Für jedes Cluster (Teilgebiet) werden alle *parsed keywords* (aus Titeln und zusätzlich auch aus Zusammenfassungen) von allen zu dem Teilgebiet gehörenden Publikationen ausgewählt. Auch hier werden die etwa 100 häufigsten Schlüsselbegriffe identifiziert. Damit wird eine 100*100 Co-Word Matrix für die zweite Ebene gebildet: die 'Feinstruktur'. Das heißt, auf diese 100*100 Matrix jedes einzelnen Teilgebietes wird ein MDS-Verfahren angewandt; das Resultat ist die Detailkarte des Teilgebiets.

Zur weiteren Strukturierung kann in der Co-Word Matrix für das Teilgebiet auch ein Clusterverfahren angewendet werden. Weil eine gleiche Prozedur wie auf der ersten Ebene (Cluster-Similarity Analysen) sehr arbeitsintensiv sein würde, werden in den Detailkarten keine 'Sub-Cluster' gebildet; in der Detailkarte wird jedoch mit Farben angegeben, zu welchen Sub-Clustern die Keywords gehören.

2.4.3. Zur Nutzung der Ergebnisse der Analysen (am Beispiel der "Molekular-Elektronik")

Entsprechend dem zuvor skizzierten Verfahren wurden Karten und statistische Informationen für die drei ausgewählten Gebiete erstellt. Sie sind im Internet niedergelegt, ihre Darstellung folgt einheitlichen Gliederungsprinzipien. Aufgrund der Vielzahl der Informationen können die Ergebnisse in der Pilotstudie nur ausschnitthaft wiedergegeben werden (vgl. dazu auch die Kapitel 1.1. bis 1.3.). Im folgenden wird am Beispiel der "Molekular-Elek-

---

[37] Vgl. Abbildung S. 95

tronik" gezeigt, wie die Karten und Informationen aufeinander bezogen und zu nutzen sind.[38]

(a) Übersichtskarten: darin enthaltene sowie ergänzende Informationen

Von zentraler Bedeutung ist die Übersichtskarte, im vorliegenden Fall "Molecular Electronics". Sie dokumentiert die thematischen Strukturen der Veröffentlichungen in diesem Forschungsgebiet im Zeitraum 1994-1996 (vgl. Abbildung S. 31).

Die Übersichtskarte zeigt elf Teilgebiete, die numeriert sind und durch Schlüsselbegriffe bezeichnet werden (zum Beispiel "1: device/diode/LED/electroluminscence"). Die Fläche der in dieser Karte wiedergegebenen Kreise für die Teilgebiete ergibt sich aus der Anzahl der ihnen zuzuordnenden Publikationen; die 'Größe' eines Teilgebietes entspricht in diesem Fall einhundert bis mehreren Hundert Publikationen pro Jahr. Daraus ergibt sich auch die Anzahl der beteiligten Forscher, in Deutschland zum Beispiel etwa 10-15 Forscher oder Forschergruppen. Ein geringer Abstand zwischen den Teilgebieten weist auf enge thematische Bezüge hin (zahlreiche gemeinsame Schlüsselbegriffe). Teilgebiete mit zunehmenden Aktivitäten sind dunkelgrau (in der Präsentation im Internet rot), mit abnehmenden weiß (im Internet blau) gekennzeichnet.

Die mit Größe, Anordnung und angedeuteter Dynamik der Teilgebiete gegebene Struktur der Übersichtskarte repräsentiert somit in hohem Masse die Forschungsarbeiten der

---

[38] Vgl. http://sahara.fsw.leidenuniv.nl/ed/intro3.html

in dem Gebiet aktiven Forschergruppen. Der 'Charakter' der Teilgebiete wird durch etwa 10 bis 20 der aktivsten Forschergruppen pro Teilgebiet mit etwa 5 bis 15 Publikationen pro Jahr bestimmt.

Für diese Teilgebiete der Molekularelektronik werden zusätzliche Daten angeboten, die sich als entscheidend für das Verständnis erweisen.

In einer Tabelle A1 (vgl. auch Kapitel 1.2.) wird die Zahl der Publikationen für jedes der elf Teilgebiete in den beiden erfaßten Zeitperioden 1991-1993 und 1994-1996 angegeben.

Bezogen auf die Teilgebiete der Übersichtskarte werden für die Jahre 1994-1996 darüber hinaus statistische Informationen über folgende Sachverhalte angeboten: Für jedes der elf Teilgebiete der Übersichtskarte wird die Zahl der Veröffentlichungen in Fachzeitschriften dokumentiert. Aufgrund der disziplinären Zuordnung der Zeit-

A1: Umfang: Zahl der Publikationen - Vergleich 1991-1993 mit 1994-1996

Teilgeb.	1991-93	1994-96	Name
1	77	361	device / diode / LED / electroluminescence
2	504	967	poly / PPV / phenylene vinylene / phenylene
3	64	140	TTF / et / ethylenedithio / bedt ttf
4	339	622	complex / compound / alpha / co
5	1.020	1.671	polyaniline / structure / conductivity / solution
6	414	715	donor / cell / PCR / gene
7	662	1.153	polymer / conducting polymer / derivative / copolymers
8	487	899	film / ito / electrode / langmuir blodgett films
9	236	477	synthesis / bis / characterization
10	383	721	effect / solvent / formation / application
11	229	285	polyacetylene / conduction / ab initio

schriften lassen sich die beteiligten Disziplinen und damit die interdisziplinären Strukturen in diesem Forschungsgebiet erkennen (vgl. Beispiel für Teilgebiet 1 in Übersicht A2).

A2: Interdisziplinarität: Zahl der Publikationen für die gesamte Periode 1991-1996 pro Disziplin (die Disziplinen sind definiert auf Basis der Zeitschriften)

Teilgebiet 1: device / diode / LED / electroluminescence

Num	Journal Category
196	PHYSICS, CONDENSED MATTER
192	CHEMISTRY, PHYSICAL
174	PHYSICS, APPLIED
155	METALLURGY & MINING
154	METALLURGY & METALLURGICAL ENGINEERING
85	MATERIALS SCIENCE
34	POLYMER SCIENCE
29	ENGINEERING, ELECTRICAL & ELECTRONIC
27	CHEMISTRY
22	MULTIDISCIPLINARY SCIENCES
17	OPTICS
16	PHYSICS, ATOMIC, MOLECULAR & CHEMICAL
9	CHEMISTRY, ORGANIC
8	CHEMISTRY, ANALYTICAL
8	MATERIALS SCIENCE, COATINGS & FILMS
7	CRYSTALLOGRAPHY
6	PHYSICS
7	ELECTROCHEMISTRY

Darüber hinaus können jeweils für die elf Teilgebiete die weltweiten wissenschaftlichen Aktivitäten unter folgenden Gesichtspunkten betrachtet werden (jeweils am Beispiel des Teilgebietes 1):

A3: **Aktivität der Länder, Zahl der Publikationen pro Land:** Vergleich 1991-1993 mit 1994-1996; ('clickable': Countries)

Teilgebiet 1: device / diode / LED / electroluminescence

1991-1993	1994-1996	Staat
23	98	USA
23	78	Japan
7	52	Germany
14	43	Great Britain
1	15	Sweden
5	14	France
.	14	Netherlands
1	12	Peopl R China
.	9	Austria
.	9	Italy
.	9	South Korea
.	7	Israel

1991-1993	1993-1996	Staat
5	7	Taiwan
1	6	Belgium
.	6	Russia
.	5	Brazil
1	5	Canada
.	4	India
.	3	Czech Republic
1	3	Poland
1	3	Switzerland
.	2	Portugal
.	2	Spain
.	2	Vietnam

A4: **Aktivität der wissenschaftlichen/technologischen Einrichtungen** (Universitäten, Forschungsinstitute, Betriebe usw.): Zahl der Publikationen pro Einrichtung, Vergleich 1991-1993 mit 1994-1996; ('clickable': Actors)

Diese Übersicht wird hier nicht wiedergegeben.

A5: Eine **Teilgruppe** aus der vorigen Gruppe: **Aktivität der Universitäten** - Zahl der Publikationen pro Universität, Vergleich 1991-1993 mit 1994-1996; ('clickable': Univ)

Teilgebiet 1: device / diode / LED / electroluminescence

1991-1993	1994-1996	Universität
6	23	OSAKA UNIV, JAPAN
13	19	UNIV CAMBRIDGE, GREAT BRITAIN
8	16	UNIV CALIF SANTA BARBARA, USA
1	14	LINKOPING UNIV, SWEDEN
.	14	UNIV MARBURG, GERMANY
4	12	UNIV BAYREUTH, GERMANY
.	7	HEBREW UNIV JERUSALEM, ISRAEL
.	7	PRINCETON UNIV, USA
.	7	TECH UNIV GRAZ, AUSTRIA
.	6	CHALMERS UNIV TECHNOL, SWEDEN
.	5	JILIN UNIV, PEOPLES R CHINA
1	5	KYUSHU UNIV, JAPAN
.	5	STATE UNIV GRONINGEN, NETHERLANDS
.	5	UNIV PENN, USA
.	4	RUSSIAN ACAD SCI, RUSSIA
.	4	STATE UNIV MONS, BELGIUM
1	4	UNIV MASSACHUSETTS, USA
.	4	UNIV ROCHESTER, USA
.	4	UNIV SO CALIF, USA
.	3	ACAD SCI CZECH REPUBL, CZECHREPUBLIC
1	3	CHINESE ACAD SCI, PEOPLES R CHINA
2	3	NAT CHIAO TUNG UNIV, TAIWAN
.	3	OHIO STATE UNIV, USA
.	3	UNIV CONNECTICUT, USA
.	3	UNIV JENA, GERMANY
.	3	UNIV SAO PAULO, BRAZIL
.	3	UNIV SHEFFIELD, GREAT BRITAIN
.	3	UNIV SOUTHAMPTON, GREAT BRITAIN
.	3	UNIV TEXAS, USA

A6: Die komplementäre **Teilgruppe: Aktivität der anderen Einrichtungen** (überwiegend nicht-universitäre Forschungsinstitute, Betriebe usw.) - Zahl der Publikationen pro Einrichtung, Vergleich 1991-1993 mit 1994-1996; ('clickable': other)

Diese Übersicht wird hier nicht wiedergegeben.

