
Christiane Gebhardt/Susanne Giesecke

Die Spezifität der Entwicklungspfade in der Biotechnologie und der Künstlichen Intelligenz

1. Einleitung

In der nicht enden wollenden Debatte um den „Innovations- und Produktionsstandort“ Deutschland wird der schwarze Peter zwischen Parteipolitikern, Wirtschaftsverbänden, Gewerkschaften und Vertretern anderer gesellschaftlicher Organisationen hin- und hergeschoben. Inzwischen hat sich die Suche nach den Verantwortlichen von der Akteurebene auf die Struktur- und Prozeßebene ausgeweitet. Folglich mußte sich die deutsche Forschungs- und Technologiepolitik die Frage gefallen lassen, ob sie an dem Anspruch gescheitert ist, die Wettbewerbsfähigkeit und das wirtschaftliche Wachstumspotential des vermeintlichen „Hochtechnologiestandorts Deutschlands“ zur Entfaltung zu bringen.

Allzu schnell werden ein ineffizienter bürokratischer Apparat und die allgemeine „Steuerungsunfähigkeit“ staatlicher Institutionen als die wesentlichen Gründe verfehlter Forschungs- und Entwicklungspolitik (FuE-Politik) angeführt. Doch diese Schuldzuweisungen gehen am Kern der Ursachen vorbei. Nichtintendierte Effekte und fehlgeleitete Politiken sind komplexer konstituiert und müssen daher auf die spezifische Entwicklungslogik der zu fördernden Technologien selber zurückgeführt werden. Diese Entwicklungslogiken, die von einer Technologie zur anderen unterschiedlich sind, werden oft von der Förderungspolitik nicht wahrgenommen, was in der Natur der Sache liegt, da sich diese Logik *ex post* ergibt, d. h. eine zielgesteuerte FuE-Politik kann nicht im Voraus die marktkonformen Potentiale einer Technologie erkennen oder gar wecken. Eine „erfolgreiche“ FuE-Politik ist viel besser beraten, den Kontext der Technologieentwicklung so zu gestalten, daß sich ein möglichst breites Spektrum von Anwendungspotentialen über den Markt anschließen kann, also trotz ihrer inhärenten Blindheit gegenüber der zukünftigen Entwicklung möglichst viele Optionen, die sich gegenseitig ergänzen, bereitzustellen. Aus der Analyse von vergangenen Entwicklungspfaden lassen sich dennoch Anregungen für die Optimierung von FuE-Politik ableiten.

Im folgenden Artikel wollen wir die Komplexität dieser Entwicklungslogiken für die Beispiele Biotechnologie und Künstliche Intelligenz und ihre Bedeutung für staatliche FuE-Politik ausführen. Um diese Spezifitäten abzubilden, bedarf es zweier Analyseperspektiven: Zum einen den Längsschnitt zweier verschiedener Technologien; wir haben hier die Biotechnologie und die Künstliche Intelligenz (KI) gewählt, weil es sich bei beiden

um Hochtechnologien mit einem hohen gesellschaftlichen Durchdringungsgrad handelt. Beide Technologien werden für zukunftsfähig und standortsichernd gehalten und sind an den Schnittstellen anderer wissenschaftlicher Disziplinen entstanden. Sie haben aber dennoch sehr unterschiedliche Entwicklungen vollzogen. Zum anderen bedarf es eines Querschnitts dieser Technologieentwicklungen in zwei verschiedenen Staaten, hier in der Bundesrepublik und in den USA. Diese beiden bieten sich als Vergleichsstaaten an, da sie hochindustrialisiert sind und in beiden Technologien miteinander konkurrieren. Beide haben aber unterschiedliche Technologiepolitiken verfolgt.

Die technologie- und nationalspezifischen Perspektiven werden für die Zeit- und Raumdimension wie für die Kapital- und Anbindungsstruktur vergleichend untersucht. Eine zentrale Rolle kommt in allen Vergleichskategorien den Akteuren zu, die diese Kategorien miteinander verbinden und ihre Interdependenz herstellen. Das folgende Schaubild gibt einen Überblick:

Kategorien der technologie- und nationalspezifischen Entwicklung

Anbindungsstrukturen	Technologiespezifisch		Nationalspezifisch
ZEIT	Entwicklungszeiten Produktzyklen Ausdifferenzierung	A K T	Förderphase (Initiierung und Umsetzung der Technologie) Anpassung an die globale Produktionsweise
RAUM	Geographische Konzentration innovationsbedingender Infrastruktur globale Vernetzung	E U R	Institutionelle und programmatische Förderung
KAPITAL	Kapitalintensität	E	Finanzierungsstruktur

Wer gegenwärtig über Entwicklungs- und Innovationsmodi von Hochtechnologien wie der Künstlichen Intelligenz oder der Biotechnologie reden will, stößt unweigerlich auf ein herausragendes Charakteristikum, das die Technologien per se prägt: die Unmöglichkeit, sie präzise in ein technisches oder in ein ökonomisch-industrielles Definitionsfeld einzuordnen, sowie auf den hohen Unsicherheitsfaktor hinsichtlich ihrer zukünftigen Entwicklungspotentiale. Diese Situation wirft ein neues Licht auf eine For-

schungs- und Technologiepolitik, die zukunftsfähige Schlüsseltechnologien etablieren will.

Die Großtechnologien (*Big Science*¹), die sich lange Zeit dadurch auszeichneten, alle gesellschaftlichen Lebensbereiche zu durchdringen und zu verändern, können längst keine optimistischen Zukunftsperspektiven mehr entwerfen. So entsprechen die gesellschaftlichen Folgewirkungen der Implementation der Biotechnologie und der Künstlichen Intelligenz weder den prognostizierten Negativszenarien noch den allzu optimistischen industriepolitischen Fortschrittserwartungen. Die Entstehung und Entwicklung von Groß- und Hochtechnologien verläuft keineswegs geradlinig, sondern wird von einer Vielzahl neuer Innovationsformen bereichert. Entwicklungsverläufe von komplexen Technologien sind folglich nicht von vornherein absehbar und schon gar nicht gezielt. Sie scheinen eher unkontrollierbar zu sein. Eine Konsequenz dieses autonomen Entwicklungsverlaufs von Technologie ist, daß sich der Staat nach jahrzehntelanger missionsorientierter Hochtechnologiepolitik aus diesem Politikfeld zurückzieht: Staatliche Forschungsmittel in diesen Bereichen werden entweder gekürzt und der Industrie überlassen oder eklektisch eingesetzt, um die knappen finanziellen Mittel für die Anschubfinanzierung neu entstehender technologischer Felder einsetzen zu können. So werden Programminhalte offenbar wahllos umformuliert und Förderinstrumente gewechselt, ohne daß diese Änderungen in der Programmatik von einer Evaluierung der technologisch-industriellen Wirkungen begleitet wäre. Beispielsweise werden zur Zeit im Bereich der alternativen Energien wie der Photovoltaik Fördermittelzuweisungen zurückgeschraubt. Im Kontrast dazu gibt es verstärkt Mittel für die Biotechnologie, ohne daß auf eine überzeugende positive Bilanz der Wirkungen der bisherigen Ausgaben zurückgeblickt werden kann. Aneh hier ist eine Wirkungsanalyse unterblieben, mit der diese Entscheidung begründet werden könnte.

Staatliche Technologiepolitik erweist sich aber als notwendige Maßnahme zur Generierung einer wissenschaftlich-technologischen Grundausstattung einzelner Räume in einer zunehmend globalisierten Wirtschaft.² Diese integrierte Forschungs- und Entwicklungslandschaft wird zur wichtigen Standortvoraussetzung jener Industrien, die auf dem Weltmarkt mit Produkten konkurrieren, die einen hohen Komplexitätsgrad sowie einen hohen FuE-Anteil aufweisen. Aus diesem Grunde sehen westliche Industriestaaten die Notwendigkeit, strategisch wichtige Technologiebereiche in ihrem Systemcharakter zu identifizieren und zu fördern.

