

**Schriften des Vereins für Socialpolitik**

---

**Band 195/IV**

# **Studien zur Evolutorischen Ökonomik IV**

**Von**

**Frank Beckenbach, Uwe Cantner, Mathias Erlei, Georg Ewerhart,  
Reiner P. Hellbrück, Erich Helmstädter, Eyke Hüllermeier, Manfred Kraft,  
Helge Majer, Bernd Meyer, Andreas Pyka, Carsten Schreiter,  
Joachim Schütz, Rainer Voßkamp, Gerhard Wegner,  
Peter Weise, Joseph A. Weissmahr**

**Herausgegeben von Hans-Walter Lorenz  
und Bernd Meyer**



**Duncker & Humblot · Berlin**

**Schriften des Vereins für Socialpolitik**  
**Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften**  
**Neue Folge Band 195/IV**

SCHRIFTEN DES VEREINS FÜR SOCIALPOLITIK

Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften

Neue Folge Band 195/IV

---

Studien zur  
Evolutorischen Ökonomik IV



Duncker & Humblot · Berlin

# Studien zur Evolutionären Ökonomik IV

Evolutionäre Makroökonomik, Nachhaltigkeit  
und Institutionenökonomik

Von

Frank Beckenbach, Uwe Cantner, Mathias Erlei, Georg Ewerhart,  
Reiner P. Hellbrück, Erich Helmstädter, Eyke Hüllermeier, Manfred Kraft,  
Helge Majer, Bernd Meyer, Andreas Pyka, Carsten Schreiter,  
Joachim Schütz, Rainer Voßkamp, Gerhard Wegner,  
Peter Weise, Joseph A. Weissmahr

Herausgegeben von Hans-Walter Lorenz  
und Bernd Meyer



Duncker & Humblot · Berlin

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Studien zur Evolutorischen Ökonomik.** – 1 (1990) –.

Berlin : Duncker und Humblot, 1990

(Schriften des Vereins für Socialpolitik, Gesellschaft für  
Wirtschafts- und Sozialwissenschaften ; N. F., Bd. 195)

Erscheint unregelmäßig. – Bibliographische Deskription nach 4  
(2001)

**Evolutorische Makroökonomik, Nachhaltigkeit und Institutionenökonomik /**

hrsg. von Hans-Walter Lorenz und Bernd Meyer. –

Berlin : Duncker und Humblot, 2001

(Studien zur Evolutorischen Ökonomik ; 4)

(Schriften des Vereins für Socialpolitik, Gesellschaft für  
Wirtschafts- und Sozialwissenschaften ; N. F., Bd. 195)

ISBN 3-428-10267-3

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen  
Wiedergabe und der Übersetzung, für sämtliche Beiträge vorbehalten

© 2001 Duncker & Humblot GmbH, Berlin

Fotoprint: Werner Hildebrand, Berlin

Printed in Germany

ISSN 0505-2777

ISBN 3-428-10267-3

Gedruckt auf alterungsbeständigem (säurefreiem) Papier  
entsprechend ISO 9706 ☹

# Inhalt

## Erster Teil

### Makroökonomik aus evolutorischer Perspektive

- I. Empirische Überprüfung eines synergetischen Konjunkturmodells  
*Manfred Kraft, Eyke Hüllermeier, Paderborn, und  
Peter Weise, Kassel* ..... 11
- II. INFORGE – Ein disaggregiertes Simulations- und Prognose-  
modell für Deutschland  
*Bernd Meyer und Georg Ewerhart, Osnabrück* ..... 45
- III. Technologieevolution: Eine Analyse im Rahmen des  
„Knowledge“-Ansatzes der Innovationstheorie  
*Uwe Cantner und Andreas Pyka, Augsburg* ..... 67
- IV. Zur Mikrofundierung der Makroökonomik aus evolutions-  
theoretischer Perspektive  
*Rainer Voßkamp, Chemnitz* ..... 97

## Zweiter Teil

### Nachhaltigkeit in der Evolutionsökonomik

- V. Institutionentheoretische Aspekte nachhaltiger Entwicklung  
*Helge Majer, Stuttgart* ..... 117
- VI. Technologische Innovation und Nachhaltigkeit  
*Frank Beckenbach, Kassel* ..... 145
- VII. Umweltregulierung und Entwicklungsfolgen – eine ordnungs-  
theoretische Perspektive zur Nachhaltigkeitsdiskussion  
*Gerhard Wegner, Bochum* ..... 183
- VIII. Soziale Sicherung und Nachhaltigkeit  
*Joachim Schütz, Zürich* ..... 209

IX. Evolutionary Economics for the Eco-Industrial Age	
<i>Joseph A. Weissmahr</i> , Zürich . . . . .	225
Kommentar von <i>Erich Helmstädter</i> , Münster . . . . .	244
Antwort von <i>Joseph A. Weissmahr</i> , Zürich . . . . .	248

### Dritter Teil

#### Marktprozeßtheorie und Institutionen

X. Die Bedeutung spieltheoretischer Modellierungen der Transaktionskostentheorie unter Berücksichtigung der Entdeckung neuer organisatorischer Alternativen	
<i>Mathias Erlei</i> , Clausthal-Zellerfeld . . . . .	255
XI. Die Entwicklung von Organisationsstrukturen der Unternehmung im wissenschaftenden und wissenverwertenden Wettbewerbsprozeß	
<i>Carsten Schreiter</i> , Marburg . . . . .	287
XII. Satisficing: Theorie, empirische Evidenz und Implikate	
<i>Reiner P. Hellbrück</i> , Oberschleißheim . . . . .	321
 Anschriften der Autoren . . . . .	 347

### **III. Technologieevolution: Eine Analyse im Rahmen des „Knowledge“-Ansatzes der Innovationstheorie**

Von *Uwe Cantner* und *Andreas Pyka*

Universität Augsburg

#### **1. Einleitung**

Für die moderne oder evolutionäre Theorie des technologischen Fortschritts sind technologische Fähigkeiten und das Know-how von Akteuren die wesentlichen Faktoren für innovativen Erfolg. Diese Sichtweise grenzt sich klar vom neoklassischen Ansatz mit seiner Ressourcen-Bezogenheit ab, welcher den innovativen Erfolg gänzlich auf den Einsatz von F&E-Ausgaben zurückführt. Ungelöste technologische Probleme oder noch aufzubauende Fähigkeiten werden von diesem Ansatz gänzlich vernachlässigt, so daß sich Gleichgewichtszustände oder Gleichgewichtspfade mit homogenen oder symmetrischen Akteuren berechnen lassen. Derartige ästhetische Lösungen finden sich jedoch kaum in der Realität, die vielmehr durch heterogene Fähigkeiten und Strukturen charakterisiert ist, wobei letztere oft eine bemerkenswerte Stabilität mit technologisch weiter fortgeschrittenen und zurückgebliebenen Akteuren aufweisen.

Mit dem vorliegenden Beitrag soll auf theoretischer Ebene untersucht werden, wie derartige Strukturen zustande kommen. Unser Modell berücksichtigt dabei explizit, wie Firmen technologische Fähigkeiten aufbauen, um so ihren technologischen Erfolg zu erhöhen. Zu diesem Zweck stellen wir einige Simulationsexperimente vor, die geeignet sind, die Herausbildung bestimmter technologischer Strukturen innerhalb von Industrien zu zeigen. Das theoretische Rückgrat unserer Analyse findet sich im Wissensansatz der modernen Innovationstheorie, die einerseits auf die Existenz von technologischer Heterogenität hinweist, und die andererseits die wesentliche Rolle technologischer Spillovereffekte betont, welche als Träger der Informationsdiffusion innerhalb heterogener Strukturen angesehen werden können. In diesem Zusammenhang beabsichtigt unser Ansatz, die Entstehung von charakteristischen Makrostrukturen nachzuzeichnen, die sich aus dem Zusammenspiel verschiedener technologischer Faktoren ergeben. Wir verwenden

dabei einen synergetischen Ansatz, die Mastergleichung, und modellieren mit ihrer Hilfe verschiedene technologische Niveaus und deren Entwicklung. Die angesprochene Methode ist der theoretischen Physik entlehnt, wo sie zur Beschreibung der Selbstorganisation von großen Systemen herangezogen wird, wobei Mikrobewegungen die Evolution der Makrostruktur hervorrufen. Dieser Modellansatz zeigt sich ebenfalls geeignet zur Beschreibung der technologischen Evolution als einen selbstorganisierenden Prozeß, der durch die Aktivitäten technologisch heterogener Unternehmen vorangetrieben wird.<sup>1</sup>

Im Rahmen dieses synergetischen Ansatzes zeigen unsere Simulationen, wie charakteristische Industriestrukturen durch das Zusammenwirken von Spillovereffekten und unternehmensspezifischen Such- und Experimentieranstrengungen entstehen. Hierbei ist es unter bestimmten Bedingungen durchaus möglich, daß eine zusätzliche und unerwartete Heterogenität auf der Makroebene entsteht. In Kapitel 2 beschreiben wir die verschiedenen Determinanten der Technologieevolution, um auf dieser Basis plausible, mikrotechnologisch fundierte Übergangsraten konstruieren zu können. Mit Hilfe dieser Übergangsraten kann die entsprechende Mastergleichung und unser Gesamtmodell formuliert werden. Das Verhalten des so konstruierten Systems wird schließlich mit Hilfe von Simulationsstudien in Abschnitt 4 analysiert, wobei verschiedene Szenarien betrachtet werden. Kapitel 5 beschließt unseren Beitrag mit einer Interpretation der Ergebnisse und einem Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten.

## 2. Die Determinanten der technologischen Evolution

Woher kommt technologischer Fortschritt, wie entsteht er? Eine beträchtliche Anzahl von Innovationen ist sicherlich zufällig und entzieht sich daher einer analytischen Untersuchung. Dennoch bestreiten die Firmen die Suche nach neuen Produkten und Prozessen aktiv, weshalb ihr jeweiliges Verhalten dennoch Hinweise darauf geben kann, welche Voraussetzungen für innovativen Erfolg und technologischen Fortschritt erfüllt sein müssen.

---

<sup>1</sup> In anderem Zusammenhang wird dieser Ansatz zur Modellierung der Technologiewahl (Erdmann 1993), des Wettbewerbs bei der Technologiediffusion (Weidlich/Braun, 1992), oder im Rahmen der Migrationstheorie (Haag/Weidlich, 1988, Haag, 1989) verwendet. Im Gegensatz zu diesen entscheidungstheoretischen Anwendungen verfolgen wir eine strukturorientierte Analyse mit exogenen F&E-Entscheidungen der Unternehmen. Dabei sind wir nicht an sich gegenseitig ausschließenden Alternativen interessiert, sondern an der Verteilung von bestimmten Technologieniveaus innerhalb einer Ökonomie.

In diesem Zusammenhang versucht die neue Industrieökonomik Licht in die *black-box* des technologischen Fortschritts hineinzuworfen, und hat dabei den ressourcenbasierten Ansatz der Innovationstheorie begründet: Für innovativen Erfolg, müssen Unternehmen Ressourcen in die Such- und Experimentieranstrengungen (S&E) investieren. Dabei gilt in aller Regel, je mehr investiert wird, desto mehr technologischer Fortschritt kann erwartet werden. Folglich läßt sich die Rate des technologischen Fortschritts nahezu ausschließlich auf ökonomische Größen, die investierten Forschungs- und Entwicklungsausgaben (F&E) zurückführen.