A7: **Wissenschaftliche Zusammenarbeit:** Kooperationen 1991-1996, d.h. Zahl der Publikationen (mit mehr als einer Adresse) pro Kooperation[39]

Teilgebiet 1

1991-96	Kooperationspartner 1	Kooperationspartner 2
6	CHALMERS UNIV TECHNOL, SWEDEN	LINKOPING UNIV, SWEDEN
5	MAX PLANCK INST POLYMER RES, GERMANY	TECH UNIV GRAZ, AUSTRIA
4	CAVEVDISH LAB, GREAT BRITAIN	UNIV CAMBRIDGE, GREAT BRITAIN
4	HIMEJI INST TECHNOL, JAPAN	OSAKA UNIV, JAPAN
4	PRINCETON UNIV, USA	UNIV SO CALIF, USA
3	ACAD SCI CZECH REPUBL, CZECH REPUBLIC	MAX PLANCK INST POLYMER RES, GERMANY
3	ELECTR & TELECOMMUN RES INST, SOUTH K	KOREA ADV INST SCI & TECHNOL, SOUTH KOREA
3	OHIO STATE UNIV, USA	UNIV PENN, USA
2	CAVENDISH LAB, GREAT BRITAIN	UNIV CAMBRIDGE, GREAT BRITAIN
2	CNR, ITALY	GDANSK TECH UNIV, POLAND
2	CNR, ITALY	XEROX RES CTR CANADA LTD, CANADA
2	COLORADO STATE UNIV, USA	TOKYO UNIV AGR & TECHNOL, JAPAN
2	EPICHEM LTD, GREAT BRITAIN	UNIV LOUGHBOROUGH, GREAT BRITAIN
2	EPITAXIAL PROD INT LTD, GREAT BRITAIN	UNIV WALES COLL CARDIFF, GREAT BRITAIN
2	HOECHST AG, GERMANY	UNIV MADRID, SPAIN
2	HOECHST AG, GERMANY	UNIV TUBINGEN, GERMANY
2	INST CHARLES SADRON, FRANCE	SWISS FED INST TECHNOL, SWITZERLAND
2	IOWA STATE UNIV SCI & TECHNOL, USA	UNIV CAMBRIDGE, GREAT BRITAIN
2	KEIO UNIV, JAPAN	MURORAN INST TECHNOL, JAPAN
2	KOREA ADV INST SCI & TECHNOL, SOUTH K	KOREA UNIV, SOUTH KOREA
2	LINKOPING UNIV, SWEDEN	STATE UNIV MONS, BELGIUM
2	LOS ALAMOS NATL LAB, USA	UNIV TEXAS, USA
2	MIT, USA	NORTHEASTERN UNIV, USA
2	NIPPON TELEGRAPH & TEL PUBL CO, JAPAN	UNIV BAYREUTH, GERMANY
2	OSAKA GAS CO LTD, JAPAN	UNIV CALIF SANTA BARBARA, USA
2	OSAKA GAS CO LTD, JAPAN	UNIV NEBRASKA, USA
2	OSAKA UNIV, JAPAN	SUMITOMO CHEM CO LTD, JAPAN
2	UNIAX CORP, USA	UNIV CALIF SANTA BARBARA, USA
2	UNIV CALIF SANTA BARBARA, USA	UNIV MONS HAINAUT, BELGIUM
2	UNIV CALIF SANTA BARBARA, USA	UNIV NEBRASKA, USA
2	UNIV JENA, GERMANY	UNIV MARBURG, GERMANY
2	UNIV MADRID, SPAIN	UNIV TUBINGEN, GERMANY
2	UNIV ROCHESTER, USA	WRIGHT STATE UNIV, USA
2	UNIV ROCHESTER, USA	XEROX CORP, USA
2	UNIV STUTTGART, GERMANY	UNIV WURZBURG, GERMANY
2	WRIGHT STATE UNIV, USA	XEROX CORP, USA

[39] Diese Tabellen können als separate Dateien aus dem Internet geladen werden.

(b) Detailkarten zu den einzelnen Teilgebieten

Für jedes Teilgebiet der Übersichtskarten werden außerdem Detailkarten für die Periode 1994-1996 angeboten. Diese kann man im Internet durch "Anklicken" erreichen. Dort findet sich zunächst eine bibliometrische Karte mit den Keywords des Teilgebietes; diese enthält im Falle des Teilgebietes 1 rund 90 Keywords (vgl. Abbildung auf der folgenden Seite). In diesen Detailkarten kann man bei jedem angegebenen Keyword fragen nach (hier am Beispiel "communication"[40] als eines der Keywords zu Teilgebiet 1):

B1: den **Publikationen** (Titel);

communication

(1995) Inverted Polymer Light-Emitting-Diodes on Cylindrical Metal Substrates
(1995) The Deposition of Platinum-Containing Tin Oxide Thin-Films by Metal- Organic CVD
(1995) Tunable Electroluminescence and Photoluminescence in Phenylenevinylene-Naphthylene-Vinylene Copolymers
(1995) Inverted Polymer Light-Emitting-Diodes on Cylindrical Metal Substrates
(1995) The Deposition of Platinum-Containing Tin Oxide Thin-Films by Metal- Organic CVD
(1995) Polarized Electroluminescence from an Oriented Substituted Polythiophene in a Light-Emitting Diode
(1996) Spectral Tuning of Electroluminescence in Conjugated Copolymers by Application of an External Electric-Field
(1996) Spectral Tuning of Electroluminescence in Conjugated Copolymers by Application of an External Electric-Field
(1996) Tin Oxide as a Transparent Electrode Material for Light-Emitting- Diodes Fabricated with Poly (P-Phenylene Vinylene)

B2: den **Einrichtungen,** in denen die Publikationen entstanden.

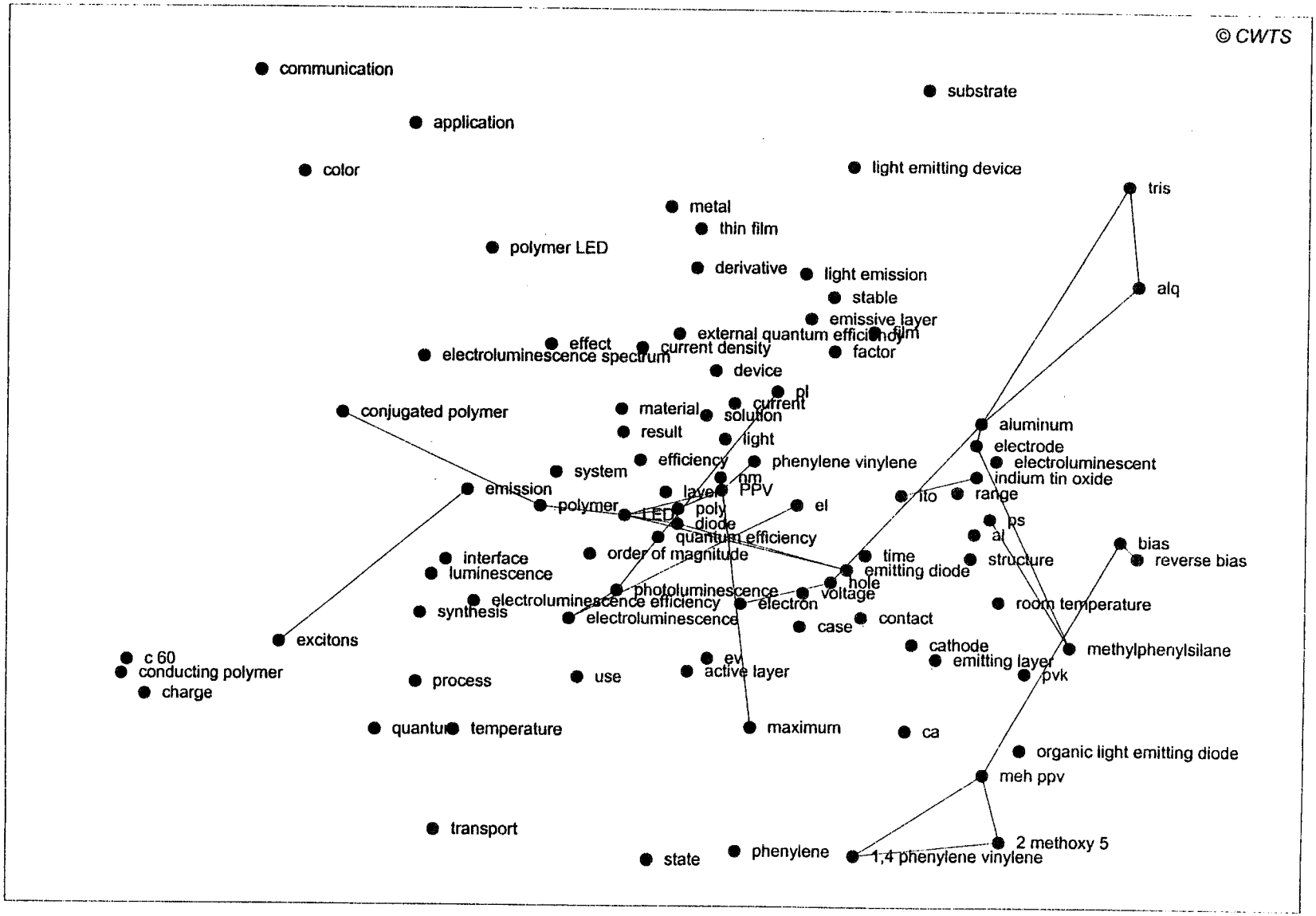
communication

(3) HEBREW UNIV JERUSALEM, ISRAEL
(2) EPICHEM LTD, GREAT BRITAIN
(2) UNIAX CORP, USA
(2) UNIV LOUGHBOROUGH, GREAT BRITAIN
(1) CHALMERS UNIV TECHNOL, SWEDEN
(1) FED UNIV PARANA, BRAZIL
(1) LINKOPING UNIV, SWEDEN
(1) UNIV SAO PAULO, BRAZIL

---

[40] In der Detailkarte links oben.