Für die beiden hier diskutierten Fälle Künstliche Intelligenz und Biotechnologie zeichnen sich jeweils Überlappungen zu anderen Industrien

1 D. de Solla Price, *Little Science, Big Science ... and Beyond*. New York 1963.

2 G. Colletis/B. Pecqueur, *Die französische Diskussion über die Industriedistrikte – Über die Bildung von „Territorien“ im Postfordismus*, in: W. Krumbain (Hrsg.), *Ökonomische und politische Netzwerke in der Region*, Münster 1994.

ab, die sich teilweise auch in den Förderschwerpunkten widerspiegeln. Aus dem Mix kompatibler Elemente aus bereits entwickelten Technologien entstehen neue Entwicklungen zu sogenannten Hybridtechnologien. Eine klare Abbildung der Entwicklungsstränge der Wissenschaft auf die industrielle Implementation ihrer Ergebnisse in die unterschiedlichsten Bereiche ist nicht mehr möglich.³ Die Zyklen der Schlüsseltechnologien, die in den fünfziger Jahren im Forschungssystem etabliert wurden, weisen eine zunehmende Zerfaserung in neue Segmente auf. Die neue Unübersichtlichkeit der technologischen Entwicklungslogik liegt dabei in der Natur der Sache selbst, nämlich „in der tendenziellen Differenzierung und Diversifizierung, die jeder Technologie inhärent ist, weil intern Optionen generiert werden“⁴, die dann von unterschiedlichen wissenschaftlichen und industriellen Segmenten weiter verfolgt werden: „Differentiation threatens to become fragmentation, control through technology threatens to become control by technology, co-operation with government and industry threatens to become colonization by them.“⁵

Die neue Konfusion über Sinn und Erfolg der Technologiesteuerung betrifft auch die hier diskutierten Technologien. Die Biotechnologie und die Künstliche Intelligenz zeichnen sich heute beide in erster Linie durch ihre Diversifizierung aus. Sie sind Querschnittstechnologien und haben das Potential, in vielen unterschiedlichen Branchen angewandt zu werden. Sie können sowohl produkt- wie auch prozeßinnovativ sein. Es gibt eine große Bandbreite von biologischen und biochemischen Vorgängen, die man als biotechnologisch kategorisieren kann – von der traditionellen Enzymfermentation bis hin zur modernen Molekularbiologie.⁶ Der Entwicklungsmodus der Biotechnologie bestimmt sich einerseits durch das kumulierte Wissen um die DNA-Struktur (*science-based*), andererseits durch den Grad der Integration von verschiedenen (biologischen und chemischen) Prozessen aus unterschiedlichen Wissenschaftsrichtungen und Diffusion in andere Technologien. Eine potentielle Diversifizierung macht die Biotechnologie für viele industrielle Anwendungsmöglichkeiten interessant. Von *der* Biotechnologie kann verallgemeinernd genausowenig gesprochen werden wie von *einer* Biotechnologieindustrie.

Die Diversifizierung der KI erklärt sich in gleicher Weise aus ihrer Relevanz für unterschiedliche wissenschaftliche Disziplinen und industrielle

3 F. Kodama, Technologiefusion – der Weg zum Erfolg auf Zukunftsmärkten, in: Harvard Business Manager, Bd. 1, 1992; W. Rammert, Technik aus soziologischer Perspektive, Opladen 1993.

4 P. Weingart (Hrsg.), Technik als sozialer Prozeß, Frankfurt a. M. 1989.

5 S. Crook/J. Pakulski/M. Waters, Postmodernization, London 1992, S. 206.

6 Allerdings beschränkt sich diese Studie auf die sogenannte moderne Biotechnologie. Sie umfaßt den gezielten Eingriff in die DNA und die selektive Veränderung genetischer Erbinformationseinheiten. So können in vitro Mikroorganismen entworfen und produziert werden, die wiederum bestimmte Substanzen absondern und dann in einer Vielzahl von Prozessen eingesetzt werden können, wie z. B. zur Fermentation.

Anwender in der Informationstechnologie. Technologische Inhalte der KI wie Systemlösungen, Planverfahren, Parallelrechnen und Robotik vereinfachen komplexes Netzmanagement sowie Steuerungs- und Regeltechnik und sind in den industriellen Sektoren Telekommunikation, Verkehr, Fertigung, Medizin, Umweltschutz und Unterhaltungselektronik strategisch wichtig. Die Bedeutung dieser Technologie besteht in einem stetig steigenden Anteil von KI-Lösungen in erfolgreichen Anwendungssystemen der genannten Sektoren.

War die Künstlichen Intelligenz (KI) in den Anfängen unter Profitabilitäts Gesichtspunkten ähnlich risikoreich wie die Biotechnologie, hat seit den achtziger Jahren die Kommerzialisierbarkeit von Produkt- und Prozesslösungen zugenommen. Forschungsergebnisse in diesem Bereich haben besonders in Verbindung mit der Mikroelektronik, der Datenverarbeitung und der Softwareentwicklung in die Informationstechnologieindustrie Eingang gefunden. Obwohl beide Technologien eine ähnliche Zerfaserung ihrer Entwicklungsverläufe zeigen, gibt ein Vergleich der beiden Technologien über die strukturellen Unterschiede Aufschluß, die sich aus dem Technologiezyklus und der aufnehmenden Industriestruktur in den einzelnen Ländern ergeben. Inwiefern diese spezifischen Entwicklungsverläufe durch die Aufgabenbereiche des Staates tangiert werden, ergibt sich aus der vergleichenden Analyse der beiden Entwicklungswege.

Die folgende Kategorisierung der beiden Technologien gemäß ihrer respektiven Abhängigkeit von der wissenschaftlich-technologischen Basis (*science-based*, d. h. überwiegend auf den Erkenntnissen aus der Grundlagenforschung basierend, oder *technology-based*, also auf technischer Weiterentwicklung beruhend) zeigt die Unterschiedlichkeit der Verlaufswege an dem kritischen Punkt des Überganges von der Wissensgenerierung zur industriellen Anwendung. Diese strukturellen Unterschiede der beiden Beispiele sind an der Schnittstelle, an der sich technologische Entwicklungslinien in der Industrie artikulieren können, in ihrem technologieimmanenten und nationaltypischen Charakter dargestellt.

2. Die Entwicklung der Biotechnologie an der Schnittstelle zur industriellen Anwendung

Die Betrachtung von Innovationsentwicklung und politischer Programmatik der Biotechnologie in Deutschland läßt sich in zwei Phasen unterteilen: die erste von 1968 bis 1981 und die zweite daran anschließend bis in die Gegenwart. Die Kausalität von politischer FuE-Steuerung und industriell anwendbarer Innovation ist in diesen beiden Phasen durchaus unterschiedlich. Beide Phasen sind gekennzeichnet von verschiedenen Defiziten, die die gewünschten Steuerungseffekte hemmten. Diese Defizite waren in der ersten Phase struktureller und inhaltlicher Art.

Im Rahmen des Programms „Neue Technologien“ von 1968 begann in Deutschland die gezielte Förderung der Biotechnologie früher als in jedem

anderen Land. Schwerpunkte dieser Anfänge waren zum einen die Errichtung der „Gesellschaft für Biotechnologische Forschung“ in Braunschweig als zentrale Bundesforschungsanstalt dieser Forschungsrichtung; zum anderen wurden aus dem Forschungsetat der Projektförderung traditionelle Richtungen in der Biotechnologie unterstützt. Als Zuwendungsempfänger in dieser ersten Phase hatten sich in der Hauptsache die großen Pharmaunternehmen des Landes qualifiziert. Mit der Aufnahme des „Forschungsschwerpunktes Biologie, Medizin und Technik“ von 1971 beim damaligen Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft erhielt der Förderschwerpunkt weitere Konturen und wurde ein Jahr später im neugegründeten Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT, heute BMBF) beheimatet. Für die inhaltliche Ausarbeitung durch die „Arbeitsgruppe Biologie, Ökologie und Medizin“ berief das BMFT eine Beratergruppe aus Experten, die sich in erster Linie aus Vertretern der deutschen Chemie- und Pharmakonzerne zusammensetzte. Neue Innovationsfelder wurden für die Biotechnologie jedoch nicht erschlossen. Die Firmen zeigten kein bedeutendes Interesse, das Forschungsprogramm mit Hilfe ihrer guten Kontakte zum Ministerium so auszurichten, daß ihr Rückstand zu den neuesten Entdeckungen in den USA (Duplikation der DNA) aufgeholt werden konnte.⁷

Das Bundesministerium für Forschung und Technologie bzw. seine Vorgänger, das seine Handlungsdomäne expandieren und unter dem Eindruck erlahmender Traditionstechnologien neue Optionen schaffen wollte, konnte die entsprechenden Akteure in Industrie und Wissenschaft von der Bedeutung und Notwendigkeit der Biotechnologie nicht überzeugen. Die vielversprechenden staatlich geförderten Forschungseinrichtungen (neben der Gesellschaft für Biotechnologische Forschung [GBF] das Institut für Biotechnologie in Jülich, eine Reihe von Max-Planck-Instituten mit Schwerpunkten zur Biotechnologie sowie etliche Universitätsinstitute und Projektträger) und die Projektförderung⁸ konnten inhaltlich keine neuen Akzente in der traditionellen chemischen und biotechnischen Forschung durchsetzen.

