
INSTITUT FÜR VOLKSWIRTSCHAFTSLEHRE

der

UNIVERSITÄT AUGSBURG



Technologeevolution

Eine Mikro-Makro-Analyse

von

Uwe Cantner

Andreas Pyka

Beitrag Nr. 137

Juli 1995

01

Volkswirtschaftliche Diskussionsreihe

**QC
072
V922
-137**

Technologief evolution
Eine Mikro-Makro-Analyse

von

Uwe Cantner

Andreas Pyka

Beitrag Nr. 137

Juli 1995

UB Augsburg

<08030251900013

<08030251900013

Technologeevolution

Eine Mikro- Makro- Analyse *

von

Uwe Cantner und Andreas Pyka

Universität Augsburg

Juli 1995

1. Einleitung

Der vorliegende Beitrag ist im Zusammenhang mit der Erklärung von Heterogenität in Branchen, Ökonomien etc. zu sehen. Forschungsanstrengungen auf diesem Gebiet sind bemüht, die Nicht-Existenz des neoklassischen Konzepts einer 'Point-Economy' nicht als transitorisches Phänomen zu begreifen, sondern hierfür andere Erklärungen zu finden. Der technologische Fortschritt nimmt dabei eine besondere Stellung ein, was sich im Phänomen des 'technological dualism' oder sogar 'technological pluralism' äußert¹. Die Relevanz derartiger Effekte wurde in einigen empirischen Arbeiten untersucht, wobei für ausgewählte Sektoren der französischen und deutschen Industrie im Zeitablauf persistente technologische Unterschiede zwischen Firmen innerhalb einer Branche nachgewiesen werden konnten (Bernard, Cantner, Westermann (1996), Cantner, Hanusch, Westermann (1996)).

Vor diesem Hintergrund enthält unsere Arbeit einige Simulationsexperimente zur Entwicklung von technologischen Strukturen innerhalb von Industrien und Branchen. Die theoretischen Grundlagen hierzu finden sich in der modernen Theorie des technischen Fortschritts, die einerseits auf die technologische Heterogenität von Akteuren und andererseits auf die besondere Bedeutung von Spillovereffekten im Sinne der Informationsübertragung innerhalb derartig heterogener Strukturen hinweist. In diesem Zusammenhang setzt sich unser Beitrag zum Ziel, die technologische Entwicklung aus dem Zusammenspiel unterschiedlicher Effekte nachzuzeichnen und dabei die Bedingungen für charakteristische Makrostrukturen modellhaft abzuleiten.

Für die kritische Diskussion und die wertvollen Anregungen bedanken wir uns bei den Teilnehmern des Arbeitskreises „Evolutionäre Ökonomie“ im Verein für Socialpolitik, der vom 6.-9. Juli 1995 im Schloß Hohentübingen, Tübingen, tagte. Insbesondere gilt hier unser Dank Günter Haag für seinen Diskussionsbeitrag, sowie Adolf Wagner für die Einladung nach Tübingen.

¹ Vgl. DAVID, P.A., FORAY, D. (1995).

Um dieses Ziel erreichen zu können, verwenden wir ein theoretisches Instrumentarium, das es ermöglicht, unterschiedliche technologische Niveaus und deren Entwicklung abzubilden, die Mastergleichung. Dieses Verfahren wurde von der theoretischen Physik auf dem Teilgebiet der Selbstorganisation von Systemen entwickelt, wobei die Entwicklungen auf der Makroebene durch die Handlungen auf der Mikroebene abgeleitet werden. Für unsere Fragestellung zeigt sich dieser Ansatz als geeignet, da es uns möglich ist, das Zusammenwirken von Unternehmen auf unterschiedlichen technologischen Niveaus als einen selbstorganisierenden Prozeß darzustellen.

In der Vergangenheit wurde der Mastergleichungsansatz zur Modellierung von Technologiewahl (Erdmann, G. (1993)), Technologiediffusion (Woeckener, B. (1993)), Technologiesubstitution (Montano, M.A.J., Ebeling, W. (1980)), Qualitätswettbewerb (Weidlich, W., Braun, M. (1992)), oder auch im Rahmen der Migrationstheorie (Weidlich, W., Haag, G. (1988), Haag, G. (1989)) verwendet. Im Gegensatz zu den dort verwendeten entscheidungstheoretischen Ansätzen, verfolgen wir hier eine strukturorientierte Analyse, bei der die F&E-Entscheidungen der Unternehmen exogen vorgegeben sind. Dabei interessiert uns die Verteilung technologischer Niveaus und nicht, wie in anderem Rahmen üblich, die Wahrscheinlichkeit für sich einander ausschließende Alternativen.