Detailkarte zu Teilgebiet 1: device / diode / LED / electroluminescence (1994-1996)



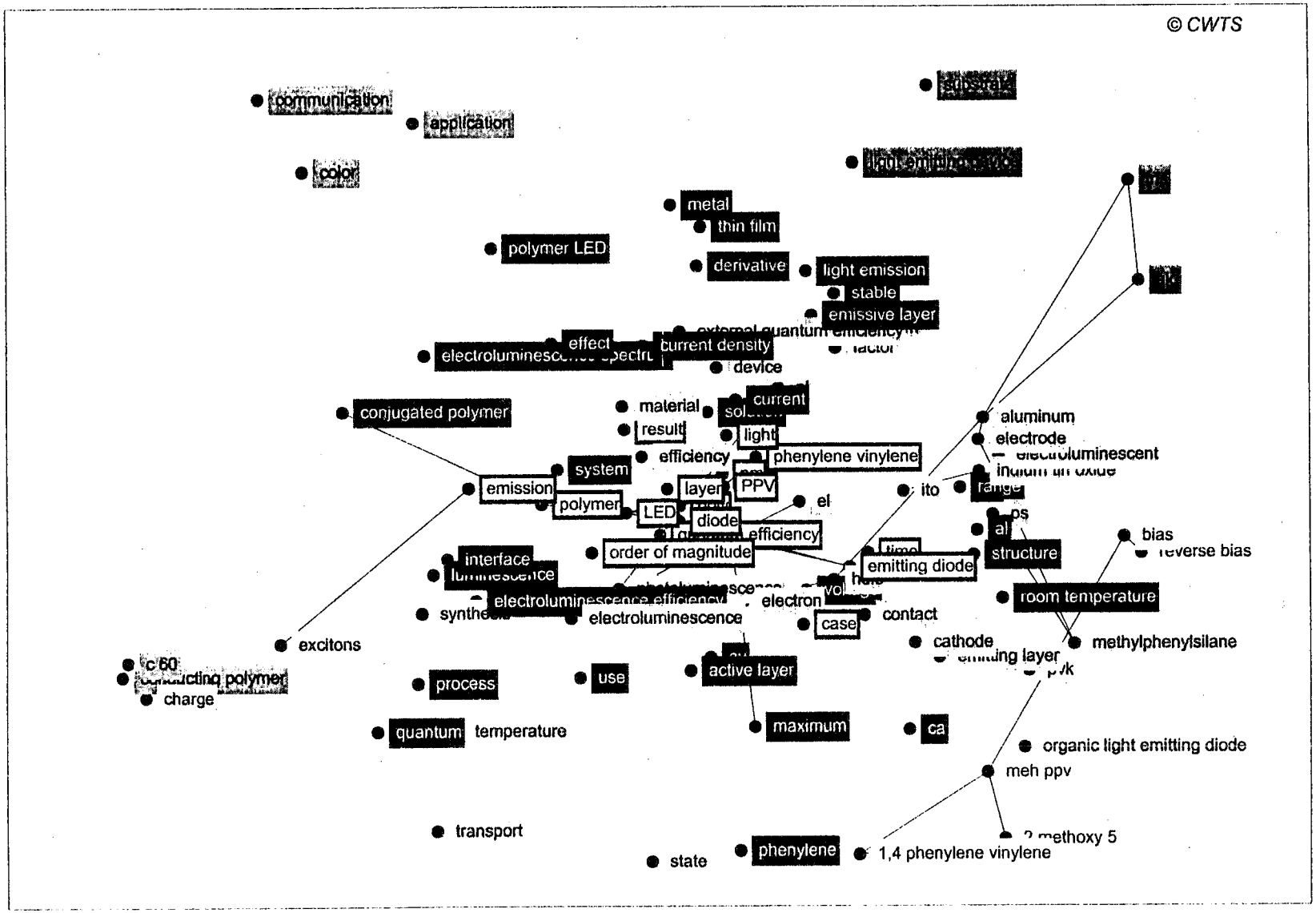
Um weitergehende strukturelle Informationen über Beziehungen innerhalb der Teilgebiete zu gewinnen, werden detaillierte "Cluster-Analysen" zu den einzelnen Keywords durchgeführt. Auf diese Weise lassen sich "Sub-Cluster" von mehreren Keywords in den Teilgebieten identifizieren. In den Detailkarten zu einzelnen Teilgebieten wird mit Hilfe einer farbigen Darstellung gezeigt, welchen Sub-Clustern die einzelnen Keywords (wie zum Beispiel communication und verwandte Begriffe) zuzuordnen sind (vgl. Abbildung auf der folgenden Seite).

(c) Zusammenfassung

Die Übersichtskarten sind für eine größere Gruppe von Wissenschaftlern und Experten in diesem Fachgebiet nutzbar. Das Verstehen und weitere 'Explorieren' der Detailkarten ist dagegen vor allem eine Aufgabe der in diesen Teilgebieten spezialisierten Experten.

Aus diesem Grund können nur die Forscher, die aktiv in einem Gebiet und vor allem in einem Teilgebiet publizieren, als 'echte' Experten betrachtet werden, insbesondere wenn es um die Detailkarten geht. Deshalb sollten diese 'aktiven' Forschergruppen bei der Bewertung der Karten herangezogen werden.

Sub-Cluster von Keywords der Detailkarte zu Teilgebiet 1: device / diode / LED / electroluminescence (1994-1996)



2.4.4. Allgemeine Ergebnisse

Die Ergebnisse, die in den bibliometrischen Analysen erzielt wurden, belegen, daß die gefundene Struktur statistisch signifikant ist. Ein Vergleich der Übersichtkarten für die Perioden 1991-1993 und 1994-1996 zeigt, daß die allgemeine Struktur sich in dieser Zeit wenig geändert hat. Weil es sich in unterschiedlichen Zeiträumen um völlig verschiedene Mengen von Publikationen handelt, ist die Signifikanz der Struktur damit empirisch bewiesen.

Sowohl die Größenordnungen der Zahl der Publikationen als auch die interdisziplinären Strukturen der Fachgebiete und der einzelnen Teilgebiete lassen sich differenziert darstellen. Insgesamt läßt sich die gefundene Struktur unter Einbeziehung zahlreicher Aspekte, vor allem der Aktivitäten von Staaten, deren Forschungseinrichtungen und Unternehmen sowie Kooperationen, erklären.

Bibliometrische Daten für die ausgewählten Forschungsfelder sind somit einerseits im Blick auf Publikationen und Institutionen außerordentlich zahlreich und vielfältig, andererseits können sie durch geeignete Techniken auf Informationsniveaus mit unterschiedlich reduziertem Detaillierungsgrad gehoben werden. Durch die Nutzung des HTML-Formats mit einer Verbindung von graphischen Elementen (Übersichtskarten und Detailkarten) und Text-Elementen ist eine flexible Handhabung der unterschiedlichen Informationsebenen gewährleistet. Auf diese Weise können die Informationen für einen breiten Adressatenkreis auch im Internet vollständig zugänglich gemacht werden.

In der Erfassung bereits veröffentlichter Publikationen basieren bibliometrische Analysen auf zurückliegenden Jahren. Durch spezielle Analysen ist es gleichwohl möglich, zu- oder abnehmende Bearbeitungsintensitäten zu bestimmen ("sich aufheizende" und "abkühlende" Themen). Außerdem lassen sich Bewegung und Dynamik einzelner Teilgebiete über mehrere Jahre zum Beispiel im Sinne von Annäherungen an andere Gebiete oder Verschmelzungen mit ihnen graphisch darstellen und extrapolieren.

Für forschungspolitische Zwecke ist das Instrument neu; durch die Fülle der bereitgestellten Daten und Informationen ist es einerseits beeindruckend, andererseits ist der Aufwand für die Interpretation entsprechend hoch. Bibliometrische Analysen dieser Art können das bisher allein vorherrschende qualitative Verfahren des "Peer Review" unterstützen und ergänzen. Bemerkenswert ist insbesondere, daß entsprechende bibliometrische Analysen verläßlich und relativ rasch erstellt werden können. Es wird in weiteren Projekten, in denen dieses Instrument eingesetzt wird, zu zeigen sein, daß die Methoden der Kartographie auch für forschungspolitische Zwecke ein breiter einsetzbares Mittel sind, um aktuelle Forschungstendenzen empirisch zu dokumentieren und zu analysieren sowie differenzierte Informationen bereitzustellen.