Strukturell scheiterten die intendierten forschungspolitischen Ziele an der gegenseitigen Blockierung der involvierten Akteure auf den verschiedenen politischen Ebenen (Bund vs. Länder) und an der Eigendynamik der forschenden Institutionen (z. B. bei der GBF, innerhalb derer es verschiedenen Positionen gab). In diesen verhärteten Strukturen liegt die Ursache für die sogenannten *Lock-ins*, die die Innovationsdynamik der deutschen Biotechnologie hemmten. Der Terminus *Lock-in* bezeichnet Blockaden im

7 Vgl. K. Buchholz, Die gezielte Förderung und Entwicklung der Biotechnologie, in: W. v. d. Daele/P. Krohn/P. Weingart (Hrsg.), Geplante Forschung. Vergleichende Studien über den Einfluß politischer Programme auf die Wissenschaftsentwicklung, Frankfurt a. M. 1979.

8 Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Biotechnologie-Programm 2000, Bonn 1991.

Netzwerk, die die Optimierung von Prozessen und deren Resultaten verhindern. Die technologiespezifische Entwicklungslogik, ihr Vermögen, Impulse von außen aufzunehmen und als Hybridtechnologien weiterzuentwickeln, war mit den bestehenden Anbindungsstrukturen nicht kompatibel. So blieben bahnbrechende Ergebnisse aus dieser Forschungsförderung in der deutschen Biotechnologie im allgemeinen aus. Von einigen Ausnahmen abgesehen dauerte es mehrere Jahre, bis die deutsche Industrie die Relevanz der Biotechnologie nicht nur auf der Forschungsebene sondern auch auf der kommerziellen Ebene erkannte, obwohl Vertreter aus der Pharmaindustrie selbst die Förderprogramme mitformulierten.⁹

Der sogenannte „Hoechst-Schock“ Anfang der achtziger Jahre markiert den Beginn der zweiten Entwicklungsphase der deutschen Biotechnologie.¹⁰ Als die deutschen Pharmariesen zu realisieren begannen, daß sie den Anschluß an die Entwicklung in den USA zu verlieren drohten, veränderten nicht nur die Unternehmen ihre Strategien, sondern auch die staatlichen Akteure versuchten ihr Programm den neu wahrgenommenen Herausforderungen anzupassen. Auf der anderen Seite des Atlantik, in den USA, hatten dagegen sowohl die Großindustrie, aber vor allem die innovativen Kleinunternehmer, sogenannte Entrepreneurs, schon seit den frühen siebziger Jahren die Bedeutung der Biotechnologie für die Entwicklung marktfähiger Biotechnologie-Arzneimittel erkannt und setzten diese profitabel um.

Die Defizite der ersten Phase der Biotechnologieentwicklung in Deutschland hatten eine faktische Wirkung, die sich auch in der zweiten Phase durchsetzte. Zwar orientierten sich die Unternehmen jetzt in ihrer Forschung um und maßen der neuen Biotechnologie größeren Stellenwert bei. Es wurden mehr Anträge auf Forschungsförderung beim BMFT gestellt und die Finanzmittel stiegen drastisch (von DM 68 Mio. im Jahr 1981 auf DM 254 Mio. 1988), eine Reaktion, die bis heute anhält (inzwischen sind es annähernd DM 450 Mio.).

Das BMFT reagierte mit einer neuen Schwerpunktausrichtung und initiierte zunächst das „Förderprogramm Angewandte Biologie und Biotechnologie“, später abgelöst vom Folgeprogramm „Biotechnologie 2000“. Staatlich geförderte Genzentren entstanden in innovativen Regionen (neben Köln noch München, Heidelberg und Berlin); auch inhaltlich wurde in den Förderprogrammen jetzt mehr auf die kommerziellen Möglichkeiten

9 Vgl. K. Buchholz, Die gezielte Förderung und Entwicklung der Biotechnologie (Anm. 7) und U. Dolata, Weltmarktorientierte Modernisierung. Die ökonomische Regulierung des wissenschaftlich-technischen Umbruchs in der Bundesrepublik, Frankfurt a. M. 1992.

10 Der deutsche Pharmariese Hoechst verkündete 1981, daß das Unternehmen einen Millionenbetrag in das renommierte Massachusetts General Hospital in den USA investieren werde, um mit den dortigen Wissenschaftlern auf dem Gebiet der medizinischen und pharmazeutischen Biotechnologie zu kooperieren.

Bezug genommen, die die Gentechnologie anzubieten schien.¹¹ Vor allem mit dem neuetablierten Instrument der Verbundforschung sollten Kooperationen zwischen Industrie und öffentliche geförderter Forschung zusammengeführt werden, um die Marktumsetzung der potentiellen Produkte zu beschleunigen.

Das Problem war jedoch, daß die intendierten Förderungsziele anbindungsfähiger Innovationen auch jetzt nicht mit den Instrumenten des BMFT erreicht werden konnten. Das für *Lock-ins* typische Beharrungsvermögen tradierter Strukturen und Orientierungen wurde nur peripher aufgebrochen. Statt dessen folgten die Unternehmen, die es sich leisten konnten, der Modernisierungsstrategie von Hoechst: Sie gingen Kooperationen mit innovativen Unternehmen in den USA ein, um sich dort einzukaufen, zu forschen, zu entwickeln und zu produzieren.

3. Nationaltypische Entwicklungsverläufe In der Biotechnologie

Die Entwicklungsverläufe der Biotechnologie und der KI in Deutschland grenzen sich deutlich von denen in den USA ab. Die Reaktion der deutschen Pharmakonzerne zeigt die typische Innovationsdynamik in der deutschen Biotechnologie: in die USA gerichtete strategische Allianzen, Fusionen und Akquisitionen. Kapital auf der einen Seite (Deutschland) paart sich mit Know-how auf der anderen Seite (USA). Diese „Übersee-Strategie“ der deutschen aber auch anderer europäischer und japanischer Unternehmen hatte mehrere Gründe. Zum einen war und ist die Biotechnologie in den USA am weitesten fortgeschritten. Forschungsinstitutionen und qualifiziertes Personal in privater und öffentlicher Forschung sind den Deutschen etwa um fünf bis zehn Jahre voraus. In den USA wird weniger die Biotechnologie an sich gefördert. Statt dessen liegen die Schwerpunkte auf Grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung in der Medizin schlechthin. Dieser Bereich wird vom Staat ganz massiv über die Forschungsförderung in den National Institutes of Health, die Forschungseinrichtung der amerikanischen Gesundheitsbehörde, unterstützt. Da heutzutage fast alle medizinischen Teilbereiche auf biotechnische Forschung setzen, treffen hier technologiespezifische Entwicklungslinien auf bereits bestehende Anschlußfähigkeiten in der konkreten medizinischen Umsetzung. Diese Adaptionspotentiale werden nicht von der Forschungspolitik formuliert, sondern von den pragmatischen Bedarfsanforderungen der medizinischen Forschung geprägt. Die Schwerpunktsetzung geschieht also nicht auf der politischen, sondern auf der praktisch-technologischen Ebene. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zum deutschen Modell.

Zum anderen war und ist es wichtig, ein Unternehmen dort anzusiedeln, wo das größte Marktpotential besteht.¹² Und schließlich bietet das US-

11 Biotechnologie-Programm 2000 (Anm. 8).

12 Dazu Dolata, Weltmarktorientierte Modernisierung (Anm. 9).

amerikanische Forschungsfinanzierungssystem (über den Risikokapitalmarkt und indirekt über die Gesundheitsforschung und zahlreiche private Stiftungen) mehr Flexibilität und Risikobereitschaft für Unternehmensausgründungen, die erforderlich sein können, um bestimmte Produktlinien zu verfolgen. Das Problem der deutschen Biotechnologie (nicht nur im Pharmabereich) besteht in den ausbleibenden marktfähigen Innovationen. Die industrierelevante Forschung in der Biotechnologie konnte in Deutschland nicht bevorzugt gefördert werden, weil auf der einen Seite kein Konsens darüber bestand, auf welche zu Adaptionspotentialen ausbaubare Schwerpunkte gesetzt werden sollte. Auf der anderen Seite wurde die Vielfalt der möglichen Förderinstrumente für eine innovative Industrie nicht ausgeschöpft, sondern auf die Biotechnologie als Innovationsstrategie an sich gesetzt.