Die Entscheidung über die Höhe derartiger Ressourcen wird in aller Regel nicht in Isolation getroffen. Preis- und Qualitätswettbewerb unter verschiedenen Marktstrukturen (z.B. Dasgupta/Stiglitz, 1980, Stoneman/Leech, 1982), unterschiedliche Profitabilität und bestimmte Phasen innerhalb des Produkt- oder Industriebenszyklus (z.B. Abernathy/Utterback, 1985) beeinflussen das Niveau der F&E-Ausgaben, die den Unternehmen zur Verfügung stehen oder die ein Unternehmen gewillt ist, zu investieren. Außerdem wird das Niveau der F&E-Ausgaben auch durch sogenannte technologische Spillovereffekte beeinflusst, die aufgrund des teilweisen öffentlichen Gut-Charakters von technologischem Wissen entstehen. Hieraus leitet sich immer dann ein anreizreduzierender Effekt ab, wenn neues Wissen auch anderen zugutekommt, ohne daß diese sich an den Kosten des eigentlichen Innovators beteiligen (z.B. Spence, 1979).

Diese ökonomischen und technologischen Interdependenzen werden in aller Regel in einem entscheidungstheoretischen Kontext analysiert, wobei die technologischen Möglichkeiten und Fähigkeiten für alle betrachteten Akteure oder Firmen gleich sind – sie werden nicht weiter erklärt, sie sind exogen gegeben und allen Akteuren bekannt. Hieraus ergibt sich die Möglichkeit, eine optimale Allokation von F&E-Ressourcen zu bestimmen. Wendet man eine derartige Theorie auf Situationen an, die durch eine, wie auch immer gemessene, nicht zufriedenstellende Art des technologischen Fortschritts charakterisiert sind, so wird als Erklärung entweder ein zu schwacher oder zu starker Wettbewerb oder zu schwache Eigentumsrechte an Know-how angeführt. Eine Betrachtung technologischer Probleme, wie sie sich aus nur wenig ausgebildeten technologischen Fähigkeiten oder aus technologischen Engpässen ergeben können, wird bei dieser Art von Theorie nicht angestellt.

Um derartige Probleme weiter analysieren zu können, ist eine andere Theorie, bei der die dynamische Technologieentwicklung in den Mittelpunkt des Forschungsinteresses rückt, notwendig. Genau das ist das Anliegen der modernen oder evolutionären Theorie der Innovationstätigkeit, die nach den technologischen Möglichkeiten und den Fähigkeiten diese auszubenten fragt. Zur Beantwortung findet man eine Reihe von empirischen

Untersuchungen, die sich damit befassen wie Unternehmen technologische Probleme angehen, wie sie ihre Experimente gestalten, und wie sie in nicht optimierender Weise, sondern beschränkt rational Entscheidungen treffen.<sup>2</sup> Drei, für unsere Analyse wesentliche Aspekte werden dabei hervorgehoben: *Technologische Spillovereffekte*, *technologische Möglichkeiten* und die *Rekombination* unterschiedlicher technologischer Möglichkeiten.

Das Konzept der technologischen Möglichkeiten kann hierbei als das wesentliche Element der Beschreibung der Technologieevolution angesehen werden. In der modernen Innovationstheorie werden hierfür verschiedene alternative, teilweise überlappende Begriffe herangezogen. Ein technologisches Paradigma (Dosi, 1982), ein dominantes Design (Abernathy/Utterback, 1975) oder ein technologischer Wegweiser (Sahal, 1985) stellt den wissenschaftlichen Rahmen dar und legt die angewendeten Methoden, die verwendeten Materialien und Prozesse für weitere Fortentwicklungen fest. Innerhalb dieses Rahmens entwickeln sich Unternehmen entlang bestimmter technologischer Pfade (*technological trajectories* oder *innovation avenues*), die bestimmte technologische Opportunitäten repräsentieren.<sup>3</sup> Diese sogenannten *intensiven* Opportunitäten<sup>4</sup> einer einzelnen Technologie erschöpfen sich normalerweise im Zeitablauf oder, in anderen Worten, die technologischen Opportunitäten eines technologischen Pfades nehmen mit zunehmendem Fortschritt auf diesem spezifischen Pfad ab.<sup>5</sup> In der Literatur wird diese Beziehung auch als *Wolf'sches Gesetz* bezeichnet. Ein Beispiel hierfür sind die Anstrengungen zur Erhöhung der Rechengeschwindigkeit von Mikroprozessoren, wofür auch die zunehmende Miniaturisierung einen erfolgversprechenden Pfad darstellt. Wissenschaftliche Engpässe in Form von quantenmechanischen Gesetzen verhindern dabei letztendlich eine weitere Miniaturisierung, da für einen stabilen Elektronenfluß ein bestimmter Abstand zwi-

---

<sup>2</sup> Für einen Überblick über dieser Arbeiten sei auf einen exzellenten Aufsatz von C. Freeman (1994) hingewiesen.

<sup>3</sup> „It is that technical advances do not take place in a haphazard fashion. Rather, they are expected to occur in a systematic manner on what may be called innovation avenues that designate various distinct pathways of evolution.“(Sahal, 1985, S. 71).

<sup>4</sup> Coombs (1988, S. 304) beschreibt den Unterschied zwischen intensiven Opportunitäten einer einzelnen Technologie und extensiven Opportunitäten aus dem Zusammenspiel unterschiedlicher Technologien folgendermaßen: „If the physical limit to any physical limitation is still distant, and there remains considerable scope to operate on that specification to increase performance, then there exist substantial ‚intensive‘ technological opportunities in that system. By contrast, ‚extensive‘ technological opportunities will exist if the system in question has numerous possible functional applications in a variety of products or processes, where its performance characteristics will be of value.“

<sup>5</sup> „As resources are devoted to private R&D and projects are completed, technological opportunities are depleted and the pool of opportunities can be exhausted.“ (Kleverick et al., 1995, S. 188).

schen den verschiedenen Komponenten verbleiben muß. Sind diese Größen und Geschwindigkeitsbereiche erreicht, sind die jeweiligen Opportunitäten dieses technologischen Pfades ebenfalls erschöpft. Machlup äußert sich hierzu wie folgt (1984, S. 175): „*The more there has been invented, the less there is left to be invented.*“

Um neue technologische Möglichkeiten auszubeuten bzw. zu schaffen, engagieren sich die Unternehmen in Such- und Experimentieraktivitäten (S&E). Ihre technologischen Fähigkeiten werden dabei zusätzlich über technologische Spillovereffekte von anderen Unternehmen der selben, aber auch unterschiedlicher Branchen positiv beeinflusst. Auf diese Weise rückt, zur Erklärung der Existenz von Spillovereffekten, die Vorstellung von technologischem Know-how als partiell öffentliches Gut in den Vordergrund. Grundsätzlich sind, will man Spillovereffekte beobachten, drei Bedingungen zu erfüllen: Das technologische Wissen muß *verfügbar* sein und es muß für den potentiellen Empfänger von *Nutzen* sein, wobei von diesem *absorptive capacity* (Cohen/Levinthal, 1989) bzw. *receiver competences* (Eliasson, 1990) aufgebracht werden muß, damit dieses Wissen überhaupt verstanden werden kann.

Wann immer technologisches Know-how die Eigenschaften eines öffentlichen Gutes, Nicht-Ausschlußfähigkeit und Nicht-Rivalität, aufweist, ist es für andere Unternehmen verfügbar. Dennoch ist der Zugriff auf externes Know-how nicht uneingeschränkt möglich. Auf der einen Seite kann Know-how *tacit* sein, wodurch es nicht verfügbar und damit nicht transferierbar wird. Auf der anderen Seite kann, basierend auf dem Konzept der *latenten Öffentlichkeit* von Nelson (1988, S. 314) externes Wissen nur dann für eigene Zwecke verwendet werden, wenn der Empfänger selbst bereits ein Mindestmaß an Erfahrung im Umgang mit diesem Wissen aufweist, wofür die oben bereits angesprochenen absorptiven Fähigkeiten notwendig sind. Der Aufbau absorptiver Fähigkeiten kann dabei beabsichtigt oder als Nebenprodukt der S&E-Aktivitäten stattfinden. Dies hat schließlich zur Folge, daß „*in such cases technology transfer may be as expensive and time-consuming as independent R&D.*“ (Nelson, 1990, S. 197).

Doch auch wenn ein genügend großes Ausmaß absorptiver Fähigkeiten aufgebaut wurde und technologische Spillovereffekte potentiell verfügbar sind, werden diese nur in Anspruch genommen, wenn das entsprechende Know-how für das jeweilige Unternehmen von Nutzen ist, d.h. in irgendeiner Weise in den eigenen Wissensstock wirkungsvoll integrierbar ist. Diese Nützlichkeit ist überwiegend technologisch determiniert, hängt aber auch von der Flexibilität und der Kreativität der Nutzer ab. Die Frage, wann das Kriterium der Nützlichkeit von Bedeutung ist, kann nur empirisch beantwortet werden. Im Fall der intra-industriellen Spillover-Effekte darf dennoch a priori eine Nützlichkeit unterstellt werden, da die einzelnen Unterneh-

men zumindest benachbarte Technologien verwenden. Die Art der technologischen Beziehungen zwischen unterschiedlichen Branchen ist dagegen keineswegs von vornherein zu bestimmen. Diese Fragestellung wird von Arbeiten zur Identifizierung intersektoraler Technologieströme wie z.B. von Scherer (1982), Meyer-Krahmer/Wessels (1989) oder DeBresson (1996) angegangen.

Doch was bewirken diese Spillovereffekte bei den Empfängern? In Bezug auf die Wirkungen innerhalb einer bestimmten Branche erlauben Spillovers das Aufholen technologisch schlechterer Unternehmen zum Technologieführer. Im Zusammenhang inter-industrieller Beziehungen können *gegenseitige Befruchtungen (cross-fertilizations)* erwartet werden, welche die Empfänger der Spillovereffekte in die Lage versetzen neue technologische Opportunitäten zu entwickeln. *„Often the innovation from outside will not merely reduce the price of the product in the receiving industry, but makes possible wholly new or drastically improved products and processes. . . . Such innovations . . . open the door for entirely new economic opportunities and become the basis for extensive industrial expansion elsewhere.“* (Rosenberg, 1994, S. 77). Dies bedeutet, daß technologische Entwicklungen in einer Industrie ganz neue Anwendungen für andere Industrien eröffnen können. Für das oben bereits angeführte Beispiel der Miniaturisierung von Mikroprozessoren bedeutet dies, daß neue Erkenntnisse, beispielsweise aus der physikalischen Grundlagenforschung, die Konsequenzen des Wolf'schen Gesetzes in die Zukunft verschieben können. Ein solches Beispiel stellt der Quanteneffekttransistor dar, der gerade auf jenen Quanteneffekten beruht, die jahrzehntelang als Ursache für die natürliche Grenze der Miniaturisierung von Bauelementen in der Halbleitertechnologie angesehen wurden. Durch die *Rekombination* von lokal bereits existierendem Know-how werden also neue, wenn auch nur diskontinuierlich auftretende, sogenannte *extensive* technologische Möglichkeiten eröffnet. Um nochmals Machlup (1984, S. 175) zu zitieren: *„The more there is invented, the easier it becomes to invent still more.“*

Der Möglichkeitenraum, innerhalb dessen sich technologische Entwicklungen vollziehen, wird auch durch neue Erkenntnisse der Naturwissenschaften erweitert.<sup>6</sup> Die Grundlagenforschung an den Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen unterstützt dabei in besonderem Maße den technischen Fortschritt und *„ . . . provided the basis for the other important forces that offset diminishing returns to technological opportunity . . . “* (Klevorick et al., 1995, S. 189).

---

<sup>6</sup> *„The most powerful and over the long run, almost certainly most important source of new technological opportunities has been the advance of scientific knowledge.“* (Klevorick et al., 1995, S. 189).