2.4.5. Grenzen

Mit der Mehrzahl bibliometrischer Analysen werden publizierte wissenschaftliche Ergebnisse erfaßt, die ihrerseits Eingang in - meist englischsprachige - Datenbanken gefunden haben. Aufgrund des Publikationverhaltens in zahlreichen Zweigen der Wissenschaft wird damit ein we-

sentlicher Teil wissenschaftlicher Veröffentlichungen erfaßt. Veröffentlichungen in anderen Sprachen können damit jedoch nicht in gleichem Umfang berücksichtigt werden. Prinzipiell ist die Kartographie jedoch nicht - wie die Zitations-Analyse - auf den Science Citation Index mit meist englisch-sprachigen Publikationen beschränkt; sie eignet sich als Methode für die Auswertung einer Vielzahl von Dokumenten in unterschiedlichen Datenbanken.

2.5. Delphi-Befragung zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik

2.5.1. Voraussetzungen und Ziele

Zu den etablierten und ausgereiften Methoden der Vorausschau zählen Delphi-Umfragen und -Berichte. Sie schildern Produktvisionen, die der Fortschritt von Wissenschaft und Technik angesichts der zu erwartenden Nachfrage wahrscheinlich hervorbringen bzw. ermöglichen wird.[41] Diese "Vorhersagemethoden für Forschung und Entwicklung"[42] wurden in den 50er Jahren von der RAND-Corporation in den Vereinigten Staaten entwickelt. Ein Mitarbeiter der RAND-Corporation, Kaplan, der sie maßgeblich entwarf, gab ihnen in Erinnerung an das berühmte griechische Orakel den Namen "Delphi". Eine große Zahl von Delphi-Studien wurde für die amerikanische Rüstungsindustrie verfaßt und ist auch heute noch unzugänglich.

---

41 Grupp, Hariolf: Der Delphi-Report. Innovationen für unsere Zukunft, Stuttgart 1995, S. 13.

42 Ebd., S. 39.

Eine wesentliche Einsicht Kaplans, daß auch ausgefeilte Techniken der Vorausschau keine gesicherte Prognose wissenschaftlicher Erkenntnisse liefern können, ist bei der Durchführung und Nutzung entsprechender Studien lange in Vergessenheit geraten. So bildeten sich falsche Erwartungen an das Instrument heraus. Eine Besinnung auf die methodischen Einsichten der Begründer des Verfahrens und eine entsprechende Relativierung der Erwartung an die Objektivität von Delphi-Visionen ist erst wieder seit Ende der 80er Jahre festzustellen.

Das Instrument wird seit langem auch in Japan eingesetzt. Aufgrund der dort gesammelten Erfahrungen wurde der Erste Deutsche Delphi-Bericht im Jahre 1993 gemeinsam mit dem japanischen National Institute for Science and Technology Policy durchgeführt; in Japan war dies bereits die fünfte große Studie. Die deutsch-japanische Kooperation wurde im Rahmen der sog. Mini-Delphi-Studien (1995) sowie mit dem derzeit noch bearbeiteten zweiten großen Delphi-Bericht fortgesetzt.

"Das hauptsächliche Ziel der Delphi-Befragung liegt (...) darin, festzustellen, *welche Innovationen* voraussichtlich in *welchen Zeitraum* fallen."[43] Dabei wird in der Vorausschau durchaus langfristig, nämlich in Zeiträumen von bis zu 30 Jahren gedacht. Zweck der Delphi-Berichte ist es, Wissen zur langfristigen Orientierung zu sammeln und dabei einen personell und institutionell möglichst breit angelegten Prozeß der Auseinandersetung mit erwarteten

---

[43] BMFT: Deutscher Delphi-Bericht zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik, Bonn 1993, S. XXII f.

und begründbaren Entwicklungen der Wissenschaft, der Technik und der Gesellschaft anzustoßen.[44] Dazu wird ein potentielles Angebot an naturwissenschaftlich-technischen Lösungen dargestellt. Es geht also nicht um eine verläßliche Prognose der künftigen wissenschaftlichen und technischen Entwicklung, die objektiv unmöglich ist. In Delphi-Studien kommen somit dem Produkt (bewertete einzelne Visionen) und dem Prozeß (Abstimmung in der Fachwelt) gleichermaßen Bedeutung zu; so können

- Wissenschaft und Wirtschaft wichtige wissenschaftlich-technische Trends und deren Verhältnis zu sozialen und ökonomischen Prioritäten reflektieren,
- Forschungsförderer längerfristige Trends im Hinblick auf zukünftige Herausforderungen an das nationale Innovationssystem überblicken,
- einzelne Themen einer Disziplin zu übergreifenden Fragestellungen gebündelt und sich herausbildende interdisziplinäre Teilgebiete rechtzeitig erkannt werden,
- Meinungsaustausch und womöglich Konsensbildungen zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Forschungsförderern ermöglicht werden.

2.5.2. Verfahrensschritte

Die grundlegende Aufgabe bei Delphi-Umfragen besteht darin, Visionen von wissenschaftlich-technischen Lösungen zu entwerfen und diese dann Experten mit der Bitte um Bewertung vorzulegen. Es sind deshalb zwei Basisschritte erforderlich: Zunächst müssen geeignete wissenschaftlich-technische Thesen und Visionen zu vorher festgelegten

---

[44] Ebd., S. XI.

Themenfeldern entwickelt werden; diese Aufgabe übernehmen sog. Fachausschüsse. Anschließend werden die Visionen und Thesen in zwei Befragungsrunden Wissenschaftlern aus Unternehmen, Hochschulen und Forschungseinrichtungen sowie Verbänden und dem öffentlichen Dienst zugesandt; dabei sind unterschiedliche Fragen zu beantworten.[45]

Durch die maßgebliche Einbeziehung von "Fach-Experten", darunter einer hohen Anzahl aktiver Wissenschaftler, in die Fachausschüsse und in die Befragungen zählt die Delphi-Methode zu den Verfahren des "Peer Review". Der Kern einer prospektiven Vorausschau liegt in der ersten Phase, da dort die Visionen von Fachausschüssen festgelegt werden. Von den danach befragten Experten können in der Regel keine substantiellen Alternativen zu den vorformulierten Visionen, sondern lediglich Einschätzungen dazu eingebracht werden.

Nach dem Rücklauf der zweiten Runde werden die Einschätzungen und Antworten von einem wissenschaftlichen Sekretariat abschließend analysiert und aufbereitet.

An Delphi-Befragungen und -Berichten sind folgende Akteure beteiligt:

- Auftraggeber (die deutschen Studien wurden vom BMBF in Auftrag gegeben),

---

[45] Zum Beispiel: Einschätzung der eigenen Fachkenntnis; Wichtigkeit der Lösungsbeiträge; Zeitraum der Verwirklichung; Stand der Forschung und Entwicklung; Rahmenbedingungen; mögliche Folgeprobleme.

- ein übergreifender Lenkungsausschuß (er kann optional eingesetzt werden, um den komplexen Prozeß zu begleiten),
- Fachausschüsse, die die Visionen und Thesen formulieren,
- Experten für die Bewertung der Visionen und die Beantwortung der zusätzlichen Fragen (in der ersten Runde werden oft mehrere tausend Fachleute aus verschiedenen öffentlichen und privaten Bereichen des Wissenschafts- und Innovationssystems angeschrieben),
- ein wissenschaftliches Sekretariat, das das Verfahren koordiniert sowie technische und analytische Arbeiten übernimmt (die deutschen Studien wurden vom Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe, betreut).

2.5.3. Ergebnisse

Aufgrund der differenzierten Fragestellungen können die Antworten der Experten nach unterschiedlichen Gesichtspunkten ausgewertet werden. Den Kern bildet die komprimierte Darstellung der bewerteten Einzelvisionen (nach Wichtigkeit, Zeiträumen der Verwirklichung sowie verschiedenenen forschungs- und technologiepolitischen Einschätzungen). In der Regel werden außerdem die insgesamt gewonnenen Informationen und statistischen Daten unter wissenschaftlichen und forschungspolitischen Gesichtspunkten zusammengefaßt, um wichtige Trends darstellen zu können. Ausgewählte Fragen können außerdem zu "Innovations-Szenarien" verdichtet werden.

Aus retrospektiver Sicht kann nach Auffassung des ISI der "Grad der Selbsterfüllung" der Delphi-Visionen als erstaunlich hoch eingestuft werden.[46]

2.5.4. Forschungs- und technologiepolitische Funktion

Der Adressatenkreis von Delphi-Berichten ist weitgespannt; die Ergebnisse werden einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt. Forschungsförderer, wissenschaftliche Einrichtungen und forschende Wirtschaftsunternehmen können die Informationen in eigene strategische Überlegungen einfließen lassen.

Die forschungspolitische Funktion von Delphi-Berichten besteht in dem Angebot von Orientierungswissen für alle Institutionen und Personen im Wissenschafts- und Innovationssystem. Die Auswirkungen hängen vor allem von ihrer Nutzung durch den Auftraggeber und Forschungseinrichtungen oder Wirtschaftsunternehmen ab. So ist zum Beispiel denkbar, ausgehend von bestimmten Visionen Fördermittel für entsprechende Forschungsvorhaben zu vergeben.

Nach Darstellung des BMBF und des ISI wurden die bisherigen Delphi-Studien auf vielfältige Weise von Wissenschaft und Wirtschaft genutzt. Sie wurden in Deutschland allerdings nicht in größere Förderprogramme oder neue Schwerpunkte innerhalb von Forschungseinrichtungen umgesetzt.