Die relativ offenen Förderschwerpunkte in der KI trafen dagegen auf eine diversifizierte anschlussfähige Anwenderstruktur in der Informationstechnologie. Die Förderprogramme des Bundesforschungsministeriums und auch die institutionelle Förderung offerierten in beiden Fällen eine große Vielfalt an inhaltlichen Förderoptionen, die in der Biotechnologie aber nur von den großen Unternehmen der Pharmaindustrie in Anspruch genommen wurden. Dagegen sorgten kleine innovative Unternehmen in der KI insbesondere im Softwarebereich für Tempo und neue Impulse und bildeten so Ausgangspunkte für neue Entwicklungswege. Sie gaben außerdem Anregungen für bestehende Sektoren in den großen Unternehmen der Automobil- oder Elektronikindustrie. In der Biotechnologie wurde hingegen das gefördert, was ohnehin schon vorhanden war, neue Gebiete aber kaum getestet. Diese *Lock-ins* gerieten zum technologischen Nachteil, weil die Forschung in Deutschland trotz aller staatlicher Bemühungen keine Spitzenposition erreichte. Eine Folge war, daß relevante Akteure in der Biotechnologie in die USA abwanderten.

Die Unflexibilität der Förderstrukturen, die darin bestand, sich der Entwicklungslogik der Biotechnologie nicht anzupassen, und die fehlende Anschlußmöglichkeit staatlicher Förderungsinstrumente an die Bedürfnisse der Industrie und Wissenschaft, verstärkte die Tendenz anwendungsferner *Lock-ins* in den wissenschaftlichen Förderbereichen. Auf der politischen Seite kommt noch ein weitere Faktor hinzu: Technologiepolitik wurde nahezu ausschließlich als Domäne des BMFT definiert, abgesehen von der Ressortforschung der einzelnen Ministerien wie das Bundeslandwirtschaftsministerium und das Bundeswirtschaftsministerium. Die Strukturen in der deutschen FuE-Politik waren nicht flexibel genug, um sich der technologiespezifischen Logik anzupassen. Es gab kein kongruentes Zusammenspiel aller relevanten staatlichen Organe. Die Technologiepolitik verstand sich nicht als Schnittstelle aller relevanten Strukturen und Akteure. In den USA dagegen waren die kontextuellen FuE-Politiken kompatibel mit der Anbindungsstruktur des Marktes und den Finanzierungsoptionen. Ergebnisse aus der universitären Forschung konnten auf

dem Industriesektor effektiver umgesetzt werden. Kleine und mittelständische Unternehmen, sogenannte KMU, haben wesentlich zur Technologieentwicklung und -diffusion sowie zur Marktentwicklung beigetragen. Auf diese Finanzierungsstruktur konnten deutsche Unternehmensgründer nicht zurückgreifen. Die unbedeutende Rolle deutscher KMU für die Biotechnologieentwicklung liegt nicht zuletzt an den traditionellen Strukturen in Forschung und Markt, die von den großen Pharmakonzernen dominiert werden. Zwar gibt es eine geringe Anzahl von kleinen Biotechnologieunternehmen in der BRD, die als Innovationspartner für die größeren Pharmaunternehmen dienen, doch engagieren sich letztere immer noch bevorzugt in den USA, um ihren Innovationsrückstand aufzuholen.

Die Biotechnologie-Förderungspolitik des Bundes war so angelegt, daß bestehende Strukturen aufgegriffen und wiederholt wurden und so die Innovationsgenerierung den großen Pharmakonzernen überlassen blieb. Sie vereinnahmten den größten Anteil der hierfür zur Verfügung gestellten BMFT-Gelder, die allerdings in den FuE-Haushalten der Konzerne selbst nur einen geringen finanziellen und inhaltlichen Stellenwert haben. Folglich war dies kein forschungspolitisches Instrument zur Stimulierung von Innovationen, sondern bestenfalls das Salz in der Suppe großer Pharmaforschungsetats. Aus den umfangreichen Analysen anderer Technologien ist zur Genüge bekannt, daß große Konzerne zu schwerfällig sind, um flexibel auf die neuen Anforderungen des Marktes zu reagieren.¹³ Dies gilt auch für den Forschungsbereich. Diese Riesen sind daher auf Impulse aus kleinen, dynamischen und flexiblen Unternehmen angewiesen, wie auch das Beispiel USA zeigt. Die deutsche Industrie- und die Forschungsförderungsstruktur gab den KMU jedoch keine Chance, sich in der Biotechnologie zu engagieren. Die Bedeutung ihres Innovationspotentials wurde zu spät erkannt. So ist es nicht weiter verwunderlich, wenn sich die deutschen Unternehmen ihre strategischen Allianzen dort suchen, wo die innovativsten KMU prosperieren.

Ein weiteres Hemmnis für die Innovationsfähigkeit der deutschen Biotechnologie ist, daß sie in Forschung und Industrie zu wenig als das wahrgenommen wird, was sie ist: nämlich als Querschnittstechnologie. D.h. die Ausrichtung ist immer noch zu sehr in den einzelnen Technologiesegmenten verhaftet und die Integrationsansätze, das ganze Potential dieser Technologieäste zu einer neuen Technologie zu verknüpfen, sind die Ausnahme. Es zeichnet sich bereits ab, daß der zukünftige Entwicklungsweg der Biotechnologie gekennzeichnet sein wird durch:

- den Modernisierungsdruck der Pharmaindustrie (flexible Spezialisierung bei gleichzeitiger Erhaltung der Massenmärkte) und die wachsen-

13 Deswegen haben sich große Konzerne in der Mikroelektronik in den achtziger Jahren auch strukturell stark verändert und viele Teilbereiche ausgegliedert. In der Pharmabranche ließ dieser Umstrukturierungsprozeß jedoch erheblich länger auf sich warten. Erst kürzlich begannen die Konzerne mit der Neuorganisation ihrer Portfolios.

- de Konkurrenz auf dem Weltmarkt in dieser und anderen biotechnologierelevanten Industrien;
- das Vermögen anderer Industrien, marktfähige Applikationen aus dem Querschnittsbereich, den die Biotechnologie durch die Integration anderer Technologien bildet, zu generieren;
 - die Fähigkeit der technologiepolitischen Akteure, ihre Instrumente gemessen an neuen Erfordernissen einzusetzen. Das impliziert auch ein Aufbrechen der strukturbedingten *Lock-ins*.

4. Der Entwicklungsweg der Künstlichen Intelligenz an der Schnittstelle zur Anwendung in der Informationstechnologie

Etwa zeitgleich zur staatlichen Förderung der Biotechnologie wuchs das Bewußtsein forschungspolitischer Institutionen über die zunehmende Bedeutung der KI. Im Jahre 1966 veranlaßte die Debatte um die sogenannte Technologielücke und um das Zurückbleiben hinter der amerikanischen Entwicklung in dem als strategisch erachteten Bereich der Informationstechnologie (IT) die deutsche Regierung zu mehreren Maßnahmen. Diese stellten zunächst recht zögerliche Versuche für den Aufbau einer technologisch-industriellen Basis in diesem Feld dar. Von 1966 bis Ende der siebziger Jahre wurde die KI mit drei Datenverarbeitungsprogrammen vom BMFT mitgefördert,¹⁴ ohne als eigener Förderschwerpunkt ausgewiesen zu sein.

Der Sinn dieser Maßnahmen lag in einem schnellen Aufbau einer wissenschaftlichen Infrastruktur und von Forschungskapazitäten in der Industrie, wobei die Idee, die neue Wissenschaft in bereits bestehenden Disziplinen anzusiedeln, ihrem interdisziplinären Charakter entsprach. Die infrastrukturelle Maßnahme beschränkte sich aber nicht nur auf den institutionellen Aspekt, sondern sah auch ganz gezielt die Förderung des Humankapitalbereiches mit dem Aufbau des Studienfaches Informatik (seit 1967) in bereits bestehenden Fakultäten vor. Generell ist festzustellen, daß in Deutschland die neue Technologie zunächst eine starke Anschlußfähigkeit in ingenieurwissenschaftlichen Sektoren zeigte und sich ein dementprechender Entwicklungspfad ergibt.