Dieser ideenschaffende Charakter technologischer Spillovereffekte zeigt sich deutlich in einer Studie von Ehrenreich (1995, S. 30) zur US-amerikanischen Halbleiterindustrie: „*Technical interactions were not confined to one laboratory. Scientists associated with industry, universities and the federal government communicated quite freely with one another. Competition for intellectual property, while certainly present, was not dominant.*“ Dies führt zu der Vorstellung des technischen Fortschritts als einen kollektiven evolutionären Prozeß. „*Thanks to contributions by individuals and collaborative groups, the whole community could move forward more or less coherently. Its global accomplishment was certainly far greater than the sum of its parts.*“ (Ehrenreich, 1995, S. 30)

Berücksichtigt man die oben skizzierten Aspekte, wird der ressourcenbasierte Ansatz der neoklassischen Ökonomie mit dem wissens-basierten Ansatz der modernen Innovationsökonomie konfrontiert. Im letzteren legt die Existenz von Spillovereffekten nahe, technologische Entwicklung als (1) einen kollektiven evolutionären Prozeß, der (2) die Schaffung (und Erschöpfung) von technologischen Opportunitäten ermöglicht und für den (3) entsprechende technologische Fähigkeiten vorhanden sein müssen, zu beschreiben. Auf dieser Basis kann man sich nun fragen, wie die angesprochenen Merkmale (1) bis (3) sich für charakteristische Strukturen auf der Industrieebene verantwortlich zeichnen. Diese Strukturen sind notwendigerweise wissensabhängig, interagieren aber in der Realität natürlich auch mit ökonomischen Größen, wie etwa Unternehmensgröße, Profitabilität, Wachstum, usw. Auch diese stehen mit dem technologischen Fortschritt in einer wechselseitigen Beziehung – wie dies der Ressourcenansatz der Innovationstheorie beschreibt.

### 3. Ein theoretisches Modell zur technologischen Evolution

Im folgenden stellen wir ein Modell vor, welches sich ausschließlich auf die Herausbildung wissensdeterminierter Strukturen konzentriert. Zu diesem Zweck stellen wir in 3.1 die Grundzüge des Modells vor, erklären in 3.2 die wesentlichen Faktoren für innovativen Erfolg (und Mißerfolg) und vervollständigen damit in 3.3 die formale Beschreibung des Modells.

#### 3.1 Annahmen und Grundstruktur

Unser Modell der Technologieverevolution betrachtet einen bestimmten industriellen Sektor, indem sich Firmen in S&E-Aktivitäten engagieren. Für derartige Aktivitäten wollen wir die folgende Annahme unterstellen.

- (A1) Unternehmen agieren mit Hilfe von Routinen und investieren periodisch eine Einheit F&E in Such- und Experimentieraktivitäten (S&E). Die Motivation hierfür findet sich in nicht weiter definierten Möglichkeiten zur Profiterzielung.

Die Annahme (A1) läßt sich folgendermaßen begründen: Da sich die Analyse auf reine Wissenseffekte beschränkt, wird damit dafür gesorgt, daß ökonomische Einflüsse wie Unternehmensgröße, *success-breeds-success* usw. ausgeschlossen werden.

In Einklang mit der Beschreibung des Innovationsprozesses im zweiten Kapitel ziehen wir einige bekannte stilisierte Fakten heran (Dosi, 1988) und bilden daraus die folgenden Annahmen:

- (A2) Die technologische Entwicklung ist kumulativ und vollzieht sich entlang bestimmter industriespezifischer Trajektorien, wobei die technologischen Möglichkeiten eines einzelnen Technologiepfades zunehmend ausgeschöpft werden (Wolf'sches Gesetz).
- (A3) Die Spezifität des technologischen Wissens nimmt entlang einer Trajektorie zu, wobei der Grad der Spezifität angibt, in welchem Ausmaß Know-how auf andere übertragen werden kann.
- (A4) Innovativer Erfolg ist unsicher.

Diese grundlegenden Bausteine charakterisieren die technologische Entwicklung entlang einer Trajektorie, wie dies anhand Abbildung 1 verdeutlicht ist.

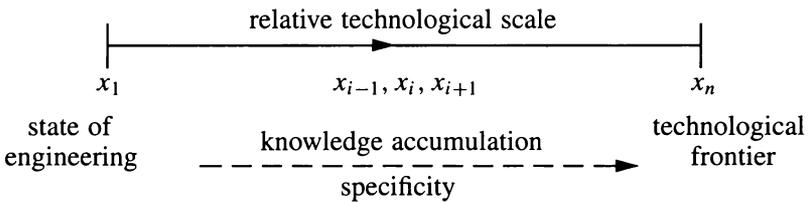


Abbildung 1: Technologiskala

Zur Veranschaulichung einer bestimmten Trajektorie verwenden wir eine Skala von 0 bis 1 mit  $n$  verschiedenen Zuständen oder technologischen Niveaus  $x_i = i/n$ ,  $i \in \{1, \dots, n\}$ . Jeder technologische Zustand  $x_i$  zeichnet sich durch die folgenden beiden Eigenschaften aus:

- Das Niveau des akkumulierten technologischen Wissens;
- die Spezifität des technologischen Wissens.

Die Annahmen (A2) und (A3) sind wie folgt repräsentiert: Das technologische Niveau steigt kumulativ innerhalb des Intervalls  $]0, 1[$  an. Das niedrig-

ste Technologieniveau  $x_1$  beinhaltet das ingenieurwissenschaftliche Grundlagenwissen und gibt den *Stand der Technik* als ein Allgemeingut an. Das höchste Technologieniveau  $x_n$ , bezeichnet die Technologief Frontier. Die Spezifität des technologischen Wissens steigt mit  $x_i$  an, weil höhere technologische Niveaus durch eine steigende Komplexität und somit durch einen hohen Anteil von *tacit Know-how* charakterisiert sind. Während also die Unternehmen auf niedrigeren technologischen Niveaus auf einen gemeinsamen Pool an technologischem Wissen zurückgreifen können, wird das Know-how auf höheren technologischen Niveaus mehr und mehr unternehmensspezifisch. Die technologische Heterogenität nimmt somit für Unternehmen innerhalb eines Technologieniveaus auf höheren Niveaus zu.

Die Analyse der technologischen Entwicklung auf einer Skala mit  $n$  verschiedenen Zuständen erscheint zunächst restriktiv. Deshalb ist die oben eingeführte Skala als relative Skala zu interpretieren. In diesem Fall gibt  $x_n$ , die für einen bestimmten Zeitpunkt  $t$  *best-practice*-Technologie an. Infolge von wissenschaftlichem Fortschritt wird dieses technologische Wissen dann in der Periode  $t + 1$  mit einem niedrigeren Wert bewertet. Hieraus ergibt sich, daß alle technologischen Niveaus  $x_i$  jeweils relativ zum Technologieniveau  $x_n$  zu interpretieren sind. Eine äquivalente Aussage läßt sich auch für das ingenieurwissenschaftliche Grundlagenwissen  $x_1$  ableiten, also das niedrigste beobachtbare technologische Niveau. Obwohl für diesen Zustand in absoluten Größen im Zeitablauf ebenfalls technologisches Wissen kumuliert wird, soll dieses Niveau relativ in einer konstanten Distanz zur Technologief Frontier  $x_n$  bleiben.<sup>7</sup> Mit Hilfe dieser Konstruktion ergibt sich das Bild einer Skala, die sich im Zeitablauf immer weiter nach rechts verschiebt, wodurch sich auch langfristige Entwicklungen nachzeichnen lassen.

Innerhalb dieser Darstellung einer technologischen Trajektorie zeigt sich ein innovativer Erfolg oder Mißerfolg eines Unternehmens in einer Bewegung von Zustand  $x_i$  zu seinen Nachbarzuständen  $x_{i-1}$  oder  $x_{i+1}$ . Berücksichtigt man zusätzlich die Annahme (A4), so ist die Wahrscheinlichkeit einen dieser Nachbarzustände zu erreichen, von den folgenden Größen abhängig:

- (1) Unternehmen erreichen durch eigene S&E-Aktivitäten technologische Verbesserungen. Dabei hängt der Erfolg dieser Anstrengungen davon ab, welches technologische Niveau sie bereits erreicht haben.

---

<sup>7</sup> Diese Annahme impliziert, daß das ingenieurwissenschaftliche Grundlagenwissen und der wissenschaftliche Fortschritt mit derselben Rate voranschreiten. Diese Annahme ist notwendig, um später den Mastergleichungsansatz anwenden zu können. Diese Vorgehensweise mag etwas restriktiv erscheinen, jedoch werden durch sie unsere grundlegenden Ergebnisse nicht beeinflusst.

- (2) Der Innovationserfolg der Unternehmen wird durch intra-industrielle Spillovers beeinflusst, die von anderen Firmen im gleichen Sektor ausgehen.
- (3) Inter-industrielle Spillovereffekte – ebenso wie der Wissenstransfer von Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen – beeinflussen den Innovationserfolg über sogenannte *cross-fertilization*-Effekte.
- (4) Die Wissens- und Technologiebasis von Unternehmen wird unbewußt durch die Entwicklung von grundsätzlichen technologischen Standards beeinflusst, wie zum Beispiel das allgemeine Ausbildungsniveau von Arbeitskräften, technologischen Standards, usw.
- (5) Schließlich gilt es festzuhalten, daß der wissenschaftliche Fortschritt dafür sorgt, daß angewendete Technologien veralten.

Bevor auf die Formalisierung dieser Einflußgrößen mit Hilfe von Übergangsraten eingegangen werden kann, soll kurz das analytische Instrumentarium vorgestellt werden, mit dessen Hilfe die angesprochenen Veränderungen untersucht werden.

Die technologische Entwicklung entlang einer bestimmten technologischen Trajektorie kann mit Hilfe eines diskreten Zustandsraums interpretiert werden, welcher der Analyse mit einer sogenannten Mastergleichung zugänglich ist. Dieser Formalismus wird normalerweise zur Beschreibung von Systemen verwendet, die sich aus einer Vielzahl von Subsystemen zusammensetzen, wobei deren Verhalten nur stochastisch beschrieben werden kann. Auf unsere Fragestellung angewendet, stellt der innovative Erfolg von Unternehmen und damit das technologische Niveau, das zu einem bestimmten Zeitpunkt erreicht worden ist, die stochastische Größe dar. Dies bedeutet, daß für jeden Zustand  $x_i$  zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t$  die Wahrscheinlichkeit  $P(x_i|t)$  angegeben werden kann, daß ein Unternehmen dieses Niveau erreicht hat. Diese Wahrscheinlichkeiten können auch alternativ als relative Anteile von Unternehmen interpretiert werden,<sup>8</sup> das Technologieniveau  $x_i$  zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t$  zu besetzen. Durch welche Größen werden diese Wahrscheinlichkeiten beeinflusst und wie verändern sie sich?

Die Wahrscheinlichkeit  $P(x_i|t)$  wird durch zwei grundlegende Elemente beeinflusst: Sie hängt von den Übergangsraten in beziehungsweise aus einem Zustand  $x_i$  sowie von der Wahrscheinlichkeit der benachbarten Zustände ab. Der letztere Effekt ist eine Konsequenz der Markov-Annahme, die impliziert, daß in einem infinitesimal kleinen Zeitintervall  $dt$  ein bestimmtes technologisches Niveau  $x_i$  nur von seinen direkten Nachbarn erreicht

---

<sup>8</sup> Vgl. Honerkamp (1989), S. 91.

werden kann. Dies bedeutet, daß die Veränderung der Wahrscheinlichkeit ( $dP(x_i|t)/dt$ ) eines bestimmten Zustandes  $x_i$  von den Wahrscheinlichkeiten seiner Nachbarn  $x_{i-1}$  und  $x_{i+1}$  abhängt. Abbildung 2 zeigt beispielhaft die Entwicklung der Wahrscheinlichkeit eines Zustands  $x_i$ .