---

[46] BMFT: Deutscher Delphi-Bericht zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik, Bonn 1993, S. XXII.

2.5.5. Grenzen

Delphi-Berichte enthalten bewertete Visionen und weiterführende Auswertungen. Dies entspricht ihrem Charakter als "Report". Sie enthalten deshalb keine expliziten forschungs- und technologiepolitischen Empfehlungen.

In methodischer Hinsicht ist die Formulierung der Visionen zentral. Entscheidungen darüber fallen in den Fachausschüssen. Deshalb ist sicherzustellen, daß deren Mitglieder über einschlägiges Wissen und Kompetenz sowie hinreichende wissenschaftspolitische Erfahrung verfügen. So muß zum Beispiel gewährleistet sein, daß die herausragenden Entwicklungen in bestimmten Fachgebieten erfaßt und angemessen eingeschätzt werden.

Aufgrund der notwendig knappen Aussagen zu einzelnen Visionen (ohne detaillierte Erläuterung von Kontexten etc.) ist nicht stets sichergestellt, ob "das Gemeinte" von allen hinreichend verstanden wird. In der Regel sind die Äußerungsmöglichkeiten der befragten Wissenschaftler beschränkt, da sie Anworten durch Ankreuzen geben. In den meisten Delphi-Befragungen fehlt der Raum zu wissenschaftlich-qualitativen Stellungnahmen.

Bei der Auswertung der Antworten, bei der der Aspekt der Repräsentativität eine wichtige Rolle spielt, ist allerdings nicht feststellbar, welche gesellschaftlichen oder Verbraucher-Interessen sich in den Antworten widerspiegeln. Schließlich ist nicht feststellbar, ob die um Antwort gebetenen Fachleute selbst geantwortet oder aber die Beantwortung möglicherweise delegiert haben.

Gerade wenn Delphi-Studien mit identischen oder ähnlichen Fragenkatalogen in zwei unterschiedlichen (Wissenschafts-)Kulturen wie zum Beispiel Deutschland und Japan durchgeführt werden, zeigt sich, daß ein Teil der Fragen und der Antworten auf "systemspezifische" Unterschiede und kulturelle Gewohnheiten zurückzuführen ist.

2.6. Zur Funktion und Leistung der eingesetzten Methoden

Bei der Erarbeitung der Pilotstudie kam es darauf an, prospektive Analysen vorzulegen, bei denen der Bogen von längerfristig zu bearbeitenden wissenschaftlichen Fragestellungen bis hin zu Anwendungsmöglichkeiten zu spannen war, wobei internationale wissenschaftliche Entwicklungen zu berücksichtigen waren.

Voraussetzung und entscheidende Grundlage prospektiver Analysen und Empfehlungen sind die Kenntnisse von Wissenschaftlern, die auf den unterschiedlichen Gebieten ausgewiesen sind und über das erforderliche Fachwissen verfügen; entsprechend wurden Vorschläge von Mitgliedern der Arbeitsgruppe und von weiteren Wissenschaftlern zur Bestimmung geeigneter Themen gesammelt und für die prospektiven Analysen genutzt (vgl. Kap. 2.3.). Es hat sich als sinnvoll erwiesen, diese Beiträge um empirisch bzw. quantitativ ausgerichtete Verfahren zu ergänzen. Dabei kommt den Wissenschaftlern erneut eine entscheidende Funktion bei der Betrachtung, Einordnung und Bewertung der entsprechenden Ergebnisse zu.

Methoden der bibliometrischen Kartierung erlauben eine differenzierte Analyse aktueller internationaler Tenden-

zen und eignen sich damit insbesondere als Mittel der Strukturierung gegenwärtiger und in zurückliegenden Jahren vorgelegter Forschungsarbeiten (vgl. Kap. 2.4.). In der Erfassung bereits veröffentlichter Publikationen sind sie retrospektiv angelegt. Die bibliometrischen Methoden wurden konsequent auf interdisziplinäre Fragestellungen angewendet.

Delphi-Verfahren sind methodisch ausgereifte Instrumente zur Vorausschau (vgl. Kap. 2.5.). Eine eigene Delphi-Befragung wäre jedoch zu aufwendig und kostenintensiv gewesen. Deshalb wurden Visionen aus bestehenden Delphi-Berichten in die Beratung der ausgewählten Forschungsgebiete einzubezogen und erneut reflektiert.

Mit den Delphi-Berichten und der bibliometrischen Kartierung sind Verfahren gewählt worden, die Visionen bzw. aktuelle Informationen über Entwicklungen in der Forschung auf sehr breiter Basis bereitstellen; sie bilden wichtige komplementäre Verfahren zu einer Informationsgewinnung über Experten und Expertengruppen. Die Verzahnung der qualitativen und empirisch-quantitativen Verfahren führt zu einem erhöhten Kenntnisstand.

Wichtigstes Merkmal des Vorgehens ist die Verknüpfung unterschiedlicher Methoden. Bei künftigen prospektiven Analysen und Studien können die Methoden der Forschungsprospektion (zum Beispiel durch eigene Delphi-Befragungen) noch weiter ergänzt bzw. verfeinert werden. Dabei ist auch das Verständnis der Wissenschaft für die Ziele der Forschungsprospektion weiter zu fördern; dies betrifft insbesondere die Stärkung der Interdiszplinarität

der Forschung, die Verbindung zwischen grundlegenden wissenschaftlichen und anwendungsbezogenen Fragestellungen und die Integration unterschiedlicher Methoden und Arbeitsformen.

Die Arbeitsgruppe "Prospektion der Forschung" hat in ihren Anhörungen und internen Beratungen eine Reihe forschungs- und technologiepolitischer Fragen erörtert, die sich im Blick auf die Nutzung dieses Instruments stellen. Dabei erkannte sie Defizite, die einer Verständigung über mittel- und längerfristige Perspektiven in Forschung und Technologie sowie einer effektiven Umsetzung wissenschaftlicher Erkenntnisse in (technische) Innovationen im Wege stehen. Diese Defizite werden - nach einer Skizzierung der allgemeinen wissenschaftspolitischen Voraussetzungen - im folgenden dargelegt; daran schließen sich Vorschläge zur Überwindung der Defizite an.

Forschungs- und technologiepolitischer Kontext

1. Voraussetzungen

Die Bundesrepublik Deutschland verfügt über ein vielgestaltiges und funktional differenziertes System öffentlich finanzierter wissenschaftlicher Institutionen. Grundlagenforschung und angewandte Forschung werden von universitären und außeruniversitären Einrichtungen in einer Vielzahl von Organisationsformen betrieben. Die institutionelle Förderung seitens der staatlichen Träger bildet eine wesentliche Grundlage für die Forschungsarbeiten. Diese kann durch Projektmittel für jeweils befristete Vorhaben ergänzt werden. Ein Teil der Projektmittel, insbesondere im Rahmen der Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, wird ohne inhaltliche oder forschungspolitische Vorgaben - im Wettbewerb um die vorhandenen Mittel - antragsinitiiert und nach den Maßstäben wissenschaftlicher Qualität vergeben. Diese Form der Forschungsförderung gewährleistet Autonomie der Forschung, da die Projektanträge keiner thematischen Beschränkung unterliegen. Ein weiterer Teil der Projektmittel wird programmgebunden an wissenschaftliche Einrichtungen und Unternehmen vergeben. Mit solchen Schwerpunktsetzungen können als vordringlich erachtete Forschungsaufgaben - vor allem im Hinblick auf mögliche Anwendungen - forciert bearbeitet werden. Prospektive Analysen und Empfehlungen können insbesondere für diese forschungs- und technologiepolitischen Fördermaßnahmen genutzt werden.

In Deutschland lassen sich die wissenschaftlichen Leistungen der Einrichtungen sowie die technologische Position im internationalen Vergleich als gut einstufen. Unterdessen

nimmt der Wettbewerb unter den Wissenschafts- und Innovationssystemen zu, und es ist eine Aufgabe auf nationaler Ebene, die internationale Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. Dazu können unterschiedliche forschungspolitische Instrumente eingesetzt werden. Eines der wesentlichen Instrumente ist eine wissenschaftsgeleitete Forschungsprospektion, für die - wie die folgende wissenschaftspolitische Bestandsaufnahme zeigt - ein Bedarf besteht, die Voraussetzungen aber noch geschaffen werden müssen.

2. Defizite

(1) Unzureichende Verständigung innerhalb der Wissenschaft

In seinen "Empfehlungen zu einer Prospektion für die Forschung" hat der Wissenschaftsrat festgestellt, daß eine Verständigung innerhalb der Wissenschaft über mittelfristige Entwicklungsperspektiven kaum stattfindet. Es fehlt insbesondere eine Verständigung über Ziele und Themen der Forschung, die jenseits der Fachgrenzen und -interessen angesiedelt sind. Eine solche wissenschaftsgeleitete, d.h. von Wissenschaftlern entscheidend mitgeprägte Abstimmung ist notwendig, um künftig wünschenswerte Arbeitsschwerpunkte aus Sicht der Forschung bestimmen zu können; dabei handelt es sich um Zeithorizonte von 10 bis maximal 15 Jahren, die erforderlich sind, damit sich neue Forschungs- und Wissensgebiete herausbilden und etablieren können.