Neben dem gezielten Aufbau von Forschergruppen wurde zur gleichen Zeit (1969) die *Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung*, GMD, unter einer neunzigprozentigen Finanzierung durch den Bund zum Nukleus für die Grundlagenforschung im Großrechnerbereich aufgebaut und kontinuierlich gefördert. Die inhaltlichen Schwerpunkte verlagerten sich über die Zeit und innerhalb der GMD bildeten sich verschiedene For-

14 A. Stucke, *Institutionalisierung der Forschungspolitik. Entstehung, Entwicklung und Steuerungsprobleme des Bundesforschungsministeriums*, Frankfurt a. M. 1993; E. Grande/J. Häusler, *Industrieforschung und Forschungspolitik. Staatliche Steuerungspotentiale in der Informationstechnologie*, Frankfurt a. M. 1994.

schungsbereiche. Von einer solchen Dynamik in den Großforschungseinrichtungen kann in der Biotechnologie nicht gesprochen werden. Mit dem Aufbau der Großforschung und universitären Forschung in Deutschland förderte die Bundesregierung zur gleichen Zeit die nationalen Großunternehmen, die einerseits in der Konzeptionsphase der Programme beteiligt, andererseits auch als Fördermittelempfänger berücksichtigt wurden. Der Entwicklungsverlauf der KI wurde aus diesem Grunde deutlich durch vielfältige industrielle Präferenzen beeinflusst, die der inhaltlich offen geförderten Informationstechnologie ihre Gestalt verliehen.

Das zu 30 Prozent von den Ländern finanzierte BMFT-Förderprogramm EDV III war für die produktbezogene Entwicklung von Klein- und Kleinstreibern bestimmt. Es bot so die Möglichkeiten einer Partizipation von KMU und einer Diffusion der Technologie in Anwendungen, die im Bereich der EDV gestützten Betriebs- und Produktionsorganisation, der Erfassung und Bearbeitung von Daten und der Automatisierung lagen. Anders als in der Biotechnologie wurden die KMU also frühzeitig in die Technologieentwicklung integriert und trugen so wiederum zu ihrer Diversifizierung bei.

In einer zweiten Phase, die sich seit den achtziger Jahren abzeichnet, reagiert das BMFT auf die zunehmende Ausdifferenzierung der Technologie mit der Aufnahme neuer Fördertitel und Schwerpunkte. Die KI mit ihren verschiedenen Ausprägungen wird seitdem vom BMFT als eigenes Gebiet in der IT geführt. Ende der siebziger und Anfang der achtziger Jahre engagierten sich dann auch die Bundesländer in der Verteilung der Sonderforschungsbereiche an den Universitäten. Erstmals kam es zu einer grundlagenorientierteren IT und einer expliziten Förderung der KI außerhalb der Großforschungseinrichtungen. Zusätzlich wurden eine Reihe von anwendungsorientierten Fraunhoferinstituten eingerichtet, die inhaltlich näher an der KI lagen und der Konvergenzbewegung in der Informationstechnologie durch verschiedene Schwerpunkte wie Mikrosystemtechnik, Mikroprozessoren etc. Rechnung trugen. Die intraorganisationsinterne Flexibilität dieser Einrichtungen, die in der Kombination von industrierelevanten und universitärer Forschung besteht, erweist sich als eine flexible Struktur für die technologischen Bedürfnissen der kleinen, aber auch der großen Unternehmen, die einen steigenden Bedarf an Systemlösungen haben. Die gewachsene Bedeutung der KI und ihre fortschreitende Ausdifferenzierung ist so unter anderem darauf zurückzuführen, daß sich die technologieintensiven Geschäftsfelder einer sich diversifizierenden und global konkurrierenden Großindustrie zunehmend in Richtung dieser Technologie bewegt hatten. Im Zeitalter der schnellen Lieferwege standen die großen Unternehmen der hochindustrialisierten Länder in arbeitsintensiven Produktionsbereichen in einem zunehmenden Wettbewerb mit Anbietern aus Billiglohnländern. Mit steigender Technologieintensität der Produkte war es ihnen jedoch möglich, ihren komparativen Vorteil in Form einer wissenschaftlich-technologischen Grundausstattung weiter auszubauen und

sich in neuen Marktsegmenten der Hochtechnologie am Weltmarkt zu etablieren. So wurden beispielsweise nicht mehr allein Standardchips angeboten; ein Wettbewerbsvorteil bestand in steigendem Maße für denjenigen Anbieter, der ein kundenspezifisches, hochkomplexes System auf dem Chip verkaufen konnte.

In Deutschland wurde in der Förderpolitik der IT insgesamt auf die Strategie der Marktnachfrage (*market pull*) gesetzt, was den Innovationsweg im Vergleich zur Situation in den USA abkürzte, weil von Anfang an einer anwendungsorientierten Grundlagenforschung der Vorzug gegeben wurde. Die FuE-Mittel der nationalen Ebene flossen zunächst als Infrastrukturmittel in die Universitäten und dienten im Rahmen der programmatischen Förderung auch dem Aufbau von nationalen Firmenchampions, die in den IT-Markt und seine Segmente diversifizierten. Erst in den achtziger und neunziger Jahren kristallisierte sich die eigentliche Bedeutung der KI als Grundlagenforschung heraus, die wiederum von den durch die föderale Ebene initiierten Forschungsinstitutionen und der sich zu diesem Zeitpunkt organisierenden *scientific community* in der KI aufgegriffen wurde. Das BMFT förderte in der zweiten Entwicklungsphase, seit Mitte der achtziger Jahre, die KI-Forschung. Als zentrale Akteure entstanden neben der GMD, in den neunziger Jahren Konsortien mit industrieller Beteiligung wie das Deutsche Forschungsinstitut für Künstliche Intelligenz, DFKI, ebenso wie die regionalen Einrichtungen, deren Klientelstruktur durch unterschiedliche Unternehmensgrößen und Branchen charakterisiert ist. Die regionalen Forschungseinrichtungen versuchen durch ihre internen Organisationsstrukturen den vielseitigen industriellen Möglichkeiten der KI gerecht zu werden und auch mit KMU im Maschinenbau, im Service- und Bankenbereich zu kooperieren. Die KI findet heute in Deutschland aber immer noch ihre hauptsächliche industrielle Anwendung bei den großen Unternehmen und bei den KMU im Anwendersoftwarebereich. Der Einstieg in die anwendungsorientierte Grundlagenforschung korreliert dabei mit einer bestimmten Phase der wissenschaftlich-technologischen Entwicklung und mit bestimmten Forschungsinhalten. In der KI scheint in der Retrospektive das Timing für den Technologietransfer gestimmt zu haben. Der funktionierende Transfer ist wohl vor allem auf den gestiegenen Technologiebedarf einer im globalen Wettbewerb stehenden IT-Industrie¹⁵ zurückzuführen, was einen von den Unternehmen ausgehenden Technologietransfer aus den Forschungseinrichtungen erleichtert. Die abfragenden Unternehmen – und hierzu gehören im Falle der KI auch die exportorientierten KMU – wirken so durch einen Rückkopplungsmechanismus auf die Zusammensetzung der Palette der Forschungsinhalte hin.

15 D. Foray, Production and Distribution of Knowledge in the New Systems of Innovation: The Role of Intellectual Property Rights, in: STI, No. 14, 1994.

5. Nationaltypische Entwicklungswege in der Künstlichen Intelligenz

Betrachtet man die Situation in Deutschland im Gegensatz zur amerikanischen, wird einerseits deutlich, daß die frühe amerikanische KI-Forschung für den deutschen Entwicklungsverlauf von Bedeutung ist. Obgleich in den USA der Entwicklungspfad stark von den *Computer Sciences* und der Computerindustrie dominiert wird, statt von den Ingenieurwissenschaften und der Maschinenbauindustrie, – stellten die Ergebnisse der US-amerikanischen Grundlagenforschung wichtige Weichen im Bereich der Expertensysteme und Programmiersprachen. So sind die heutigen globalen Standards der Betriebssysteme oder Datenbankprogramme von US-amerikanischen Entwicklungen geprägt.

Andererseits wird deutlich, daß der späte deutsche Einstieg einen anderen Entwicklungsverlauf mit sich bringt, weil sich zu diesem Zeitpunkt eine Anschlußfähigkeit an andere industrielle Entwicklung zeigt. Im Gegensatz zur Biotechnologie arbeitet die deutsche Industrie seit Mitte der achtziger Jahre mit den qualitativ hochwertigen deutschen Forschungseinrichtungen zusammen und ist nicht auf den Einkauf von US-amerikanischen Innovationen angewiesen. Einschlägige Forschungsrichtungen wie die Automatisierungstechnik im Automobilbau werden derzeit sogar in die USA exportiert, wo die Modernisierung alter Sektoren neu auf der politischen Agenda steht, aber (noch) keine anschlussfähige Forschungsinfrastruktur vorhanden ist.