Basierend auf dieser analytischen Ausrichtung zeigen unsere Experimente, daß sich durch das Zusammenspiel unterschiedlicher Spillovereffekte und firmenspezifischer Forschungsanstrengungen charakteristische Industriestrukturen herausbilden. Interessant ist vorallem, daß sich unter bestimmten Bedingungen unerwartete Veränderungen dieser Struktur herauskristallisieren und sich so ein zusätzlicher Grad an Heterogenität einstellt.

Wir gehen wie folgt vor: Im 2. Kapitel werden die Determinanten der Technologieentwicklung herausgearbeitet, um darauf aufbauend das zentrale Element der Mastergleichung, die Übergangsraten ('transition rates') **mikrotechnologisch** fundiert abzuleiten. Aus diesen 'transition rates' wird im 3. Kapitel eine Mastergleichung formuliert, um das Verhalten des so entwickelten Systems in einer Simulationsanalyse unter verschiedenen Annahmen zu untersuchen. Einige Schlußfolgerungen aus den Simulationsergebnissen sowie ein Ausblick auf weitere Forschungen schließen die Arbeit.

2. Einflußfaktoren der Evolution von Technologien

Ganz im Gegensatz zur neoklassischen 'black-box' Betrachtung weist die moderne Innovationsforschung daraufhin, daß die Unternehmen die maßgeblichen Initiatoren der technischen Entwicklung sind. Der überwiegende Teil des technischen Fortschritts geht aus der unternehmerischen Innovationstätigkeit hervor, wodurch die Technologieevolution auf das engste mit den industriellen F&E-Anstrengungen verbunden ist. Die Entwicklung neuer und verbesserter Verfahren und Produkte gestaltet sich aus dem Zusammenwirken unterschiedlichster Faktoren, welche zum überwiegenden Teil unmittelbar mit dem industriellen Innovationsprozeß verbunden sind. Unternehmen investieren in beträchtlichem Ausmaß in eigene Forschungstätigkeit, von der wiederum zahlreiche Auswirkungen auf die F&E-Tätigkeit anderer Unternehmen ausgehen, sowohl innerhalb als auch zwischen unterschiedlichen Branchen. "Such interindustry flow of technology is one of the most distinctive characteristics of advanced capitalist societies, where innovations flowing from a few industries may be responsible for generating a vastly disproportionate amount of technical change, productivity improvement, and output growth in the economy."² Zusätzlich bestehen Rückkopplungen, Nebenwirkungen und gegenseitige Beeinflussungen zwischen den Systemen der institutionalisierten Grundlagenforschung und der unternehmerischen angewandten Forschung.

Als Ursache dieser technologischen Interdependenzen werden die besonderen Eigenschaften von technologischem Wissen angeführt, welches nur bis zu einem gewissen Grade öffentliche-Gut-Charakteristika aufweist. Dies ist die Ursache für technologische Spillovers, welchen einzelnen Akteuren unter Umständen die Forschungserkenntnisse anderer, ohne sich an den damit verbundenen Kosten zu beteiligen, zukommen lassen.

Beispielhaft sei eine Fallstudie des Innovationsprozesses aus den Anfängen der amerikanischen Halbleiterindustrie angeführt: "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."³ Eine solche Betrachtungsweise stellt auf gänzlich andere Implikationen von technologischen Spillovers ab, als die üblicherweise von der neoklassischen Theorie angeführten. Nicht die F&E-Anreize mindernden Effekte und damit ein aus wohlfahrtstheoretischer

² ROSENBERG, N. (1994), S. 78.

³ EHRENREICH, H. (1995), S. 30.

Perspektive zu niedriges Innovationsniveau stehen im Vordergrund, sondern die gegenseitige Befruchtung mit neuen Ideen und Erkenntnissen, wodurch der Innovationsprozeß insgesamt positiv beeinflusst wird. Weiter heißt es: "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 "⁴.