Dieser Befund einer mangelnden Abstimmung auf nationaler Ebene gewinnt vor dem Hintergrund des beispiellosen

Wachstums in den Wissenschaften an Gewicht. Der weltweit sichtbare Strukturwandel läßt sich einerseits mit dem Begriff einer allgemeinen Dynamisierung der Wissensproduktion und des Wissenstransfers beschreiben; er führt andererseits auch zu einer zunehmenden Unübersichtlichkeit.[1] So ist der Wissenschaftssektor in den letzten vier Jahrzehnten weltweit rasch gewachsen; gemessen am Personal ist eine Zunahme um das 8-10fache zu verzeichnen. Parallel dazu hat die Zahl der wissenschaftlichen Veröffentlichungen und des forschungsspezifischen Informationsvolumens stark zugenommen. Allein im Gebiet der Materialwissenschaft werden jährlich rund 100.000 wissenschaftliche Publikationen international veröffentlicht. Diese Entwicklung wird begleitet durch einen intensiven internationalen Austausch (Kooperationsprojekte, Konferenzen etc.) und durch eine signifikante Verbesserung der Kommunikationsmöglichkeiten (Fax, E-Mail, Internet) mit einer entsprechend beschleunigten Verbreitung und Anwendung des Wissens. Mittlerweile erhält ein Drittel der Alterskohorte in Industrieländern eine akademische Ausbildung und Sozialisation und trägt auf unterschiedliche Weise zur Nutzung und Verbreitung des erworbenen Wissens bei. Schließlich scheinen die herkömmlichen Disziplinen ihre dominierende Funktion als Steuerungs- und Orientierungsinstanzen für die Wissensproduktion zu verlieren, und es bilden sich "invisible colleges" als neue Netzwerke der wissenschaftlichen Kommunikation heraus.

---

[1] Vgl. dazu Peter Weingart: Prospektion und strategische Planung. Konzepte einer neuen Wissenschaftspolitik. In: Stifterverband für die deutsche Wissenschaft: Wirtschaft & Wissenschaft 3/1995, S. 44-51.

(2) Fehlender Konsens über Ziele, Methoden und Einsatz einer Forschungsprospektion

Seit einigen Jahren werden prospektive Studien in verschiedenen europäischen Ländern mit dem Ziel durchgeführt, neue Schwerpunkte in Forschung und Technologie zu bestimmen und damit die Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten. Funktion und Akzeptanz dieses Instruments in Beratung und Planung sowie das Ausmaß der Umsetzung von Ergebnissen entsprechender Studien sind dabei recht unterschiedlich. In Großbritannien werden im Rahmen des "Technology Foresight Programme" industriepolitisch geprägte Ziele verfolgt.[2] In den Niederlanden steht die Notwendigkeit der Prioritätensetzung bei der Bildung von Forschungschwerpunkten und in der Mittelallokation im Vordergrund.[3]

In Deutschland hat es verschiedene, überwiegend der Begründung, Erkundung oder Beschreibung von mittel- und langfristigen Forschungszielen dienende Bemühungen gegeben[4], die bisher jedoch ohne klar erkennbare förderpolitische Konsequenzen blieben:

- "Förderung der Grundlagenforschung durch den Bundesminister für Forschung und Technologie. Empfehlungen der Kommission Grundlagenforschung" (1992)

---

[2] Office of Science and Technology: Technology Foresight. Progress Through Partnership (15 Bde.), London 1993.

[3] Foresight Steering Committee: A Vital Knowledge System. Dutch research with a view to the future, Amsterdam 1996.

[4] Gewisse Überschneidungen ergeben sich ferner mit prospektiv ausgerichteten Studien aus dem Umfeld der Technikfolgenabschätzung.

- "Technologie am Beginn des 21. Jahrhundert" (Grupp, 1995)
- "Deutscher Delphi-Bericht zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik" (1993) und "Delphi-Bericht 1995 zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik (Mini-Delphi)" (BMBF)
- Inhaltliche Aspekte der Materialwissenschaft in der "Stellungnahme des Wissenschaftsrates zur außeruniversitären Materialwissenschaft" (1996)
- "Die Bedeutung der Informationstechnik für die Gesellschaft des 21. Jahrhunderts" (ZVEI, 1993)
- „Perspektiven der Forschung und ihrer Förderung - Aufgaben und Finanzierung" (Deutsche Forschungsgemeinschaft, 1997)
- "Schwerpunkte künftiger Technologieentwicklungen" (Baden-Württemberg, 1988)

Es besteht in Deutschland allerdings noch kein Konsens über Wert, Ziel und systematischen Einsatz einer Forschungsprospektion. So fehlt eine Verständigung darüber, ob und wie Instrumente - aus übergreifender Perspektive - systematisch eingesetzt werden können, mit denen herausragende, neuartige interdisziplinäre Fragestellungen in Forschung und Technologie identifiziert und bei deren Verwendung Perspektiven und Interessen der akademischen Forschung, von Bund und Ländern sowie von Wirtschaftsunternehmen angemessen berücksichtigt werden.

(3) Zu geringe Interdisziplinarität in Forschung und Entwicklung sowie in der Lehre

In prospektiven Studien[5] sowie generell in der forschungspolitischen Diskussion wird vielfach die These aufgestellt, daß Neues vor allem "zwischen" den Disziplinen entstehe.[6] Es bedarf also der Zusammenarbeit mehrerer Disziplinen, um zu grundlegenden wissenschaftlich-technologischen Innovationen gelangen zu können. "Echte Interdisziplinarität" erfordert eine konzeptionell gut begründete und längerfristig angelegte Zusammenarbeit von Vertretern unterschiedlicher (traditioneller) Disziplinen wie Biologie, Chemie und Physik; eine Kooperation von Teil- oder Subdisziplinen eines größeren Fachgebietes verdient diese Bezeichnung nicht.

Interdisziplinäre Forschung ist gleichwohl noch relativ selten. Entsprechenden Projekten stehen verschiedene Hemmnisse entgegen:

- Einzelne Wissenschaftler, aber auch Abteilungen oder Institute von Hochschulen und Forschungseinrichtungen wirken zwar mit anderen Forschergruppen zusammen, allerdings stammen diese weit überwiegend aus eng benachbarten Gebieten. Dies gilt auch für Forschung und Entwicklung in Wirtschaftsunternehmen. Wissenschaftliche Projekte sind häufig ausschließlich additiv-arbeitsteilig organisiert. Brückenschläge zu ferner stehenden

---

[5] Vgl. Abschnitt (6), Kommission Grundlagenforschung, S. 8; Grupp ²1995, S. 26, 253.

[6] Gibbons, Michael et al.: The New Production of Knowledge, London 1994

Disziplinen - unter für alle Beteiligten weitgehend neuartigen Fragestellungen - werden zu selten gewagt.

- Die Ausbildung der Studierenden und des wissenschaflichen Nachwuchses ist bis hin zur Habilitation disziplinär strukturiert. Die Karrieremuster innerhalb und zum Teil auch außerhalb der Wissenschaft orientieren sich an herkömmlichen Disziplinen. Auch die Professuren sind einzelnen Disziplinen zuzurechnen und nur in wenigen Fällen fachübergreifend angelegt.

- Programme, die Forschung nach thematischen Gesichtspunkten fördern, sind ebenfalls überwiegend disziplinär angelegt, so daß neuartige interdisziplinäre Fragestellungen zwischen bestehende Programme fallen und nicht gefördert werden.

- Disziplinäre Strukturen werden außerdem durch die vorherrschende Organisationsform von Fachreferaten in Ministerien und Einrichtungen der Forschungsförderung gestützt, die traditionell Entwicklung und Interessen spezieller Fachgebiete fördern.

Vor diesem Hintergrund ist es schwierig, ambitionierte und risikobehaftete, mittelfristig angelegte Forschungsprojekte durchzuführen, die ein Zusammenwirken verschiedener Disziplinen und Institutionen mit einem größeren personellen und finanziellen Aufwand erfordern. Stattdessen herrscht vielfach noch eine Sprachlosigkeit zwischen den Disziplinen.

(4) Unzureichende Verknüpfung von Wissenschaft und Wirtschaft

"Die Triebfeder der jüngsten industriellen Revolution ist das Wissen im weitesten Sinne"[7]. Wie die Entwicklung beispielsweise in Informationstechnologie und Biotechnologie zeigt, kommt dem durch Forschung systematisch erzeugten neuen Wissen und der raschen Umsetzung der Forschungsergebnisse höchste Bedeutung für die Innovationsfähigkeit zu. Auf diese Weise hängen Wirtschaftswachstum und Sicherung des Wohlstands und der sozialen Errungenschaften eng mit der ständigen Weiterentwicklung der Wissensbasis, der Methoden und Techniken und ihres Transfers in Produktionsverfahren, Güter und Dienstleistungen zusammen.

Gleichwohl findet in Deutschland eine die Wissenschaft in öffentlich finanzierten Einrichtungen und forschenden Wirtschaftsunternehmen gleichermaßen einbeziehende Verständigung über mittelfristig gemeinsam zu verfolgende Forschungsaufgaben kaum statt. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Es wurden bisher kaum geeignete Instrumente erprobt oder systematisch eingesetzt; generell bereitet nicht nur interdisziplinäres Arbeiten, sondern auch bereichs- und branchenübergreifendes Vorgehen große Schwierigkeiten.

Darüber hinaus bestehen strukturelle Unterschiede zwischen beiden Bereichen. Wissenschaft und Wirtschaft haben unterschiedliche Ziele: Erzeugung neuen Wissens und Steigerung der wissenschaftlichen Reputation auf der einen und ein hoher Markterfolg bei der Herstellung von Produkten oder dem

---

[7] OECD: Wissenschafts-, Technologie- und Industrieausblick 1996, S. 264.