KI-Projekte existierten in den USA schon seit 1956 und waren hauptsächlich in Großforschungslaboratorien von Universitäten und Industrie angesiedelt. Dieser Zweig der auf Grundlagenforschung basierenden (*science based*) KI fand aber lange Jahre keine Umsetzung durch die zivile Industrie, da die staatliche Förderung zunächst nur auf den durch Geheimhaltungsvorschriften abgeschotteten militärischen Sektor ausgerichtet war. Zivile industrielle Forschung und Anwendung zeigt sich demnach auch in den USA erst ab Mitte der achtziger Jahre, obwohl die KI auch heute noch zu zwei Drittel durch das US-Verteidigungsministerium, *Department of Defense*, gefördert wird. Auch die staatliche Förderung hat zu diesem Zeitpunkt als Reaktion auf das japanische *5th Generation Program* deutlich zugenommen. 1983 wurde das *Microelectronics and Computer Technology Consortium*, MCC, als ein über ein Industriekonsortium und öffentliche Aufträge finanziertes Großforschungszentrum in Texas gegründet. Dieser Prototyp markiert die Zäsur zur industriellen Anwendbarkeit der Technologie. In Deutschland avancierten zu diesem Zeitpunkt Verbundprojekte zum wichtigsten Instrument der nationalstaatlichen Förderung. In Deutschland finden sich auf diese Weise neben dem eher *science-based*-Verlauf eine Anzahl von unterschiedlichen Entwicklungswegen durch die Kopplung mit industriellen Sektoren in der Telekommunikation, der Automatisierung, der Bilderkennung usw. Insgesamt zeigt sich, daß die für die breite Entwicklung in der Biotechnologie so unvorteilhafte Vielfalt aus

Programmen und Politikinstrumenten in dieser Technologie auf eine breite industrielle Anschlußfähigkeit traf, die durch Rückkopplungsprozesse das Qualitätsniveau der KI in den oben aufgeführten Bereichen sichern konnte und Technologieimporte aus anderen Ländern nicht nötig machte.

6. Die Entwicklungsverläufe an der Schnittstelle der wissenschaftlich-technologischen Basis und industriellen Applikation: Science-based versus technology-based

Die Dynamik der Integration und die Notwendigkeit, Wissen zusammenzuführen, resultieren in einen Zentralisierungsprozeß innovativer Aktivitäten. Aus diesem Grund kann die Biotechnologie in der Regel keine ortsungebundene, sog. *footlose* Technologie sein. Im Gegensatz dazu ist das Vorhandensein und Zusammenspiel bestimmter Institutionen, die im besten Falle die Pluralität der Anwendungsmöglichkeiten an einem Ort repräsentieren, eine wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung und Innovationsfähigkeit der Biotechnologie. Dies trifft ganz besonders für die frühe Phase der modernen Biotechnologie zu. Zu diesen Voraussetzungen zählten in der Vergangenheit im wesentlichen staatliche oder private Forschungsinstitutionen, Universitäten, forschende Unternehmen, die sowohl diversifiziert wie spezialisiert sind und ein anwendungsbezogenes Distributionsnetz und hochqualifiziertes Personal haben. Dabei sind bis heute staatliche Förderprogramme ebenso grundlegend wie eine gesetzlich flankierende Regulierung, die dem Sicherheitsbedürfnis der Gesellschaft Rechnung trägt.

Die Anwendungsmöglichkeiten in der Industrie sind weit gefächert. Sie erstrecken sich vor allem über die Bereiche Pharma, Nahrungsmittelindustrie, Chemie, Umwelt und der Agrarwirtschaft. Trotzdem bleiben die wissenschaftlichen Ergebnisse der Biotechnologie vor allem für den Pharmabereich relevant, der sich durch die staatliche Neuordnung des Gesundheitswesens einem gewachsenen Modernisierungsbedarf gegenüber sieht, welcher wiederum durch eine Technologieinfusion bewerkstelligt werden soll. Derzeit bietet der Pharmabereich die wichtigste Anwendungs- und Adaptionsstruktur von Innovation zu Produkt in der deutschen Biotechnologie und international.¹⁶ Gleichzeitig ist keine andere Industrie so sehr auf Forschung und Entwicklung angewiesen wie die Pharmaindustrie, was sie als kostenintensiv und risikoreich auszeichnet.

Wie oben ausgeführt, hat sich die Grundlagenwissenschaft KI erst spät als eigenständige Forschungsrichtung etabliert. Sie ist in einem kleinen Hochtechnologiesegment repräsentiert und wie die Biotechnologie eine *science-based technology* mit relativ geringen Skalenerträgen in der betrieblichen Umsetzung und mit hoher Forschungsintensität. Gleichzeitig

¹⁶ Statistisches Bundesamt (Hrsg.), Ausgaben für biotechnische Forschung, Wiesbaden 1995.

findet sich aber auf dem vorherrschenden Segment seit den sechziger Jahren ein Entwicklungsweg durch die breite Anwendung von einzelnen Produkt- und Prozeßinnovationen der KI in der Informationstechnologie. Dieser zeigt eine Tendenz zu einer *technology-based* Entwicklung und bleibt von Ergebnissen der Grundlagenforschung oft bereits räumlich entfernt (vgl. das von der Industrie isolierte DFKI in Kaiserslautern oder die GMD-Institute in Darmstadt und Bonn). Die mathematischen Modelle der Grundlagenforschung (neuronale Netze, Sprach- und Bilderkennungsverfahren, Simulationsprogramme etc.) können aber stets in komplexe Informatiksysteme integriert werden. Da die Steigerung des Technologieanteils der Produkte im Konkurrenzkampf der industrialisierten Länder notwendig ist, führt das tatsächlich zu einer wachsenden Bedeutung der Grundlagenforschung für die Industrie. Aus diesem Feedback des Marktes ergibt sich im Gegensatz zur Biotechnologie eine Vielzahl von konkretisierbaren Entwicklungswegen für die Erkenntnisse der Grundlagenwissenschaft. Diese werden u. a. von der im jeweiligen Segment vorherrschenden Unternehmensgröße geprägt. Eine zukünftige Entwicklung in der KI wird durch die aufnehmenden industriellen Kontexte geprägt sein. Sie lassen sich wie folgt kategorisieren:

- KI als Modernisierungsstrategie: Implementation in forschungsintensive Kernbereiche reifer Branchen, großer Unternehmen (z. B. in der Elektronik und im Automobilbau; Informations- und Kommunikationstechnologie und Automatisierung).
- Nischenproduktion kleiner und mittlerer Unternehmen, wie z. B. im Bereich der Expertensysteme und der Funktionschips (ASIC).
- Diversifizierung (als *Leap-frogging*-Strategie) großer Unternehmen in den KI-Bereich (z. B. Fairchild, Olivetti, Siemens: Spracherkennung und *Very Large System Integration*, Mikroprozessoren).

Die Vielzahl der möglichen technologischen Entwicklungsverläufe der KI wird an der Schnittstelle zur industriellen Anwendungsmöglichkeit deutlich. Diese Anwendungsbreite und hohe Zahl der technologischen Pfade ist in der Biotechnologie nicht zu finden. Hier ist die Anbindung an die Pharmaindustrie vorherrschend; Forschungslinien entwickeln sich dementsprechend. Die KI ist geprägt von einer Dichotomie von technologie- und wissenschaftlicher Entwicklung, wobei die wissenschaftliche Entwicklung (hoher KI-Anteil) den in diese Technologie diversifizierenden Großunternehmen vorbehalten bleibt. Der technologiebasierte Entwicklungsweg zeigt dagegen ein breites Spektrum an Möglichkeiten: Es umfaßt auch Bereiche, die von Massenproduktionsweise und Nischenproduktion (KMU) geprägt sind und nicht in dem Maße wie die Biotechnologie von qualifiziertem Personal und herausragenden Forschungsinstitutionen abhängen.

Mit dem Eintritt in die Phase der Adaptionsfähigkeit in der (neuen) Biotechnologie und in der Künstlichen Intelligenz sind die Erwartungshorizonte der industriellen Möglichkeiten explosionsartig gestiegen. Damit ist ein Prozeß in Gang gesetzt worden, der zur weiteren Etablierung dieser

Technologie in der Gesellschaft beitragen wird.¹⁷ Diese sozio-ökonomische Erwartungshaltung ist von der Politik aufgenommen und unter dem Eindruck der zunehmenden Weltmarktkonkurrenz als Option für zukünftige Schlüsseltechnologien in staatliche FuE-Programme eingeflossen.