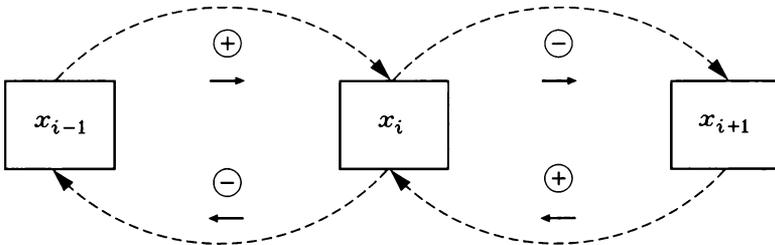


Abbildung 2: Die Entwicklung des technologischen Niveaus  $x_i$

In einem Modell der Technologievolution lassen sich diese Wirkungsmechanismen wie folgt interpretieren: Unternehmen, die sich in Periode  $t - 1$  auf Technologieniveau  $x_{i-1}$  befinden, können ihre Technologie durch eigene S&E-Anstrengungen, durch intra- und inter-industrielle Spillovereffekte verbessern und so das Technologieniveau  $x_i$  erreichen. Andere Unternehmen, die sich zum Zeitpunkt  $t - 1$  auf dem höheren technologischen Niveau  $x_{i+1}$  befinden, können aufgrund technologischer Veralterung zurückfallen, und zum Zeitpunkt  $t$  das Technologieniveau  $x_i$  einnehmen. Diese beiden Wahrscheinlichkeitsflüsse erhöhen die Wahrscheinlichkeit, den Zustand  $x_i$  in Periode  $t$  anzutreffen. Unternehmen hingegen, die sich bereits in Periode  $t - 1$  auf Technologieniveau  $x_i$  befinden, können durch eigene S&E-Anstrengungen sowie die Internalisierung von Spillovereffekten zum Technologieniveau  $x_{i+1}$  gelangen. Allerdings ist auch ein Rückfall aufgrund technologischer Obsoleszenz möglich. Beide Wahrscheinlichkeitsabflüsse sorgen dafür, daß die Wahrscheinlichkeit, den Zustand  $x_i$  zum Zeitpunkt  $t$  anzutreffen, abnimmt. Man kann sich deshalb die Mastergleichung als eine Art *Gewinn- und Verlustrechnung* für die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Zustandes vorstellen.

Im abschließenden Teil zu Kapitel 3 verfolgen wir zwei Zielrichtungen. Zum ersten sollen für die bereits oben eingeführten fünf Determinanten der technologischen Entwicklung mikrotechnologisch fundierte Übergangsraten eingeführt werden. Zu diesem Zweck verwenden wir die Kriterien Technologieniveau und Technologiespezifität. Zum zweiten wird die formale Struktur des Modells für alle möglichen Zustände  $x_i$ ,  $i \in \{1, \dots, n\}$  kompletisiert.

### 3.2 Übergangsraten

Im folgenden werden die verschiedenen Faktoren, welche den innovativen Erfolg der Unternehmen determinieren, formal festgelegt. Diese Einflüsse werden dabei mit Hilfe von Übergangsraten von Niveau  $i$  zum Niveau  $j$  beschrieben. Der heuristische Charakter dieser Vorgehensweise wird in Abschnitt 4.3 durch eine Funktionsklassenanalyse abgeschwächt, in dem die allgemeinen funktionalen Voraussetzungen an die jeweiligen Übergangsraten herausgearbeitet werden.

#### S&E-Erfolgswahrscheinlichkeiten auf unternehmensspezifischen Pfaden

Um den Effekt von kumulativen S&E-Anstrengungen zu formalisieren, greifen wir auf das Kriterium *Technologieniveau* zurück. Auf der einen Seite nimmt auf höheren Technologieniveaus die Erfolgswahrscheinlichkeit aufgrund der Wissensakkumulation zu. Auf der anderen Seite sind in Einklang mit dem Wolf'schen-Gesetz die technologischen Opportunitäten auf den niedrigsten Technologieniveaus am höchsten und nehmen mit zunehmenden Niveaus ab. Das Zusammenspiel dieser Faktoren wird mit Hilfe einer Exponentialfunktion modelliert. Gemeinsam mit dem kumulativen Effekt ergibt sich für die Wahrscheinlichkeitsverteilung für Innovationserfolg in Abhängigkeit vom bereits erreichten Technologieniveau die folgende Formulierung:

$$p_{i+1 \leftarrow i} = \alpha^* x_i^* e^{-d^* x_i}; \quad \alpha, d > 0. \quad (1)$$

Gleichung (1) gibt die Wahrscheinlichkeit  $p$  an, daß sich ein Unternehmen aufgrund eigener S&E-Anstrengungen vom Technologieniveau  $x_i$  zum benachbarten Technologieniveau  $x_{i+1}$  weiterentwickelt ( $i + 1 \leftarrow i$ ). Dieser funktionale Zusammenhang ist auch in Abbildung 3 wiedergegeben.

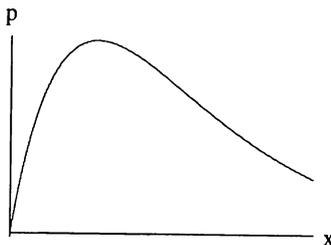


Abbildung 3: S&E-Erfolgswahrscheinlichkeit

Diese Verteilung kann dahingehend interpretiert werden, daß die S&E-Erfolgswahrscheinlichkeit auf niedrigeren Technologieniveaus  $x_i$  mit wachsender Erfahrung auf höheren Technologieniveaus zunächst zunimmt. Ab einem bestimmten Niveau beginnt jedoch das Wolf'sche Gesetz zu wirken, so daß die abnehmenden technologischen Opportunitäten dieses spezifischen Pfades dominieren, mit der Folge, daß die Erfolgswahrscheinlichkeiten auf höheren Technologieniveaus wieder sinken. Das Ausmaß dieses Effekts wird durch den Parameter  $d$  bestimmt. Je höher  $d$ , desto steiler ist der fallende Teil der Kurve, was auf stärkere technologische Beschränkungen und Engpässe zurückzuführen ist. Die Größe  $a$  stellt einen Gewichtungsparemeter dar.

### Intra-industrielle technologische Spillovers

Der Umfang der Auswirkungen intra-industrieller Spillovereffekte hängt von der *Verfügbarkeit* und der *Nützlichkeit* des entsprechenden technologischen Know-hows, sowie von den *absorptiven Fähigkeiten* des Empfängers ab. Um die Verfügbarkeit abzubilden, ziehen wir das Kriterium *Spezifität* heran, wobei diese mit zunehmenden Technologieniveaus zunimmt (A3). Bezeichnet man den Grad der Verfügbarkeit mit  $v$ , so kann der beschriebene Zusammenhang graphisch wie in Abbildung 4 wiedergegeben werden.

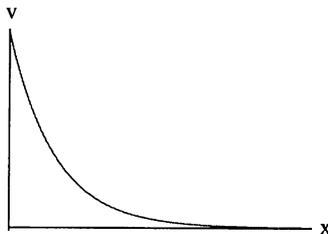


Abbildung 4: Abnehmende Verfügbarkeit mit zunehmenden technologischen Niveaus

Die Verfügbarkeit  $v$  nimmt mit steigenden Technologieniveaus  $x_i$  exponentiell ab; formal läßt sich dies wie folgt wiedergeben:

$$v_i = e^{-\frac{x_i}{l}}; \quad l > 0, \quad (2)$$

wobei der Parameter  $l$  den Grad der Spezifität angibt.

Neben der Verfügbarkeit spielt auch die Nützlichkeit von Know-how eine Rolle. In unserem Zusammenhang wird diese Nützlichkeit durch den

Informationsgehalt von Spillovereffekten bestimmt, wobei dieser mit steigendem Technologieniveau zunimmt. Weil die Spezifität und somit auch die Heterogenität der Unternehmen mit  $x_i$  wächst, ist es plausibel, ebenfalls eine zunehmende Nützlichkeit des Know-hows von anderen Unternehmen des gleichen Sektors zu unterstellen. Auf der Technologieskala nehmen wir eine lineare Beziehung für die Nützlichkeit  $u$  von intra-industriellen Spillovereffekten an:

$$u_i = x_i. \quad (3)$$

Schließlich müssen noch die absorptiven Fähigkeiten  $a$  determiniert werden. Da wir innerhalb des gewählten Modellrahmens keine unmittelbaren Investitionen in absorptive Fähigkeiten abbilden können, nehmen wir für sie an, daß sie als eine Art Nebenprodukt in der technologischen Entwicklung aufgebaut werden. Im Modell nehmen sie daher ebenfalls linear mit zunehmenden Technologieniveaus zu:

$$a_i = x_i. \quad (4)$$

Der Grad der Verfügbarkeit  $v$ , die Nützlichkeit  $u$  und die absorptiven Fähigkeiten  $a$  bestimmen zusammen die Wahrscheinlichkeit eines Innovationserfolgs aus intra-industriellen Spillovereffekten. Formal läßt sich die entsprechende Übergangsrate  $q$  ergänzt um den Gewichtungsfaktor  $\beta$  als folgende nicht-separable Funktion beschreiben:

$$q_{i+1 \leftarrow i} = \beta^* x_i^{2*} e^{-\frac{x_i}{T}}; \quad \beta > 0. \quad (5)$$

Die Wahrscheinlichkeit  $q_{i+1 \leftarrow i}$ , ein höheres Technologieniveau  $i + 1$  vom Ausgangsniveau  $i$  mit Hilfe von intra-industriellen Spillovereffekten zu erreichen, ist in Abbildung 5 wiedergegeben.

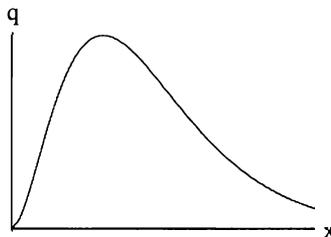


Abbildung 5: Intra-industrielle Spillovers

Auf geringeren technologischen Niveaus ist die potentielle Nützlichkeit von intra-industriellen Spillovereffekten relativ gering, das jeweilige Know-

how kann sehr leicht mit eigenen Forschungsanstrengungen generiert werden. In dem Maße wie sich eigene Potentiale erschöpfen, erlangen die Spillovereffekte zunehmende Bedeutung. Ab einem bestimmten Technologieniveau wird es jedoch, aufgrund zunehmender Spezifität, immer schwieriger, die jeweiligen Informationen zu absorbieren.

### Inter-industrielle Spillovereffekte

Zur Modellierung inter-industrieller Spillovereffekte ziehen wir wieder die Kriterien *Verfügbarkeit*, *Nützlichkeit* und *absorptive Fähigkeiten* heran. Da jedoch die Entwicklungen anderer Industrien außerhalb unseres Modells ablaufen, werden Verfügbarkeit und Nützlichkeit als exogen angenommen. Diese Faktoren werden durch die binäre Variable  $f$  repräsentiert, welche für den Fall, daß inter-industrielle Spillovers Einfluß ausüben gleich 1 ist, ansonsten 0 beträgt. Für den ersten Fall nehmen wir implizit einen konstanten Einfluß von externem Know-how an.

Unternehmen akkumulieren absorptive Fähigkeiten (*learning by innovating*) wie anderes Wissen im Zeitablauf (*learning by doing*, *learning by using*). Daher finden sich auf höheren technologischen Niveaus auch höhere absorptive Fähigkeiten. Ohne diese könnten die in diesem Fall unternehmens- und technologiespezifischen Informationen überhaupt nicht auf ihre Verwertbarkeit hin überprüft werden. Die Erfolgswahrscheinlichkeit  $r_{i+1 \leftarrow i}$ , die den Effekt von interindustriellen Spillovers angibt, kann formal wie folgt wiedergegeben werden:

$$r_{i+1 \leftarrow i} = \frac{\gamma f x_i}{1 + e^{b(g-x_i)}}; \quad \gamma, b, g \geq 0, \quad f \in \{0, 1\}. \quad (6)$$

Die entsprechende sigmoide Funktion ist in Abbildung 6 wiedergegeben.