Angebot von Dienstleistungen auf der anderen Seite. Außerdem denken Wissenschaft und Wirtschaft häufig in unterschiedlichen Zeithorizonten. Schließlich entsprechen nationale Stärken in der Wissenschaft nicht stets der technologischen Leistungsfähigkeit oder den Vermarktungsinteressen der Wirtschaft in diesem Land.

Der Wissenschaftsrat hat die mangelnde Abstimmung in bestimmten Fördergebieten, bestehende Kommunikationsschwierigkeiten zwischen Wissenschaft und forschenden Wirtschaftsunternehmen und die zu lange Dauer der Umsetzung von Forschungsergebnisse in technische Produkte in seiner Stellungnahme zur außeruniversitären Materialwissenschaft eingehend analysiert und beschrieben. Vor diesem Hintergrund hat er die Einrichtung eines Beirates für Materialforschung empfohlen, der zur besseren Vernetzung zwischen öffentlich finanzierter Forschung und Wirtschaft beitragen soll.[8] Gegenwärtig werden Vorbereitungen getroffen, um diesen Beirat einzurichten.

(5) Mangel an langfristigem Denken und an Risikobereitschaft

Zahlreiche Basiserfindungen haben ihren Ursprung in Deutschland, wurden aber dort nicht maßgeblich industriell verwertet. Vielfach fehlt einerseits die Verbindung von Visionen mit entsprechend mittel- und langfristig angelegten Vorhaben in Forschung und Entwicklung und andererseits

---

[8] Wissenschaftsrat: Stellungnahme zur außeruniversitären Materialwissenschaft, Köln 1996, S. 88-95 und S. 102-105.

der Wille zur Umsetzung von erzielten Forschungsergebnissen in (technisch) innovative Produkte. So wird das Ziel, eine möglichst hohe wissenschaftliche Qualität und zugleich eine rasche Anwendbarkeit der Forschungsarbeiten zu gewährleisten, sowohl von öffentlich finanzierten Einrichtungen als auch Wirtschaftsunternehmen nicht mit der notwendigen Konsequenz verfolgt. Der dazu erforderliche "sense of urgency" und die Motivation, im internationalen Wettbewerb zu bestehen, sind in vielen Bereichen und Disziplinen zu gering ausgeprägt.

Insgesamt ist die Zahl ambitionierter und wissenschaftlich anspruchsvoller, aber mit einem hohen Risiko behafteter Forschungsprojekte auch in der öffentlich finanzierten Forschung zu gering. Zu häufig werden Projekte mit geringem wissenschaftlichem Risiko und "mittlerem Innovationsgehalt" gefördert. Die Gründe sind auch darin zu suchen, daß es in Zeiten knapper Mittel und entsprechender Ablehnungsquoten offenbar opportun erscheint, Fördermittel für "sichere" Projekte (in einem zum Teil fortgeschritteneren Stadium) zu beantragen und zu bewilligen.

3. Perspektiven

Vor dem Hintergrund der festgestellten Defizite werden folgende Vorschläge ausgesprochen, die eine Forschungsprospektion und deren wissenschaftspolitische Kontexte teils unmittelbar teils in einem weiteren Sinne berühren:

(1) Stärkung der wissenschaftlichen Exzellenz durch Prospektion

Durchschnittliches wissenschaftliches Wissen ist international zugänglich; es wird zunehmend tauschbar, zum Teil auch handelbar. Zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit nationaler Forschungs- und Innovationssysteme sind jedoch herausragende wissenschaftliche Leistungen wichtiger als ein breit gestreutes Mittelmaß. Ziel einzelner prospektiver Analysen und Studien muß es deshalb auch sein, attraktive Forschungsfelder zu identifizieren und darin exzellente Forschung zu stärken, aber nicht das Mittelmaß auszuweiten.

*

Das Instrument der Prospektion kann dabei in verschiedenen Bereichen des Forschungssystems eingesetzt werden und sich auf Aufgaben der Grundlagenforschung und der Anwendung beziehen. Einzelne Analysen und Studien können entweder Grundlagen- oder Anwendungsaspekte gemeinsam betrachten oder eine Seite stärker betonen. Es zeigt sich, daß auch Vorhaben der Grundlagenforschung der Orientierung an übergreifenden Zielen bedürfen, wesentliche Arbeitsschritte sind zudem planbar. Gleichwohl eignet sich "Anwendbarkeit" nicht als Maßstab der Forschungsförderung für die Beurteilung wissenschaftlicher Qualität und Relevanz in der Grundlagenforschung.

Prospektive Analysen und Empfehlungen können auch genutzt werden, um Vorschläge nationaler Wissenschaftsorganisationen für neue Schwerpunkte innerhalb internationaler oder

supranationaler Forschungsprogramme vorzubereiten und zu begründen.

(2) Förderung der interdisziplinären Zusammenarbeit

In der vorliegenden Pilotstudie haben die prospektiven Analysen die grundlegende Bedeutung interdisziplinärer Themen für maßgebliche Fortschritte in Forschung und Technologie für alle drei Gebiete gezeigt (vgl. Kapitel 1). Zu unterscheiden ist zwischen einer allgemeinen fruchtbaren Wechselwirkung zwischen Disziplinen, die sich längerfristig zum Beispiel durch Rezeption von Forschungsergebnissen einstellt, und gezielter interdisziplinärer Kooperation, die zu Beginn von Vorhaben vereinbart wird und sich strukturbestimmend auswirkt. Diese Form der gezielten Interdisziplinarität muß deutlich gestärkt werden; es bedarf eigens dazu entwickelter Forschungsvorhaben. Wichtige Ansätze zu einer solchen interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen einzelnen Wissenschaftlern oder Forschergruppen sind in zahlreichen Sonderforschungsbereichen und Forschergruppen zu erkennen, die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert werden; dies gilt auch für die Bayerischen Forschungsverbünde und ähnliche Instrumente. Ein Ausbau ist jedoch entscheidend.

Für die Lehre bietet es sich an, neue fachübergreifende Studiengänge vor allem für fortgeschrittene Studenten zu entwickeln, nachdem ein disziplinäres Fundament gelegt ist.

*

Die Forderung nach interdisziplinärer Forschung wird vielfach erhoben, sie läßt sich jedoch offenbar nur schwer einlösen. Aufgrund der zunehmenden wissenschaftlichen Arbeitsteilung und Spezialisierung verfügen nur wenige Wissenschaftler über Kenntnisse und Wissen in mehreren Disziplinen. Echte interdisziplinäre Zusammenarbeit erfordert, daß Kooperationspartner jeweils in ihrer Disziplin erfahren und ausgewiesen sind und wohlbegründete kooperative Projekte mit übergreifenden Fragestellungen durchführen.

Aufgrund des nicht zufriedenstellenden Niveaus der interdisziplinären Kooperation sollte die Wissenschaftsforschung sich dieses Themas unter besonderer Berücksichtigung der bestehenden Hemmnisse annehmen.

(3) Kritische Bewertung von Forschungsvorhaben und -ergebnissen

Die Ansätze zur Intensivierung des Wettbewerbs in der Forschung und zur Erhöhung der Effizienz in der Forschungsförderung sind weiter auszudehnen. Dies betrifft insbesondere die leistungsbezogene und befristete Förderung von Forschungsprojekten (von der überregionalen bis auf die institutsinterne Ebene). Bei Evaluationen in der Projektförderung gilt es verstärkt, die erzielten Ergebnisse von Forschungsprojekten, -schwerpunkten oder -verbünden und nicht nur die Anträge kritisch zu bewerten.

*

In der Praxis der Projektförderung liegt das Schwergewicht der Aufmerksamkeit von Gutachtern und Forschungsförderern auf den in den Anträgen enthaltenen Ideen. Die Bewertung der mit der Förderung erzielten Ergebnisse auch unter Berücksichtigung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses hat dagegen einen zu geringen Stellenwert. Deshalb ist der "Ergebniswettbewerb" in Ergänzung zu dem bisher vorherrschenden "Ideenwettbewerb" zu stärken. In entsprechenden Evaluationsverfahren sind differenzierte, den Forschungstypen (grundlagen- oder anwendungsorientiert) angemessene Bewertungsmaßstäbe anzuwenden. Bei der Förderung und Steuerung größerer Vorhaben mit einer ausgeprägten Anwendungsorientierung empfiehlt sich eine regelmäßige Überprüfung der erzielten Fortschritte in Abständen von zwei bis drei Jahren. Bei negativen (Zwischen-)Ergebnissen müssen Vorhaben beendet werden, auch wenn sie längerfristig geplant waren.

Bei der Prüfung von Projektvorschlägen und -ideen ist einerseits der Unsicherheit des Verlaufs und der Ergebnisse von Forschungsprojekten Rechnung zu tragen. Andererseits sind, insbesondere wenn es um Fragen der angewandten Forschung geht, Aspekte wie Relevanz für Innovationen sowie sachliche und zeitliche Realisierbarkeit stärker zu berücksichtigen.

(4) Optionen offenhalten und aktiv verfolgen

In der Förderung größerer Forschungsvorhaben (insbesondere mit hoher technologiepolitischer Bedeutung) ist eine thematische Fokussierung notwendig. Dafür sprechen nicht nur finanzielle Gründe, sondern vor allem auch die Tatsache, daß es weder sinnvoll noch möglich erscheint, die Grenzen des Wissens in alle Richtungen gleichzeitig zu erweitern. Dies darf aber nicht zu einer zu frühen Verengung der Optionen unter Ausschluß paralleler Ansätze führen.