Gleichzeitig haben sich beide Technologien als technische Systeme geographisch in verschiedenen Konstellationen ausgeweitet, vor allem in den Industrieländern, die der technologieimmanenten Kapitalintensität Rechnung tragen können. Um die KI und um die Biotechnologie haben sich soziale Systeme etabliert und institutionell verfestigt, die auf die Entwicklung dieser Hochtechnologien Einfluß nehmen. Um zu bestimmen, nach welchen Kriterien sich der Entwicklungspfad in der Biotechnologie und der KI vollzieht, ist es also notwendig, einerseits einen Blick auf die Schnittstelle der wissenschaftlich-technologischen Basis und der aufnehmenden Industriestruktur zu werfen (*science-based*-Verläufe) und die Adaptionstruktur zu staatlich induziertem Technologietransfer zu benennen. Andererseits ist diese Struktur auch für staatliche Politiken zu analysieren, die auf die *technology-based*-Pfade der FuE-relevanten Industrie abzielen. Dabei ergeben sich Unterschiede gemäß den nationalen technologisch-industriellen Entwicklungsphasen und institutionellen Aufnahmestrukturen sowie der nationalspezifischen, politischen Gestaltungsmöglichkeit.

7. Technologiepolitik zwischen Strukturverharrung und flexibler Adaption

Welche Folgerungen eine zukünftige Technologiepolitik ergeben sich nun aus der ex-post-Analyse der Handlungsfolgen bei der Etablierung der beiden Technologien? Der Vergleich der Entwicklungswege der beiden Technologien an der Schnittstelle der wissenschaftlich-technologischen Basis und industrieller Applikation zeigt technologie- und nationaltypische Merkmale. Die Analyse der Vorgänge an der Schnittstelle zwischen Wissensproduktion und industrieller Anwendung im Verlauf des technologischen Entwicklungsprozesses läßt den staatlichen Gestaltungsraum weniger limitiert erscheinen und eröffnet den Blick auf eine staatliche Adaptionstruktur.¹⁸ Staatliche Vorleistungen im Aufbau und bei der Umsetzung der beiden Schlüsseltechnologien haben eine Forschungsinfrastruktur geschaffen, die gegenwärtig durch spezifische industrielle Anschlußfähigkeiten zur technologisch-industriellen Basis charakterisiert ist. Diese Situation hat sich durch Rückkopplungsprozesse der technologiegenerierenden Forschungseinrichtungen mit den Unternehmen entwickelt und durch die technologische Bedarfsstruktur einiger Branchen eine Eigendynamik

17 Vgl. Weingart, Technik als sozialer Prozeß (Anm. 4).

18 P. Eisinger, The Conditions of Protest Behavior in American Cities, in: American Political Science Review 67, 1973, S. 11-28.

erhalten, die sich externen Einflußfaktoren, z. B. aus der Politik, stark widersetzt.

Deutlich wurde, daß bei der Formulierung einer staatlichen FuE-Politik für die neunziger Jahre sowohl die Eigenheiten der spezifischen Technologie als auch die Probleme an der Schnittstelle des Technologietransfers von der Politik berücksichtigt werden müssen. Nationale Unterschiede der Entwicklungsverläufe sind in diesem Prozeß darauf zurückzuführen, daß der Aufbau von Forschungskapazitäten zu verschiedenen Phasen einsetzt und in Deutschland auf eine andere aufnehmende Industriestruktur trifft als z. B. in den USA. Die Nachfrage durch den Markt, die in Deutschland infolge der Veränderung in der Industriestruktur durch einen globalen Wettbewerb und die nationalstaatliche Rahmensetzung nur in einzelnen Sektoren stattfand, wie dem Pharma- oder dem Telekommunikationsbereich, bedurfte anderer Konzepte für den Technologietransfer. Wie bedeutend die Wahl der Mittel in einem bestimmten Prozeßabschnitt ist, wird durch die Tatsache unterstrichen, daß im Falle beider Technologien die staatliche finanzielle Förderung in der BRD erheblich hinter der Förderung in den USA zurückbleibt. Wie wichtig die kontextuelle Fördermittelvergabe ist, läßt sich daran ablesen, daß auch in Deutschland mit wenigen Mitteln in der KI entscheidende Stimuli für die Industrie erreicht wurden. Durch die relative Dezentralisierung im deutschen Fördersystem und eine permanente Adaption der Hochtechnologie an die Bedingungen der regional spezifischen industriellen Kontexte durch die Förderung der föderalen Ebene ist in vielen Räumen ein fruchtbares Zusammenwachsen von wissenschaftlich-technologischer Basis und Industriestruktur erreicht worden. Wichtige innovative Impulse setzt so die aktive Mittelstandsförderung der Länder. Der reiche Instrumentarien-katalog, der verschiedene institutionelle und programmatische Fördermöglichkeiten beinhaltet, ist im Falle der Biotechnologie allerdings nicht ausgeschöpft worden. Hier überwiegt die bundesstaatliche Förderung, insbesondere die der Großforschung mit ihren zum Teil recht unflexiblen internen Entscheidungsstrukturen und einer institutionellen Verharrungstendenz, die sie Forschung allein für einige wenige große Unternehmen betreiben läßt. Eine Änderung der institutionellen Struktur, die eine stärkere Einwerbung von Drittmitteln vorsieht, könnte die bestehende Situation allerdings verändern.

Es ließ sich zeigen, daß anwendungsbezogene Transferinstitute in der KI ein inhaltliches und großemäßig breiteres industrielles Feld bedienen. Durch das finanzielle Anreizsystem der Forschungseinrichtungen oder anders ausgedrückt, durch ihre Abhängigkeit von Drittmitteln aus der Industrie, können auch KMU den Zugang zur Hochtechnologie erhalten. Vor diesem Hintergrund läßt sich anregen, daß auch die ungebundene staatliche Sockelfinanzierung der Großforschungseinrichtungen neu überdacht werden sollte.

Angesichts von Innovationsverläufen in den USA muß weiterhin in Erwägung gezogen werden, daß die marktfähigen Innovationen in Unter-

nehmenskooperationen verschiedenster Art generiert werden, nicht in erster Linie in den universitären oder öffentlich geförderten außeruniversitären Forschungslaboratorien. Auch in den USA sind die staatlichen Forschungseinrichtungen immer noch stark der Grundlagenforschung verhaftet und marktfähige Produktumsetzungen mit wettbewerbsfähigem Stellenwert sind die Ausnahme. Sie haben allerdings erheblich stabilisierende Funktion bei der Nachfrage von neuen Produkten in der Biotechnologie. Neue Instrumente zur Förderung von *technology-based*-Innovationen und eine staatliche inszenierte Kooperation unterschiedlicher Branchen sollten in Form von intersektoralen Arbeitskreisen in Erwägung gezogen werden. Weiterhin wird die deutsche Biotechnologie, im Gegensatz zur Biotechnologie in den USA oder der IT in Deutschland und in den USA, von den großen Unternehmen dominiert.

Daher macht es forschungspolitisch in Deutschland wenig Sinn *kurzfristig* auf die KMU als Innovationsträger zu setzen, zumal diese viel zu spät eine strukturgerechte Förderung durch das Biotechnologie-Programm des BMFT oder durch Programme anderer Ministerien erfahren haben. KMU in der Biotechnologie können ohne Förderung nur in Ausnahmefällen Profite erwirtschaften und sind vor allem in den USA eine typische Innovations-Quelle für die transnationalen Unternehmen, die sich dort einkaufen. Diese Innovations- oder Modernisierungsstrategie ist US-spezifisch und basiert auf der Existenz FuE-relevanter kleiner Unternehmen, wie sie in der Nähe von amerikanischen Universitäten als Existenzgründungen existieren. Ihre Existenz verdanken sie dabei nicht zuletzt nationalen Fördermaßnahmen. Kurz- und mittelfristig ist dieser Zug für die Biotechnologie in Deutschland wahrscheinlich abgefahren: Forschungsausgaben sind inzwischen so drastisch angestiegen, daß Neueinsteiger selbst mit staatlicher Unterstützung kaum eine Chance haben, die lange Durststrecke von durchschnittlich drei bis zwölf Jahren bis zu marktfähigen Produkten zu überstehen (Softwareentwickler in der KI können je nach Anwendungskontext der Software schon in bis zu einem Jahr ihre Produkte auf den Markt bringen). Dies soll aber nicht implizieren, daß auf *langfristig* angelegte Förderprogramme für KMU verzichtet werden sollte.

In der KI sind die KMU als Zulieferer im Netz der großen, global agierenden Unternehmen integriert und können als eigenständige Firmen länger überleben als die KMU in der Biotechnologie, die oft von den großen Unternehmen (auch von deutschen) aufgekauft werden. KMU im Bereich der Expertensysteme und ASICS sind deshalb weniger auf finanzpolitische Fördermaßnahmen angewiesen, weil sie als strategische Zulieferer großer Konzerne oder als eigenständige Unternehmen am Markt bestehen können. In der deutschen Diskussion um die Konzeption von neuen Förderinstrumenten zur Finanzierung von technologieintensiven Existenzgründungen muß deshalb technologiespezifisch vorgegangen werden.