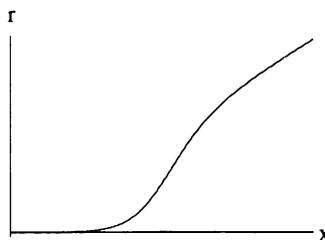


Abbildung 6: Inter-industrielle Spillovers

Der Parameter  $b$  gibt den Schwierigkeitsgrad an, mit dem absorptive Fähigkeiten aufgebaut werden. Je kleiner dieser Parameter ist, desto eher

und auf vergleichsweise niedrigeren Technologieniveaus können die positiven Effekte dieser inter-industriellen Spillovers genutzt werden. Mit einem relativ großen Wert für  $b$  wird die Funktion in ihrem mittleren Teil sehr steil, so daß sie scharf trennt zwischen Technologieniveaus, auf denen inter-industrielle Spillovers genutzt werden können und solchen, auf denen das nicht der Fall ist. Dieser Effekt wird sehr schön durch die Redensart „... wenn bei jemanden der Groschen gefallen ist“ wiedergegeben. Der Parameter  $g \in [0, 1]$  ist eine Art Sensibilitätsparameter, der ein Mindestmaß an Erfahrung bestimmt, welches für die Nutzung von inter-industriellen Spillovers notwendig ist. Für relativ kleine Werte von  $g$  benötigt man eine vergleichsweise geringe Erfahrung, um absorptive Fähigkeiten aufzubauen. Der Parameter  $\gamma$  ist wieder ein Gewichtungsfaktor.

### Wissenschaftlicher Fortschritt und ingenieurwissenschaftliches Grundlagenwissen

Unternehmen, die abnehmenden technologischen Opportunitäten gegenüberstehen, werden durch die Naturwissenschaften neue Opportunitäten *angeboten*. Die Konsequenzen des Wolf'schen Gesetzes werden auf diese Weise mit neuen Potentialen konfrontiert. Neue Opportunitäten sorgen dafür, daß angewandte Technologien veraltern. Diesem Veralterungsprozeß können Unternehmen nur dadurch entgehen, daß sie selbst erfolgreich S&E-Aktivitäten entfalten. Ist ein Unternehmen dabei nicht erfolgreich, fällt es zwangsweise zurück: In der Evolution ist Stagnation gleichbedeutend mit Rückstand. Darüber hinaus sorgt dieser Prozeß auch dafür, daß alte Technologien weniger spezifisch sind, sie werden ein öffentliches Gut.

Dies führt uns direkt zur Entwicklung des ingenieurwissenschaftlichen Grundlagenwissens. Aufgrund des allgemein ansteigenden Ausbildungsniveaus sowie aufgrund anderer Externalitäten, auch Standards, usw. existiert ein Mindest-Technologieniveau, welches alle Eigenschaften eines öffentlichen Gutes aufweist, und das daher von jedermann ohne zusätzlichen Aufwand genutzt werden kann. Auf unserer technologischen Skala wird dieses Niveau mit  $x_1$  angegeben, welches aufgrund des exogenen wissenschaftlichen Fortschritts immer weiter nach rechts wandert.

Für diese Zusammenhänge nehmen wir formal eine konstante Obsoleszenzrate  $o$  an, die alle diese exogenen Größen einfängt. Der Einfluß dieser Rate soll im gleichen Maße zunehmen wie das Technologieniveau. Höhere Technologieniveaus weisen eine geringere Distanz zu den Naturwissenschaften und damit eine höhere Unsicherheit auf, so daß das Risiko von Fehlschlägen zunimmt. Formal läßt sich die Veralterung  $o_{i-1 \leftarrow i}$  wie folgt modellieren:

$$o_{i-1 \leftarrow i} = o^* x_i; \quad 0 < o < 1. \quad (7)$$

Der Veralterungsprozeß kann als eine permanente Verschiebung der Skala nach links interpretiert werden: Auf der rechten Seite werden neue Technologien dem Opportunitätenraum der Unternehmen zugefügt, auf der linken Seite werden alte Technologien ausgeschlossen oder in anderen Worten, der Stand des ingenieurwissenschaftlichen Wissens steigt. Dies sorgt zusätzlich dafür, daß nicht erfolgreiche Unternehmen zumindest das Technologie-niveau  $x_1$  in ihrer Produktion einsetzen.

### 3.3 Die Mastergleichung

Zur Modellierung der Mastergleichung, welche die technologische Dynamik unseres Modells abbildet, verwenden wir die oben eingeführten Übergangsraten (1) für eigenes S&E, (5) für intra-industrielle Interdependenzen, (6) für inter-industrielle Spillovers und (7) für die technologische Obsoleszenz. Diese Übergangsraten hängen allein vom Zustand  $x_1$  ab und sind zeitunabhängig. Aus diesem Grund haben wir es mit einem nicht stationären Markov-Modell mit den folgenden Eigenschaften zu tun (vgl. Haken, 1990, 108 - 110):

- (i) Für derartige Systeme gilt die sogenannte Normalisierungsbedingung: Die Summe der Zustandswahrscheinlichkeiten in der Startperiode  $t = 0$ ,  $\sum_i P(x_i | 0) = 1$  gilt auch für alle künftigen Perioden  $t > 0$ :  $\sum_i P(x_i | 0) = 1$ .
- (ii) Für zeitunabhängige Übergangsraten existiert zumindest eine stationäre Lösung  $dP^*(X|t)/dt = 0$ . Auf der Makroebene lassen sich dann keine Bewegungen mehr feststellen. Gibt es nur eine stationäre Lösung, dann wird diese Lösung unabhängig von den Anfangsbedingungen erreicht (Ergodizitätsbedingung).
- (iii) Da wir es mit einem linearen Zustandsraum zu tun haben, gilt für die stationäre Lösung auch die *detailed balance condition*. „*This means that not only the global balance of all probability fluxes (stationary solution) hold, but that a probability flux between each pair of states ... holds separately.*“ (Haag, 1989, 222).

Die Gleichung (8) ist die Mastergleichung unseres Systems:

$$\begin{aligned} \frac{dP(x_i | t)}{dt} = & p_{i \leftarrow i-1}(x_{i-1})P(x_{i-1} | t) - p_{i+1 \leftarrow i}(x_i)P(x_i | t) \\ & + q_{i \leftarrow i-1}(x_{i-1})P(x_{i-1} | t) - q_{i+1 \leftarrow i}(x_i)P(x_i | t) \\ & + r_{i \leftarrow i-1}(x_{i-1})P(x_{i-1} | t) - r_{i+1 \leftarrow i}(x_i)P(x_i | t) \\ & + o_{i \leftarrow i+1}(x_{i+1})P(x_{i+1} | t) - o_{i-1 \leftarrow i}(x_i)P(x_i | t) \end{aligned} \quad (8)$$

oder alternativ:

$$\begin{aligned} \frac{dP(x_i|t)}{dt} = & w_{i \leftarrow i-1}(x_{i-1})P(x_{i-1}|t) - o_{i-1 \leftarrow i}(x_i)P(x_i|t) \\ & - w_{i+1 \leftarrow i}(x_i)P(x_i|t) - o_{i \leftarrow i+1}(x_{i+1})P(x_{i+1}|t), \end{aligned} \quad (9)$$

wobei  $w_{i \leftarrow i-1} = p_{i \leftarrow i-1} + q_{i \leftarrow i-1} + r_{i \leftarrow i-1}$  und  $w_{i+1 \leftarrow i} = p_{i+1 \leftarrow i} + q_{i+1 \leftarrow i} + r_{i+1 \leftarrow i}$  gilt.

Die rechte Seite der Gleichung (8) enthält alle Veränderungen des Zustands  $x_i$ . Übergangsraten mit einem positiven Vorzeichen steigern die Wahrscheinlichkeit eines Zustands  $x_i$ , während Übergangsraten mit einem negativen Vorzeichen diese Wahrscheinlichkeiten verringern. Die jeweiligen Übergangsraten werden mit der Wahrscheinlichkeit multipliziert, einen speziellen Zustand  $x_i$  anzutreffen. Dies kann zweifach interpretiert werden. Zum einen, je größer  $P(x_i|t)$  desto höher ist die Wahrscheinlichkeit für einen bestimmten Übergang, d.h. für den innovativen Erfolg oder Mißerfolg. Dieser Aspekt gilt für die Übergangsraten (1), (6) und (7). Zum zweiten, mit Bezug auf die intra-industriellen Spillovereffekte in (5) dient  $P(x_i|t)$  als ein Maß für die intra-industrielle Interaktion. Je größer  $P(x_i|t)$ , desto größer ist die Interaktion und damit die Wahrscheinlichkeit für innovativen Erfolg.

Diese beiden Interpretationen weisen auf die Mikro-Makrobeziehungen unseres Modells hin: Die  $P(x_i|t)$  können auch als Makrophänomen interpretiert werden, indem sie die Wahrscheinlichkeit eines Zustands  $x_i$  beschreiben. Dieser Makrozustand beeinflusst die Mikroübergangsraten und wird im Gegenzug wiederum durch die Übergangsraten beeinflusst.

Um das System zu schließen, müssen die Bedingungen für die Randzustände  $x_1$  und  $x_n$  separat formuliert werden, da sie nur in eine Richtung verlassen oder von einer Richtung erreicht werden können (*reflektierende Grenzen*). Für das geringste Technologieniveau erhalten wir:

$$\frac{dP(x_1|t)}{dt} = o_{1 \leftarrow 2}(x_2)P(x_2|t) - w_{2 \leftarrow 1}(x_1)P(x_1|t). \quad (10)$$

Diese Formulierung impliziert, daß die Unternehmen auf dem niedrigsten Technologieniveau jeweils auf den Stand des ingenieurwissenschaftlichen Wissens angehoben werden.

Die Gleichung für die rechte Intervallgrenze lautet:

$$\frac{dP(x_n|t)}{dt} = o_{n-1 \leftarrow n}(x_n)P(x_n|t) - w_{n \leftarrow n-1}(x_{n-1})P(x_{n-1}|t). \quad (11)$$

Hierdurch wird dem Effekt der neuen Opportunitäten durch wissenschaftliche Forschung Rechnung getragen. Mit diesen beiden Gleichungen ist unser Modell vollständig spezifiziert.

Für die Lösung eines solchen Systems läßt sich als erste Approximation die in der Literatur häufig verwendete, sogenannte Mittelwertgleichung angeben (vgl. Weidlich/Braun, 1992, S. 239). Die Mittelwertgleichung für die Mastergleichung (9) kann wie folgt geschrieben werden:

$$\frac{d\bar{x}_i}{dt} = \frac{\overline{w_{i \leftarrow i-1}(x_{i-1})} - \overline{w_{i+1 \leftarrow i}(x_{i+1})}}{+ \overline{o_{i \leftarrow i+1}(x_{i+1})} - \overline{o_{i-1 \leftarrow i}(x_i)}} \quad (12)$$

Die Mittelwertgleichungen haben den Vorteil, daß sie analytisch lösbar sind und eine relativ gute Approximation der Lösung im Falle von unimodalen Verteilungen darstellen. In Fällen, bei denen ein Phasenübergang im Sinne von Bifurkationsstrukturen stattfindet, beschreibt die Mittelwertgleichung jedoch eine höchst unwahrscheinliche Lösung. Um hier das Verhalten des Modells zu analysieren, sind numerische Simulationen durchzuführen.