*

Zu Beginn von umfangreicheren und zu koordinierenden Forschungsarbeiten sind begründete Aussagen über erwartbare zukünftige wissenschaftlich-technische Sachverhalte zu formulieren. Derartige Zielbestimmungen haben eine wichtige orientierende Funktion. Die Bearbeitung von Aufgaben in Forschung und Entwicklung erfordert jedoch einen fortwährenden Lern- und Anpassungsprozeß an neue Gegebenheiten. Dies liegt zum einen an der prinzipiellen Offenheit und Dynamik von Forschungsprozessen, zum anderen an der Wechselwirkung zwischen Forschung und sich oft rasch auftuenden neuen technologischen Möglichkeiten.

In Forschung und Entwicklung ist also eine regelmäßige Überprüfung der ursprünglich gesetzten Ziele selbst, der Zielerreichung und der dazu eingesetzten Mittel und Methoden notwendig. Insofern verbieten sich "Dekadenfestlegungen" im Sinne einer unreflektierten Verfolgung einmal gesetzter Ziele. Bei der Formulierung von Forschungszielen bestehen nicht nur 'kontinuierliche Szenarien' im Sinne

einer zu erwartenden stetigen Entwicklung zu bestimmten Zwecken, sondern eine große Vielfalt der Entwicklungsmöglichkeiten. Aus diesem Grund sind einfache Trendextrapolationen, die aus den Erfahrungen und Kenntnissen der Vergangenheit zukünftige Entwicklungen ableiten, häufig weder sinnvoll noch effektiv.

Deshalb kommt es darauf an, innerhalb von Forschungsschwerpunkten oder -feldern unterschiedliche Optionen zu verfolgen oder wenigstens nicht auszuschließen. So muß zum Beispiel die Möglichkeit "polychromer" Forschungsansätze offengehalten werden, bei der parallele Ansätze mit verschiedenen Strategien verfolgt werden. Beispielsweise sind in der Datenspeicherung sowohl magnetische als auch optische Techniken zu entwickeln. Ähnliches gilt für die Display-Technik (anorganisch-organische Leuchtdioden, Plasma, Flüssigkristalle) und die Druck-Technik (Tintenstrahl, Laser, mechanische Druckmethoden). Als historisches Beispiel können Motoren angeführt werden (Otto-, Diesel- und Wankelmotor).

Die Erfahrung lehrt, daß solche Verfahren sich oft nicht ausschließen, sondern wechselseitig ergänzen können und vermeintlich sichere Prognosen im Blick auf zu bevorzugende Technologien sich trotz bester Ausarbeitung nachträglich immer wieder als falsch herausgestellt haben.

(5) Ausgewogenes Verhältnis zwischen Vorhaben mit größerem und geringerem wissenschaftlichen Risiko

In der institutionellen und projektbezogenen Förderung nehmen längerfristig angelegte Vorhaben mit einem hohen wissenschaftlichen Risiko einen geringen Anteil an den geförderten Projekten ein. Um Forschungsleistungen auf hohem wissenschaftlichen Niveau zu ermöglichen, ist die Förderung risikoreicher Arbeiten jedoch unerläßlich. Insgesamt geht es darum, ein ausgewogenes Verhältnis zwischen diesen Vorhaben und solchen Projekten herzustellen, bei denen es als relativ sicher gelten kann, daß die ins Auge gefaßten Ziele in einem überschaubaren Zeitraum erreicht werden können.

*

Wenn entsprechende Voraussetzungen, wie ein vielversprechendes Forschungspotential und neue Forschungsaufgaben, gegeben sind, sollten deshalb auch risikobehaftete Projekte stärker gefördert werden. Wissenschaftler und wissenschaftliche Einrichtungen, die mit ihren bisherigen Leistungen bestens ausgewiesen sind und geeignete Vorarbeiten erbracht haben, sollten die Möglichkeit erhalten, hochinnovative und im Blick auf den Forschungserfolg riskante interdisziplinäre Projekte für einen längeren Zeitraum beantragen zu können.

Bei Projekten mit einem geringeren wissenschaftlichen Risiko kommt es vor allem darauf an, die Forschungsziele möglichst rasch und effektiv zu erreichen (vgl. Abschnitte (3) und (4)). Im Falle der angewandten Forschung lehrt die Erfahrung, daß die Anwendungspotentiale eines Forschungs-

gegenstandes allein noch nichts über die jeweils geleistete Anwendungsorientierung in den Forschungsaktivitäten besagen. Deshalb muß Forschung in solchen Gebieten, denen Anwendungsbezüge immanent sind und bei denen eine frühzeitige Einbindung von Wirtschaftsunternehmen sinnvoll ist (wie zum Beispiel in weiten Bereichen der Materialforschung, der Energieforschung oder der Informationstechnologie), nicht nur an Gesichtspunkten der wissenschaftlichen Qualität und des Innovationsgehalts, sondern künftig deutlicher an realisierbaren Anwendungen orientiert sein.

(6) Vergleichbare Wettbewerbsbedingungen

Im deutschen Wissenschaftssystem bestehen Forschungseinrichtungen mit unterschiedlichen Finanzierungsstrukturen. Allen Einrichtungen muß eine Partizipation an mittelfristig angelegten, in Prospektionsstudien angeregten Forschungsvorhaben ermöglicht werden, wenn sie über die entsprechenden wissenschaftlichen Voraussetzungen verfügen.

*

Bei der Vergabe von Fördermitteln ist sicherzustellen, daß unterschiedlich finanzierte Institute jeweils Forschungsvorhaben mit einem größeren Zeithorizont betreiben können. Nur auf diese Weise kann einer Verzerrung der Wettbewerbsbedingungen entgegengewirkt werden. Andernfalls würde der Wettbewerb beschränkt, und es bliebe ein bedeutendes Forschungspotential für solche Ansätze ungenutzt.

(7) Flexible überregionale Kooperationen

Für größere Forschungsaufgaben bietet es sich an, besonders leistungsfähige Teil-Institute oder Arbeitsgruppen aus bestehenden Forschungseinrichtungen projektbezogen als "Institute auf Zeit" zusammenzuschließen. Dies gewährleistet eine Kooperation der für die Aufgaben am besten geeigneten Gruppen und fördert effektivere Arbeitsformen; bestehende Grenzen zwischen Instituten werden überbrückt.

(8) Gründung von neuen Technologieunternehmen

Die Gründung von neuen Technologieunternehmen hat eine hohe volkswirtschaftliche sowie forschungs- und technologiepolitische Bedeutung. Bund und Länder, Hochschulen und Forschungseinrichtungen sowie etablierte Unternehmen sollten auch weiterhin der Gründung neuer Unternehmen durch (jüngere) Wissenschaftler große Aufmerksamkeit schenken, da es sich hierbei um eine der effektivsten Formen des Technologietransfers handelt. Jüngere Wissenschaftler sollten eine Unternehmensgründung als attraktive Alternative zum Eintritt in bestehende Unternehmen oder in den öffentlichen Dienst betrachten.

*

Seit einigen Jahren erfahren junge Technologieunternehmen, die zum Beispiel durch Ausgründungen aus Hochschul- und Forschungseinrichtungen entstehen, eine besondere Förderung. Sie verdienen diese Aufmerksamkeit, weil dort junge, überwiegend wissenschaftlich hervorragend ausgebildete

Gründer mit hohem persönlichen Engagement neue Produkte und Dienstleistungen entwickeln und vermarkten. Derartige Unternehmen erfordern ein exzellentes wissenschaftliches Umfeld, weil hochinnovative Produkte mit guten Marktchancen in der Regel nicht auf einzelne wissenschaftliche Arbeiten, sondern auf breitere Forschungstraditionen und -erfolge zurückgehen. Eine solche neue und flexible Unternehmenskultur hat insbesondere in einschlägigen Technologie- und Gründungsregionen in den Vereinigten Staaten langfristig bemerkenswerte industrie- und auch beschäftigungspolitische Erfolge gezeitigt.

Zwar stehen sowohl in Europa als auch speziell in Deutschland erhebliche öffentliche Mittel für Technologieunternehmen zur Verfügung, aber in Deutschland ist - trotz hoffnungsvoller Ansätze - noch keine ausreichende Anzahl von technologieorientierten Unternehmensgründungen festzustellen; ein positiver Trend ist gleichwohl zum Beispiel im biotechnologischen Sektor zu erkennen. Erst allmählich haben Banken, Kreditinstitute und andere private Kapitalgeber ein Verständnis für Chancen und Probleme dieser Unternehmen entwickelt. Es wird vermehrt Risikokapital angeboten, da bankübliche Kreditfinanzierungen kein geeignetes Instrument für technologieorientierte Unternehmensgründungen sind. Die bestehenden öffentlichen Fördermöglichkeiten können zu einer Reduzierung des unternehmerischen Risikos beitragen. Offenbar erscheint vielen potentiellen Unternehmensgründern die Gefahr des Scheiterns jedoch als zu groß. Auch staatlich gesetzte Rahmenbedingungen führen vielfach noch zu einer zu starken Regulierung und erweisen sich auf diese Weise als hinderlich. Es macht sich darüber hinaus bemerkbar, daß eine "Kultur der Selbständigkeit" mit einer ent-

sprechend großen Breitenwirkung in Deutschland fehlt. Für die Gründung und Führung von Unternehmen sind Fähigkeiten erforderlich, die zum Teil weit über die in Studium und wissenschaftlicher Ausbildung erworbenen Qualifikationen hinausgehen. Neben den weiterhin anzubietenden finanziellen Hilfen und Beratungsangeboten öffentlicher Einrichtungen bedarf es daher auch der Ausbildung und Motivierung von Studenten und jüngeren Wissenschaftlern zur unternehmerischen Selbständigkeit; dazu können auch entsprechende Lehrangebote von Hochschulen beitragen.