Auch wenn in einigen Teilbereichen der KI die Anwendersstruktur alle Unternehmensgrößen beinhaltet, beherrscht in Deutschland grundsätzlich

in allen Technologiebereichen eine relativ geringe Anzahl von Großunternehmen das Bild; dies liegt an den nur zaghaften Versuchen, Möglichkeiten für die Beschaffung von privatem und öffentlichem Risikokapital zu unterstützen bzw. die Finanzmärkte neu zu organisieren. Dabei darf nicht vergessen werden, daß die Flexibilität und das Innovationspotential der KMU in der Bundesrepublik keine Entwicklung wie in Silicon Valley einleiten kann. Insgesamt sind die staatlichen Initiativen in Deutschland zu sehr von der internen Firmenpolitik einiger großer Konzerne abhängig.

In der deutschen FuE-Politik sollten verschiedenste Instrumentarien aus anderen Politikfeldern an der Schnittstelle *Technologiepolitik* verstärkt zum Einsatz kommen. Die konsequentere und engagiertere Etablierung einer langfristig angelegten Infrastruktur für zukünftige Unternehmensgründungen im Bereich innovativer Technologien gehört ebenso dazu wie ein Umfeld, das nationale und internationale Kooperationen ermöglicht und die Anbindung regionaler Innovationscluster an internationale erleichtert. Dieses sind aber Ziele, die nicht mit den traditionellen technologiepolitischen Institutionen bewerkstelligt werden können, sondern zumindest eine institutionelle Reorganisation voraussetzen.

Die hohe Dichte der Forschungseinrichtungen in Deutschland ist ein Vorteil, von dem technologiespezifisch differenzierte Kooperationsmöglichkeiten mehr als bisher profitieren könnten. Der Rückzug des Staates, der eingangs in diesem Politikfeld konstatiert wurde, ist nur dann sinnvoll, wenn die im Aufbau kostspielige institutionelle Grundlage zunehmend durch industriefinanzierte Forschung getragen wird und die strategisch wichtigen Bereiche der Grundlagenforschung kontinuierlich identifiziert und gefördert werden. In diesem Kontext muß auch bedacht werden, daß die dichtere und heterogenere Industrieausdehnung in Deutschland eher dazu geeignet ist, Querschnittstechnologien durch transsektorale Kooperationen – wie sie in der KI bereits vorhanden sind – zu induzieren als in den USA, wo sich spezialisierte Cluster ergeben, die mit anderen Clustern nicht kommunizieren. In der Biotechnologie findet diese transsektorale Kooperation in der Grundlagenforschung zwar in zahlreichen Sektoren statt, bleibt jedoch in ihren industriellen Resultaten hinter den Erwartungen zurück.

Grundsätzlich verhindert die Pfadabhängigkeit oder die Reproduktion von dominanten Strukturen durch die Kooperation der Forschungseinrichtungen mit einer dominanten finanzkräftigen Branche – wie dem Pharmasektor in der Biotechnologie – eine Diversifizierung des weiteren technologischen Entwicklungsverlaufes. Diese Gefahr des *Lock-in* wird jedoch geringer, wenn der Staat Möglichkeiten schafft, inhaltliche Neuorientierung in der Forschung und Entwicklung vorzunehmen und Netzwerke mit neuen Partnern – auch mit ausländischen – zu bilden.

8. Fazit

Der Vergleich der Biotechnologie mit der Künstlichen Intelligenz zeigt, daß sich das Anforderungsprofil für eine staatliche Technologiepolitik im Zeitverlauf der Technikentwicklung ändert und je nach Schnittstelle und Technologie andere Instrumente eingesetzt oder neu konzipiert werden müssen. Diese flexible Anpassung der Instrumente an den Entwicklungsstand beruht auf einem Konzept, das im Optimalfall die Regionalregierungen bei der Umsetzung der Schlüsseltechnologien einbezieht und auf die Teilnahme möglichst vieler industrieller Akteure unterschiedlicher Unternehmensformen und Forschungseinrichtungen setzt. Um technologische *Lock-ins* bzw. pfadspezifische Fixierungen zu vermeiden, müssen Optionen offen bleiben und Finanzierungsinstrumente zur Stimulierung von technologischen Modernisierungsstrategien geschaffen werden, die eine Diversifizierung der Forschungseinrichtungen erlauben. Dabei muß immer bedacht werden, daß die Reichhaltigkeit der Palette – von staatlichem Risikokapital für KMU bis zur Grundlagenforschung – von einer Politik begleitet sein muß, die die Abschottung von technologisch-industriellen Komplexen verhindert bzw. diese auch aufbrechen kann: Die Dominanz der Pharmaindustrie in der Biotechnologie darf aber nicht generell als Problem innovativer Entwicklung aufgefaßt werden. Wenn alle möglichen Optionen der Diversifizierung gefördert werden, kann dies allzu schnell zum Gießkannenprinzip führen. Staatlicher Förderung muß eine Bedarfsanalyse vorangehen, die eine technologiespezifische Förderung erlaubt. Es muß nochmals daran erinnert werden, daß im Falle der Biotechnologie das eigentliche Problem darin liegt, daß es keine Übersetzung exzellenter Grundlagenforschung bzw. Anwendungsforschung in kommerzialisierbare Produkte gibt. Es besteht weiterhin ein Mangel an Instrumenten, um neue potentielle industrielle Anwender zu lokalisieren und an die Forschungsinfrastruktur anzubinden. Infolgedessen liegt die Vermutung nahe, daß der *science based*-Charakter als Phase im Technologiezyklus verstanden werden muß und die Phasenlänge der verschiedenen Technologien divergiert.

Besonders für die Biotechnologie gilt, daß die Problemlösungsstrategien, die deutsche Unternehmen entwickelt haben, sie zu Trittbrettfahrern bei der Aufholjagd nach Innovationen gemacht hat und so zu einer Art *Immunität* der Akteure gegenüber der FuE-Politik im nationalen Kontext beigetragen haben. Es besteht jedoch durchaus Gestaltungsbedarf, was die Analyse der Schnittstelle deutlich gemacht hat. Die Komplexität, die die Ausdifferenzierung der Technologien zeigt, wird durch die Analyse der Vorgänge an der Schnittstelle von der Übersetzung wissenschaftlicher Ergebnisse in unterschiedliche industrielle Anwendungen in ihrer Struktur deutlich. Beide Technologien bedürfen in ihren *science-based*-Verläufen der Instrumente, die sie auch KMU zugänglich machen: eine Entwicklung, die in der KI schon eingesetzt hat.

Die hier angelegte Kategorisierung der Technologien in *science-* und *technology-based*-Verläufe weist auf die unterschiedlichen staatlichen Optionen hin, die die Spezifität der jeweiligen Technologie ermöglicht. Die in der momentanen Phase stärker *science based* erscheinende Biotechnologie bedarf des Einsatzes von staatlichen Instrumenten, um die *technology-based*-Komponente auf- und auszubauen, die in der IT bereits sehr stark ist. Tradierte staatliche Technologieförderungsprogramme müssen überdacht werden, um die Vielfalt der deutschen Forschungslandschaft in ihrer Breite optimal zu nutzen und den Anforderungen flexibel anzupassen.

Die Zeit-, Raum- und Kapitaldimension technologie- und nationalspezifischer Entwicklungslogiken in der Biotechnologie und in der Künstlichen Intelligenz lassen sich im Sinne einer zielorientierten, „gestaltenden“ Technologiepolitik nicht hierarchisieren. Diese Logiken sind nicht ex ante einsehbar, sondern entwickeln sich entlang einer inhärenten Eigendynamik, deren Verlauf sich ex post abzeichnet. Trotzdem steht die Forschungs- und Technologiepolitik angesichts verschärfter internationaler Wettbewerbskonkurrenz unter starkem Handlungsdruck, den Technologieverlauf zu gestalten. Als Ausweg aus diesem Dilemma bietet sich eine dezentrale, enhierarchisierte, diversifizierte Technologiepolitik an, die einen optimalen Entfaltungsraum für Technologien schafft und dabei besonders die marktfähigen Anwendungen dieser Technologien berücksichtigt. Diese Strategie impliziert, daß der technologiepolitische Handlungsspielraum auf eine breitere Ebene ausgeweitet und entsprechend ein größeres Spektrum von Akteuren in den politischen Entscheidungsprozeß miteinbezogen wird. Technologiepolitik heißt dann eine Befähigung der Mittel und Akteure, nicht eine Zielvorgabe durch den Staat.