#### 4. Die Simulation des Modells

Die Simulationen werden für eine Technologieskala mit  $n = 100$  verschiedenen Technologieniveaus durchgeführt. Diese Anzahl ist ausreichend, um alle wesentlichen Entwicklungen modellieren zu können. Im folgenden bestehen alle Simulationsläufe aus 10.000 Iterationen, um der stationären Lösung der Mastergleichung möglichst nahezukommen. Desweiteren starten alle Simulationen auf dem niedrigsten Technologieniveau  $x_1, P(x_1|0) = 1$ .

##### 4.1 Die Modellkallibrierung

Bevor mit den Simulationsexperimenten gestartet werden kann, müssen die verwendeten Parameter spezifiziert und die relativen Gewichte für die verschiedenen Determinanten der technologischen Evolution eingeführt werden. Die S&E-Erfolgswahrscheinlichkeit ist ein Aggregat von vier Elementen. Die eigenen S&E-Anstrengungen sind dabei sicherlich am bedeutendsten. Sie werden in Gleichung (1) mit dem Gewichtungsparemeter  $\alpha$  bewertet. Aufgrund ihrer hohen Bedeutung sollen diese Anstrengungen mit dem Wert  $\alpha = 0,7$  gewichtet werden. Die abnehmenden Opportunitäten auf einer bestimmten technologischen Trajektorie werden durch den Parameter  $d = 3,5$  beschrieben.

Die zweite Determinante, die intra-industriellen Spillovereffekte der Gleichung (5) sollen einen vergleichsweise geringeren Einfluß haben. Ihr Gewicht beträgt  $\beta = 0,15$ . Der Parameter  $l = 0,1$  ist dabei verantwortlich für den maximalen Einfluß dieser Effekte innerhalb der ersten Hälfte der Technologieskala.

Inter-industrielle Spillovereffekte der Gleichung (6) erlangen ihre besondere Bedeutung in der zweiten Hälfte der Technologieskala, was durch den Parameter  $g = 0,5$  berücksichtigt wird. Von den Unternehmen sind absorptive Fähigkeiten aufzubauen, wenn sie inter-industrielle Spillovereffekte und damit die Möglichkeit für *cross-fertilization*-Effekte nutzen wollen. Der Parameter  $b = 15$  zeichnet sich verantwortlich für eine relativ leichte Akkumulation von absorptiven Fähigkeiten, so daß bereits im zweiten Viertel der Skala positive Effekte auftreten. Die inter-industriellen Spillovers werden wie die intra-industriellen Spillovers mit  $\gamma = 0,15$  gewichtet.

Schließlich soll für die Obszoleszenzrate (7) ein vergleichsweise hoher Einfluß der Wissenschaften auf die technologische Entwicklung unterstellt werden,  $o = 0,2$ . Dies hat zur Folge, daß im Durchschnitt nach fünf Perioden ein neuer technologischer Zustand auf der rechten Seite der Skala potentiell erreichbar wird.

Auf Basis dieser Kallibrierung zeigt die Abbildung 7 die Phasendiagramme der deterministischen Makrogleichung (13) für verschiedene Szenarien in einer vereinfachten Form (nicht-lineare Übergangsraten) (siehe Woekener, 1992):

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i \left\{ \left( \alpha^* e^{-d^* x_i} + \beta^* x_i e^{-\frac{x_i}{l}} + \frac{\gamma^* f}{1 + e^{b^*(g-x_i)}} \right) - o \right\} \quad (13)$$

Abbildung 7a) zeigt die Kurve, wenn die Parameter  $\beta$  und  $\gamma$  (oder  $f$ ) auf Null gesetzt werden, das heißt intra- und inter-industrielle Spillovereffekte nicht berücksichtigt werden. In Abbildung 7b) sind inter-industrielle Spillovers erlaubt, dennoch verändert sich die Kurve nur unwesentlich. Der Gipfel im Fall b) ist jedoch höher und der Schnittpunkt mit der  $x_i$ -Achse liegt weiter rechts. Aus diesem Grund erwarten wir einen höheren Gleichgewichtswert. In Abbildung 7c) verändert sich die Form der Kurve wesentlich. Hier sind sowohl intra- als auch inter-industrielle Spillovereffekte zugelassen. Man findet drei Schnittpunkte und zwei lokale Maxima. Unter diesen Umständen erwarten wir ein verändertes Systemverhalten im Vergleich zu den Fällen a) und b).

#### 4.2 Simulationsergebnisse für die verschiedenen Szenarien

Um das Modellverhalten besser verstehen zu können, simulieren wir verschiedene Szenarien. In Szenario I ohne technologische Spillovereffekte be-

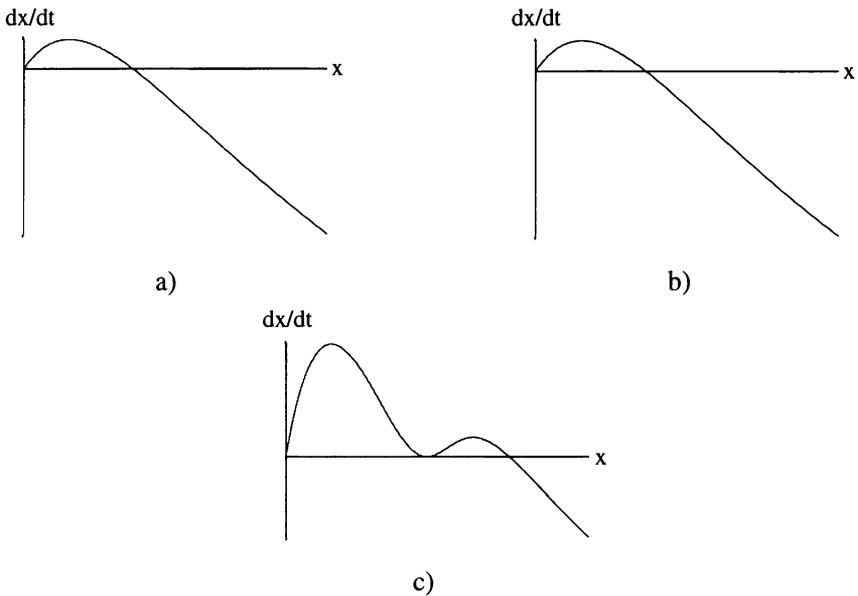


Abbildung 7: Phasen-Diagramme der deterministischen Makro-Gleichung

trachten wir das System, wenn nur eigene S&E-Anstrengungen von Bedeutung sind. In diesem Fall kann technologisches Know-how perfekt appropriiert werden und sogar strategisch motivierter Wissensaustausch findet nicht statt. Abbildung 8 zeigt die entsprechende Entwicklung der Wahrscheinlichkeiten  $P$  für die verschiedenen Technologieniveaus  $x_i$  im Zeitablauf  $t$  für die ersten 3000 Perioden.

Eine große Zahl von Firmen kann relativ schnell ihr Technologieniveau verbessern. Bereits nach 600 Iterationen ist das erste Viertel der Technologieskala besetzt. Die Geschwindigkeit des technologischen Fortschritts nimmt in dem Maße ab, wie sich das System einer stabilen Verteilung nähert. Um dies abzubilden, zeigt Abbildung 9 Phasenportraits für ausgewählte Perioden. Der Anteil der Firmen auf dem niedrigsten Technologieniveau nimmt signifikant ab und ungefähr ab Periode 1.200 ist eine erste Strukturbildung auf der Makroebene zu beobachten. Die technologische Evolution führt dann zu einer Verteilung von verschiedenen Technologieniveaus mit einem Maximum der Wahrscheinlichkeit und des relativen Anteils für eine Technologie bei ungefähr  $x_{25}$ .

Diese Entwicklung erreicht bald ihre stationäre Lösung. Die Bewegung auf der Makroebene kommt zum Stillstand. In Abbildung 10 sieht man die nahezu identischen Phasenportraits für die 3.500ste und 4.000ste Iteration.

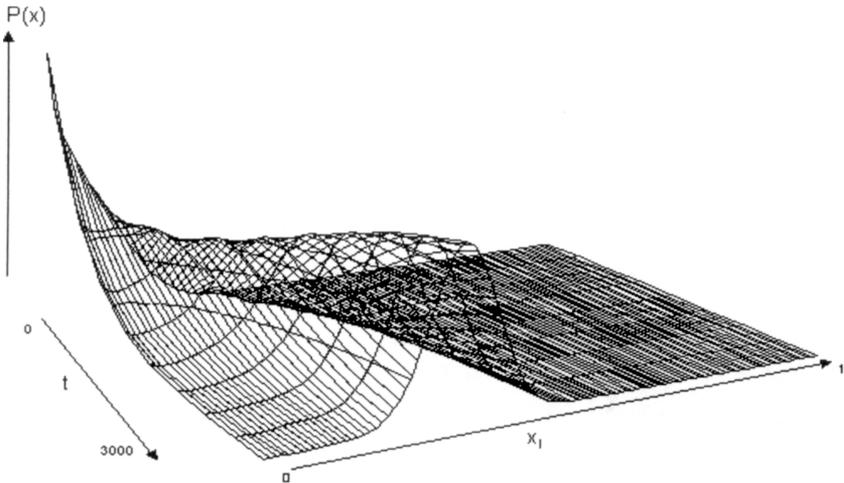


Abbildung 8: Technologische Evolution ohne Spillover-Effekte ( $\beta = \gamma = 0$ )

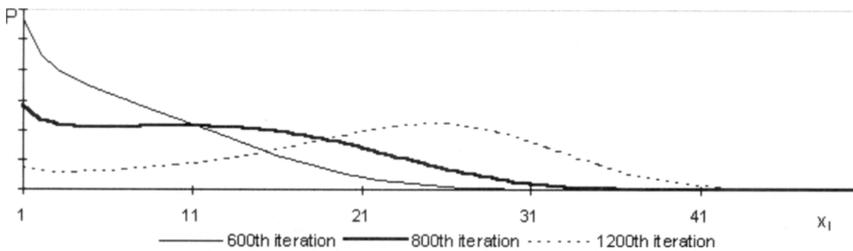


Abbildung 9: Phasen-Portrait zum Anfang der Entwicklung

Die stationäre Lösung ohne Spillovereffekte ist eine Verteilung um das Maximum  $x_{34}$ . Dieses Ergebnis kann als eine stochastische neoklassische Lösung interpretiert werden. Die vorgefundene Heterogenität der Unternehmen ist allein auf stochastische Effekte, um ein eindeutiges Maximum herum, zurückzuführen. Innerhalb dieser stationären Lösung haben alle Unternehmen die gleiche Chance auf oder hinter der Technologiefrontier zu sein.