Diese Beschreibung der Halbleiterindustrie weist auf zwei wesentliche Elemente der technologischen Entwicklung hin, (1) die Schaffung (und Ausschöpfung) technologischer Möglichkeiten als ein (2) kollektiver evolutionärer Prozeß. Dabei werden die technologischen Möglichkeiten eines Entwicklungspfades einer einzelnen Technologie durch zahlreiche technologische Faktoren, im Zusammenspiel mit ökonomischen Größen, determiniert: Naturwissenschaftliche Gesetze geben dabei den Rahmen für die Entwicklung vor, was sich unter anderem in der Kostenintensität der Forschungs- und Entwicklungsvorhaben äußert, sich in der möglichen technischen Anwendungsbreite und damit potentiellen Marktgröße der neuen Produkte und Verfahren widerspiegelt oder seinen Ausdruck in technologisch und/oder ökonomisch komplementären oder substitutiven Beziehungen zu bereits Vorhandenem findet.

Die technologische Entwicklung von Unternehmen wird in diesem Zusammenhang als ein kumulativer Prozeß des Ausschöpfens technologischer Potentiale verstanden. Die Eigenschaft der Kumulativität bedingt, daß durch zunehmende Erfahrung ('learning-by-innovating') auf höheren Technologieniveaus die F&E-Erfolgswahrscheinlichkeiten positiv berührt werden. Diesem Effekt steht allerdings entgegen, daß auch die Risiken von Fehlentwicklungen auf höheren technologischen Niveaus wohl ansteigen. Dies liegt an der größeren Nähe zum wissenschaftlichen Fortschrittprozeß, wodurch vorallem die Unsicherheit im Innovationsgeschehen zunimmt. Neben diesen generellen Effekten müssen zusätzlich die folgenden Einflußgrößen berücksichtigt werden, die vom firmenspezifischen Technologieniveau abhängen:

- (1) F&E-Erfolge innerhalb der eigenen firmenspezifischen Technologie in Abhängigkeit vom erreichten Technologieniveau, die aus den direkten F&E-Anstrengungen resultieren;
- (2) intraindustrielle technologische Spillovereffekte von Unternehmen in der gleichen Branche, die eine mehr oder weniger ähnliche Technologielinie verfolgen;

(3) cross-fertilization-Effekte die aus interindustriellen Spillovers (und den Wissenstransfers aus dem Universitäts- und Wissenschaftsbereich) herrühren.

Neben diesen firmenspezifischen Effekten können sich Unternehmen den folgenden Entwicklungen nicht entziehen:

(4) Der Entwicklung eines allgemeinen, grundlegenden Stands der Technik, welcher unter anderem durch das allgemeine Ausbildungsniveau determiniert wird;

(5) der permanenten Veralterung der angewandten Technologien hinsichtlich der sich durch den wissenschaftlichen Fortschritt erweiternden technologischen Möglichkeiten,

(6) wobei der wissenschaftliche dem technischen Fortschritt immer mindestens einen Schritt voraus ist, d.h. die Ausdehnung der technologischen Möglichkeiten wird von wissenschaftlicher Seite initiiert.

Zur Beschreibung der Wirkung dieser Einflußfaktoren verwenden wir eine Skala von 0 - 1, die die Technologiezustände $x_i = i/n$, $i \in \{1, \dots, n\}$ mit n als Anzahl der unterschiedlichen Zustände (hier $n=T00$) wiedergibt. Für jeden Technologiezustand lassen sich zwei charakteristische Merkmale angeben:

- (a) das technologische Niveau, im Sinne des akkumulierten technologischen Wissens;
- (b) die Spezifität des jeweiligen technologischen Know-Hows, hinsichtlich des Grades der Transferierbarkeit.

Für das Intervall $]0;1]$ wollen wir annehmen, daß das technologische Niveau kumulativ ansteigt, wobei der Wert 0.01 für das niedrigste Technologieniveau X_1 steht, das im folgenden den jeweiligen 'allgemeinen Stand der Technik' repräsentiert. Der Wert 1.00 beschreibt das höchste Technologieniveau x_{100} . Zusätzlich soll mit zunehmenden X_i auch die Spezifität des technologischen Know-Hows ansteigen.

Desweiteren möchten wir diese Skala nicht als eine absolute sondern als eine relative Skala interpretieren, so daß diese Modellierung nicht impliziert, daß das höchste erreichbare Technologieniveau X_{100} ist. Vielmehr müssen alle technologischen Niveaus als relative Niveaus gegen-

über xioo gesehen werden. Auf diese Weise ist es dann möglich, auch sehr lange technologische Entwicklungen zu verfolgen, wobei unser Intervall $]0; 1]$ nur den Ausschnitt der zu einem bestimmten Zeitpunkt realisierten und/oder realisierbaren Technologien wiedergibt. Wir kommen hierauf weiter unten noch einmal zurück.