Wie verändert sich der evolutionäre Prozeß, wenn man Interdependenzen zuläßt, die sich auf die öffentlichen-Gut-Eigenschaften neuen technologischen Know-hows zurückführen lassen? In diesem Zusammenhang simulieren wir Szenario II, bei dem intra-industrielle Spillovers ( $\beta = 0,15$ ) zugelassen sind. Betrachtet man sich die entsprechende Entwicklung, so stellt man eine ähnliche Struktur wie im ersten Szenario (Abbildung 8) fest. Die Abbildungen 11.a und 11.b zeigen die Phasenportraits von Situationen mit

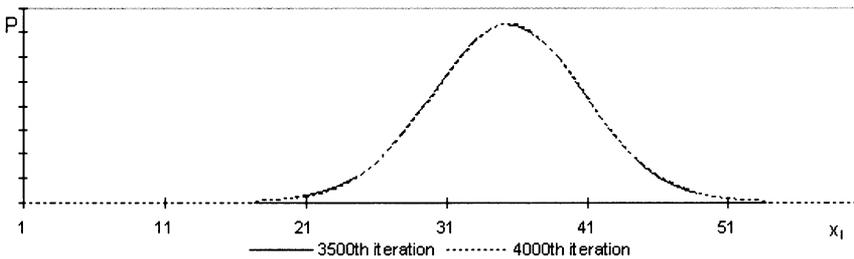


Abbildung 10: Stationäre Lösung ohne Spillover-Effekte

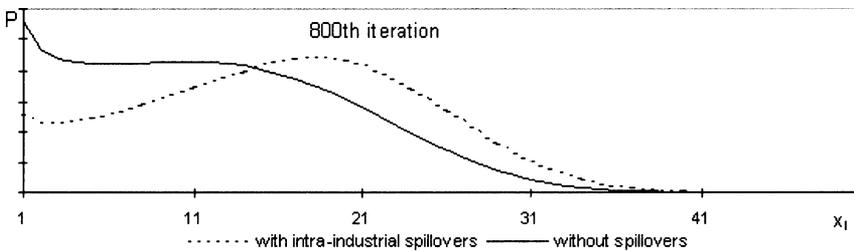


Abbildung 11.a

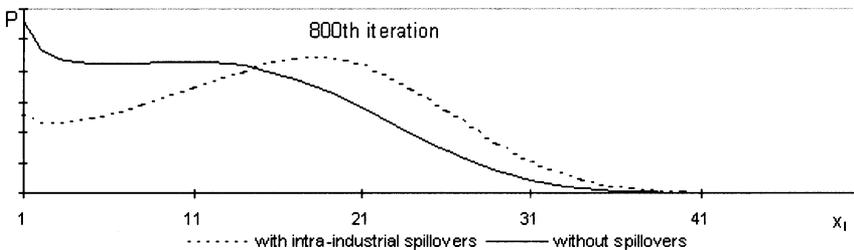


Abbildung 11.b

und ohne intra-industrielle Spillovereffekte. Bereits nach 800 Iterationen besetzen die Unternehmen in Szenario II deutlich höhere Technologieniveaus als in Szenario I – es gelang ihnen, intra-industrielle Spillovereffekte zu internalisieren. Nach weiteren 400 Perioden wird dieser Unterschied noch signifikanter. Die realisierten technologischen Niveaus in Szenario II sind im Durchschnitt höher als diejenigen in Szenario I.

Eine stationäre Lösung wird auch hier frühzeitig erreicht. Das Maximum der Wahrscheinlichkeit findet sich nun bei  $x_{39}$ . Dies bedeutet, daß intra-technologische Spillovereffekte einen positiven Einfluß ausüben, der zu vergleichsweise höheren Technologieniveaus in der stationären Lösung führt:

„The logic of such feedback suggests, however that why they can partially offset the tendency of R&D to deplete prevailing opportunities, in the long run they cannot totally offset this tendency.“ (Klevorick et al., 1995, S. 192). Diese Lösung kann ebenfalls im neoklassischen Sinn interpretiert werden, wobei jedoch nur die positiven Effekte der Spillovereffekte und nicht die anreizreduzierenden Effekte der Spillovers berücksichtigt werden.<sup>9</sup>

Für inter-industrielle Spillovers vermuten wir einen strukturverändernden Einfluß, da durch die potentiellen cross-fertilization-Effekte neue technologische Opportunitäten eröffnet und damit die Beschränkungen durch das Wolfsche Gesetz hinausgeschoben werden. Das folgende Simulationsexperiment berücksichtigt neben den intra-industriellen Spillovers ( $\beta = 0,15$ ) auch die inter-industriellen Effekte ( $\gamma = 0,15$ ). In Abbildung 12 wird die gänzlich unterschiedliche Technologieevolution dieses Szenarios III für die Perioden 1000 bis 8000 dargestellt.

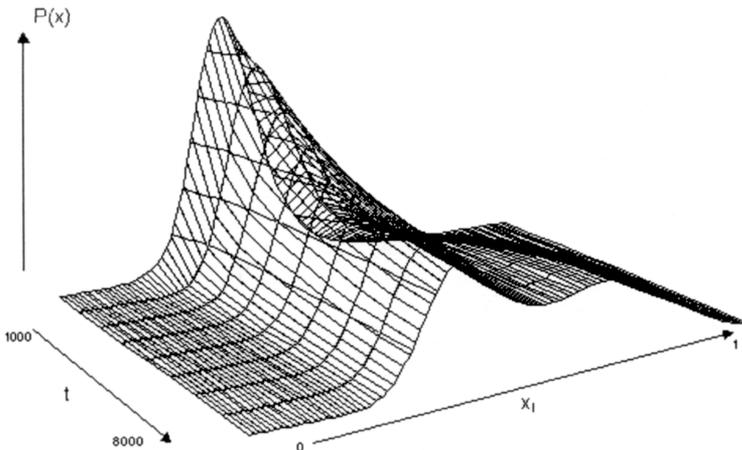


Abbildung 12: Technologische Evolution mit intra- und inter-industriellen Spillovers ( $\beta = 0,15$ ,  $\gamma = 0,15$ )

Am Anfang der Entwicklung zeigen die Phasenportraits (Abbildung 13) eine ähnliche Verteilung wie in den Szenarien I und II. Alle Unternehmen starten bei  $x_1$  weshalb noch keine unterschiedlichen absorptiven Fähigkeiten existieren. Dieses ändert sich ab Iteration 1.000. Zu diesem Zeitpunkt weisen einige Unternehmen bereits hohe absorptive Fähigkeiten auf, die es

<sup>9</sup> Annahme (A1) schließt derartige Effekte aus, da die Unternehmen ein konstantes F&E-Budget aufweisen.

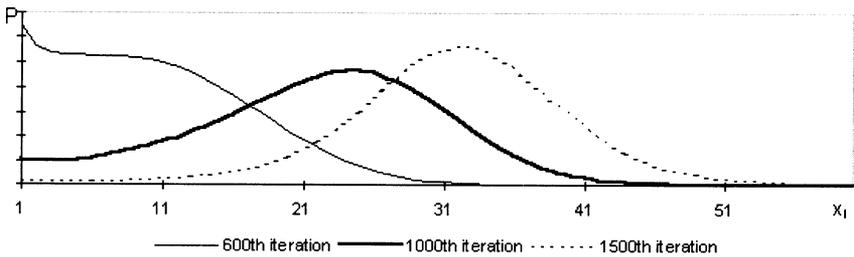


Abbildung 13

ihnen ermöglichen, neue extensive Opportunitäten auszuschöpfen. Eine stationäre Lösung ist jedoch noch nicht erreicht, in der weiteren Entwicklung wird der angesprochene Effekt noch einmal verstärkt (Abbildung 14).

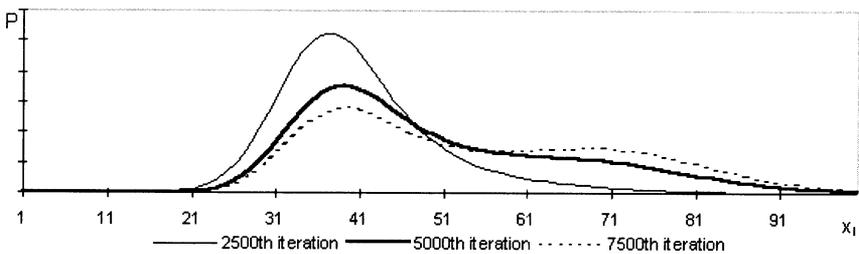


Abbildung 14

Ein wachsender Anteil der Unternehmen ist nun in der Lage, höhere technologische Niveaus zu erreichen wodurch sich eine spezifische bimodale Struktur herausbildet. Dies macht den entscheidenden Unterschied zu den vorhergehenden Simulationen aus. Das Modell erzielt durch die Berücksichtigung inter-industrieller Spillovereffekte zusätzliche Heterogenität. Ein lokales Maximum auf niedrigen Technologieniveaus sowie eines auf höheren Technologieniveaus bildet sich heraus. Dies ist das Ergebnis eines Bifurkationsprozesses: „... *It is apparent that the emergence of a new innovation avenue through fusion of two or more avenues ... can give rise to sudden changes in the mode and tempo of technical progress. ... We should be prepared to expect surprises in the course of technological evolution.*“ (Sahal, 1985, S. 79). Die stationäre Lösung mit einer Stagnation auf der Makroebene wird erst weit später erreicht. Nach ungefähr 7.500 Iterationen hat sich eine konstante Struktur herausgebildet.

Wie die vorstehende Simulation zeigt, sind inter-industrielle Spillovereffekte für zusätzliche Struktureffekte verantwortlich, welche durch die neoklassische Innovationstheorie nicht erklärt werden können. Neue extensive

technologische Opportunitäten sorgen für einen selbstverstärkenden Mikro-Makro-Loop, der für eine gänzlich veränderte Entwicklung verantwortlich ist. Ein einzelner Sektor teilt sich dabei in zwei Gruppen von Firmen, wobei diejenigen, die sich auf niedrigeren Technologieniveaus befinden, eine geringe Wahrscheinlichkeit haben, zur Technologief Frontier aufzuschließen. Unternehmen nahe des höheren Maximums besitzen ebenfalls eine geringere Wahrscheinlichkeit zum niedrigeren Technologieniveau in der Nähe des ersten Maximums, zurückzufallen. Auf diese Art und Weise verfestigt sich die vorgefundene Heterogenität.

### 4.3 Die Robustheit der Ergebnisse

Obige Ergebnisse sind für eine ganz bestimmte Parameterkonstellation herausgearbeitet worden. Die Robustheit der Ergebnisse in bezug auf eine Veränderung dieser Werte bedarf daher noch einiger Anmerkungen. Für die Übergangsraten lassen sich auch andere Funktionalzusammenhänge finden, ohne daß sich dabei die Ergebnisse wesentlich ändern. So kann man für die Übergangsraten (1) *eigenes S&E* und (5) *intra-industrielle Spillovers* auch lineare Beziehungen verwenden. Allerdings ist für *inter-industrielle Effekte* (6) eine nicht-lineare Beziehung unverzichtbar, damit der Phasenübergang des Systems erhalten bleibt.

Eine Sensitivitätsanalyse für die verschiedenen Parameter unseres Modells zeigt, daß die Parameter  $b$ ,  $g$  und  $d$  für die Bifurkation des Systems verantwortlich sind. Unter *ceteris-paribus* Bedingungen wird die Bifurkationsstruktur immer dann gefunden, wenn die jeweiligen Parameter sich innerhalb der folgenden Intervalle befinden:

$$b > 12; \quad 3,35 < d < 3,65; \quad 0,48 < g < 0,53.$$

Diese Parameter beziehen sich auf die Effekte abnehmender Opportunitäten ( $d$ ), absorptiver Fähigkeiten ( $b$ ) und auf den Schwellenwert ( $g$ ), ab dem die absorptiven Fähigkeiten wirksam werden. Das Zusammenspiel dieser Parameter bestimmt die strukturellen Effekte. Das offene Intervall für  $b$ , stellt einen Minimalwert dar, der notwendig ist, damit inter-industrielle Spillovereffekte ihre strukturelle Wirkung zeigen. Es gibt hier keine Beschränkung nach oben, der separierende Effekt wird durch ein hohes  $b$  verstärkt. Ein zu niedriger Wert für  $b$  hingegen sorgt dafür, daß inter-industrielle Spillovereffekte nur eine relativ geringe Bedeutung besitzen, so daß sich in letzter Konsequenz keine zusätzliche strukturelle Entwicklung zeigt.

Für die Parameter  $d$  und  $g$  zeigt sich die bimodale Struktur immer dann, wenn sie innerhalb der angegebenen Intervalle liegen. Für höhere Werte erweist sich die Wirkung des Wolf'schen Gesetzes als zu stark (zu hohes  $d$ ) bzw. wird der kompensierende Effekt der inter-industriellen Spillovers erst

ab einem zu hohen technologischen Niveau wirksam (zu hohes  $g$ ). In diesen Fällen ergibt sich eine unimodale Struktur mit einem Gipfel auf einem relativ niedrigem Technologieniveau (dieser ist jedoch höher als diejenigen in Szenario I und II). Für zu geringe Werte für  $d$  oder  $g$  werden die technologischen Opportunitäten kaum erschöpft oder die absorptiven Fähigkeiten sind bereits auf niedrigen Technologieniveaus wirksam. Auch hier zeigt sich dann eine unimodale Struktur, diesmal jedoch auf relativ hohem technologischen Niveau.

Die Diskussion der Robustheit unserer Ergebnisse weist deutlich auf die Beziehung zwischen der Schaffung von neuen technologischen Opportunitäten und den dazu notwendigen absorptiven Fähigkeiten hin.<sup>10</sup> Nur dann, wenn die Opportunitäten für den Fortschritt von großer Bedeutung sind, und wenn die dazu notwendigen Kompetenzen nicht zu leicht aufgebaut werden können, zeigt sich eine charakteristische bimodale Struktur für die industrielle Entwicklung.

## 5. Zusammenfassung

Dieser Beitrag verfolgt das Ziel, die technologische Entwicklung von Unternehmen entlang einer technologischen Trajektorie zu modellieren, wobei explizit die stilisierten Fakten des technologischen Fortschritts berücksichtigt werden, wie sie der Wissensansatz der modernen Innovationstheorie hervorhebt. Als wichtigste treibende Kraft für technologischen Fortschritt werden hierbei die Fähigkeiten der Unternehmen herausgestellt, technologische Möglichkeiten zu schaffen und auszubauen. Hierbei existieren verschiedene Aktivitäten und Einflußgrößen, die zum Aufbau solcher Fähigkeiten beitragen. Neben eigenen Such- und Experimentieraktivitäten können Unternehmen auch auf externe Wissensquellen zurückgreifen. Auf der einen Seite findet man intra-industrielle Spillovereffekte, die von anderen Firmen in der gleichen Industrie ausgehen. Langfristig gesehen können diese Effekte jedoch die Tendenz abnehmender Opportunitäten eines bestimmten technologischen Pfades nicht kompensieren. Auf der anderen Seite findet man auch inter-industrielle Spillovers, die es Unternehmen erlauben, technische Informationen aus anderen Sektoren zu verstehen. Hierdurch können extensive technologische Opportunitäten aufgebaut werden.

Betrachtet man die Erschließung solcher externer Wissensquellen, so zeigt sich, daß Industrien durch eine starke und persistente technologische

---

<sup>10</sup> Natürlich ist auch eine Sensitivitätsanalyse für die Faktoren  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  durchzuführen. Die entsprechenden Ergebnisse stehen jedoch nicht im Zusammenhang mit technologischen Möglichkeiten und absorptiven Fähigkeiten.

Heterogenität gekennzeichnet sein können. Einigen Unternehmen ist es dann möglich, auf vergleichsweise hohen Technologieniveaus zu produzieren, wobei sie sich deutlich von Unternehmen auf niedrigeren Technologieniveaus abgrenzen. Letztere haben nur geringe Chancen, zur Technologief Frontier aufzuschließen, sie können mit dem technologischen Fortschritt der Technologieführer nicht mithalten. Im Gegensatz zu der neoklassischen Theorie wird die technologische Heterogenität nicht als ein temporäres Phänomen angesehen, sondern ist endogen generiert und hat ihre Ursache in den Such- und Experimentieraktivitäten der Unternehmen.

Die gewählte Struktur unseres Modells berücksichtigt keine ökonomischen Effekte. Im dynamischen Zusammenhang mag man hier an *success-breeds-success*-Effekte denken, die dazu führen, daß nicht erfolgreiche Unternehmen aus dem Markt ausscheiden. Würde man diesen Aspekt in unserem Modell berücksichtigen, so würden sich die grundlegenden Ergebnisse nicht verändern. Hierbei muß man allerdings beachten, daß wir Markteffekte nicht direkt berücksichtigen können. Dennoch ist es möglich, erwartete Markteffekte indirekt in das Modell einzubauen. Würde man beispielsweise *success-breeds-success*-Effekte modellieren, so müßte man die jeweiligen Übergangsraten so modifizieren, daß der höhere Markterfolg auf höheren technologischen Niveaus zu einer Beschleunigung des technologischen Fortschritts führt. Dies könnte durch einen zusätzlichen multiplikativen Faktor in den Übergangsraten in Abhängigkeit vom Zustand  $x_i$  geschehen. Für die verschiedenen Szenarien würde dies bedeuten, daß eine höhere Rate des Fortschritts und stationäre Lösungen auf höheren Technologieniveaus zu beobachten wären. Bezüglich der strukturellen Effekte, sind von diesen Modifikationen jedoch keine Veränderungen zu erwarten.

Desweiteren weist der strukturelle Aspekt unseres Modells auf Mechanismen hin, wie Unternehmen auf niedrigen technologischen Niveau aus dem Markt „gedrängt“ werden. Der Aufbau von technologischen Fähigkeiten in Kombination mit einigen anderen technologischen Determinanten bestimmt somit die Überlebensfähigkeit der Unternehmen. Unsere Betonung der Innovationsaktivitäten als Such- und Experimentierprozesse darf daher nicht so verstanden werden, daß wir diejenigen Aspekte, die vom ressourcenbasierten Ansatz der *new industrial economics* betont werden, negieren. Vielmehr soll unser Modell dazu beitragen, daß mit Hilfe der Hervorhebung verschiedener Quellen für technologische Opportunitäten und Fähigkeiten ein realistischeres Modell für den technischen Fortschritt gefunden wird.

Letztendlich gilt es auf einige Probleme unseres Ansatzes hinzuweisen. Die folgenden zwei Punkte bedürfen sicherlich einer zusätzlichen Formulierung und Untersuchung: (1) Inter-industrielle Spillovereffekte sollten endogenisiert werden, um so zu einem Netzwerk von intersektoralen Beziehungen zu kommen. (2) Die Einführung einer zweiten Dimension des Zu-

standardsraums sollte es möglich machen, auch Markteffekte zu berücksichtigen. Diese beiden Punkte würden unsere Analyse sicherlich verbessern, aber im gleichen Ausmaß das Modell schwieriger und komplizierter machen. Dennoch stehen diese beiden Schritte auf der Agenda für weitere Forschungsarbeiten.

## Literatur

- Abernathy, W./Utterback, J.* (1975), A Dynamic Model of Process and Product Innovation. *Omega* 33, 639 - 656.
- Ayres, R.U.* (1988), Barriers and Breakthroughs: An "Expanding Frontiers" Model of the Technology-Industry Life-Cycle. *Technovation* 7, 87 - 115.
- Coombs, R.* (1988), Technological Opportunities and Industrial Organization. In: *Dosi, G. et al.* (eds.), *Technical Change and Economic Theory*. London, 295 - 308.
- Dahmén, E.* (1989), Development Blocks in Industrial Economics. In: *Carlsson, B.* (ed.), *Industrial Dynamics*. Dordrecht.
- Dasgupta, P./Stiglitz, J.E.* (1980), Industrial Structure and the Nature of Innovative Activity. *Economic Journal* 90, 266 - 293.
- DeBresson, C.* (1996), Economic Interdependence and Innovative Activity – An Input-Output Analysis. Cheltenham.
- Dosi, G.* (1982), Technological Paradigms and Technological Trajectories: A suggested Interpretation of the Determinants and Directions of Technical Change. *Research Policy* 11, 147 - 162.
- (1988), Sources, Procedures and Microeconomic Effects of Innovation. *Journal of Economic Literature* 26, 1120 - 1171.
- Ehrenreich, H.* (1995), Strategic Curiosity: Semiconductor Physics in the 1950s. *Physics Today*, January 1995, 28 - 34.
- Eliasson, G.* (1990), The Firm as a Competent Team. *Journal of Economic Behaviour and Organization* 13, 275 - 298.
- Erdmann, G.* (1993), *Elemente einer evolutorischen Innovationsökonomik*. Tübingen.
- Freeman, C.* (1994), The Economics of Technical Change. *Cambridge Journal of Economics* 18, 463 - 514.
- Haag, G.* (1989), *Dynamic Decision Theory: Application to Urban and Regional Topics*. Dordrecht.
- Haag, G./Weidlich, W.* (eds.), *International Migration, Dynamic Theory and Comparative Analysis*. Berlin Heidelberg New York.
- Haken, H.* (1990), *Synergetik: Eine Einführung. Nichtgleichgewichtige Phasenübergänge und Selbstorganisation in Physik, Chemie und Biologie*. Berlin Heidelberg New York.

- Honerkamp, J.* (1989), *Stochastische Dynamische Systeme – Konzepte, numerische Methoden, Datenanalysen*. Weinheim.
- Jaffe, A.* (1986), Technological Opportunity and Spillovers of R&D: Evidence from Firm's Patents, Profits, and Market Value. *American Economic Review* 76, 984 - 1001.
- Kaufmann, S.A.* (1988), The Evolution of Economic Webs. In: Anderson, P.W. et al. (eds.), *The Economy as an Evolving Complex System*, Addison Wesley.
- Klevorick, A. et al.* (1995), On the Sources and Significance of Interindustry Differences in Technological Opportunities. *Research Policy* 24, 185 - 205.
- Machlup, F.* (1984), *The Economics of Information and Human Capital*, Princeton.
- Meyer-Krahmer F./Wessels, H.* (1989), Intersektorale Verflechtung von Technologiegebern und Technologienehmern. *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik* 206, 563 - 582.
- Montano, M.A.J./Ebeling, W.* (1980), A Stochastic Evolutionary Model of Technological Change. *Collective Phenomena* 3, 185 - 205.
- Mowery, D.C.* (1990), The Economic History of Industrial Research in US Manufacturing. *AEA Papers and Proceedings*, 345 - 349.
- Nelson, R.R.* (1988), Institutions Supporting Technical Change in the United States. In: *Dosi, G. et al.* (eds.), *Technical Change and Economic Theory*, 312-329, London.
- (1990), Capitalism as an Engine of Progress. *Research Policy* 19, 193 - 214.
- (1994), The Co-Evolution of Technology, Industrial Structure and Supporting Institutions. *Industrial Structure and Corporate Change* 3, 47 - 63.
- Rosenberg, N.* (1984), *Inside the Black-Box*. Cambridge.
- Sahal, D.* (1985), Technological Guideposts and Innovation Avenues. *Research Policy* 14, 61 - 82.
- Scherer, F.M.* (1982), Interindustry Technology Flows and Productivity Growth Review of Economics and Statistics, 1982, 627-634.
- Spence, M.* (1984), Cost Reduction, Competition, and Industry Performance. *Econometrica* 52, 101 - 21.
- Stoneman P./Leech, D.* (1980), Product Innovation, Process Innovation and the R&D/Market Structure Relationship. Mimeo, University of Warwick.
- Weidlich, W./Braun, M.* (1992), The Master Equation Approach to Nonlinear Economics. *Journal of Evolutionary Economics* 2, 233 - 265.
- Woekener, B.* (1992), Zur Relevanz der Mastergleichung für die Modellierung ökonomischer Prozesse. *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik* 210, 412 - 426.
- (1993), Konkurrierende Innovationen, Netzwerk-Externalitäten und Standardisierung durch den Markt. In: *Wagner, A.* (Hrsg.), *Dezentrale Entscheidungsfindung bei externen Effekten*, 107 - 140. Tübingen.