Auf Basis dieser Konzeption sollen die oben skizzierten Einflußfaktoren diskutiert werden. Dabei wird anhand der Kriterien 'Technologieniveau' und 'Technologiespezifität' eine mikro-technologische Fundierung der Übergangsraten⁵ für das in Kapitel 3 vorzustellende Modell erarbeitet.

2.1 F&E-Erfolgswahrscheinlichkeiten innerhalb der finnenspezifischen Technologie

Für die Beschreibung des evolutorischen Entwicklungsprozesses von Technologien haben sich in der neueren Theorie der Innovation und des technischen Fortschritts mehrere, zum größten Teil überlappende Konzepte herausgebildet: Ein technologisches Paradigma (Dosi (1982)), ein dominantes Design (Utterback/Abernathy (1975)) oder ein technologischer Wegweiser (Sahal (1985)) geben die wissenschaftlichen Rahmenbedingungen, Lösungsmethoden und verwendeten Materialien und Verfahren vor; innerhalb dieses Rahmens beschreiten die Unternehmen einzelne Technologiepfade (auch 'technological trajectories' bzw. 'innovation avenues' genannt), wobei ein solcher Pfad mit den jeweiligen technologischen Möglichkeiten versehen ist.⁶ Ein Merkmal dieser spezifischen Technologiepfade ist, daß sie sich im Zeitablauf erschöpfen oder mit anderen Worten, daß die technologischen Möglichkeiten dieses Technologiepfades mit zunehmenden technologischen Fortschritten abnehmen.⁷ Dafür verantwortlich zeichnet sich das sogenannte 'Wolffsche Gesetz', welches besagt, daß mit fortschreitendem Technologieniveau naturwissenschaftliche Begrenzungen und technische Engpässe zunehmend wirksam werden.⁸ Als Beispiel seien die Bemühungen um die Beschleunigung bei einer gleichzeitigen Verkleinerung von Mikroprozessoren genannt. Hier verhindern naturwissenschaftliche Eng-

⁵ Letztendlich sollen in weiteren Untersuchungen die im folgenden spezifizierten Funktionen durch Funktionsklassen ersetzt werden.

⁶ "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, D. (1985), S. 71.

⁷ "As resources are devoted to private R&D and projects are completed, technological opportunities are depleted and the pool of opportunities can be exhausted KLEVORICK, A. et. al. (1995), S.188.

⁸ "The increasing cost of achieving decreasing degrees of improvements in product or process technology is a recognized fact of life in the R&D laboratory.", AYRES, R.U. (1988), S. 101.

pässe in Form von quantenmechanischen Gesetzen weitere Verkleinerungen, da ein Mindestabstand zwischen den einzelnen Bauelementen zum stabilen Elektronenfluß verbleiben muß. Sind diese Größen- und Geschwindigkeitsbereiche erreicht, dann sind die entsprechenden Möglichkeiten des betrachteten Technologiepfades ausgeschöpft. Machlup verwendet hierfür folgende Worte: "The more there has been invented, the less there is left to be invented."⁹

Um diesen Zusammenhang formal darzustellen, greifen wir nur auf das Kriterium 'Technologieniveau' zurück (die 'Technologiespezifität' spielt hier keine Rolle). Wir nehmen an, daß die technologischen Opportunitäten auf dem niedrigsten Technologieniveau am größten sind, um in Richtung des relativ höchsten Niveaus abzunehmen. Dieser Effekt kann durch eine Exponentialfunktion $e^{-d \cdot x_i}$ modelliert werden. Erweitert um den kumulativen Effekt ergibt sich für die Wahrscheinlichkeitsverteilung der F&E-Erfolge der beteiligten Unternehmen innerhalb einer Technologielinie - in Abhängigkeit vom jeweils erreichten technischen Niveau - die folgende Funktion:

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

(1) beschreibt die Wahrscheinlichkeit p , sich vom Technologieniveau x_i zum benachbarten Technologieniveau x_{i+1} zu verbessern ($i+1 \leftarrow i$). Graphisch ergibt sich der in Abbildung 1 skizzierte Verlauf:

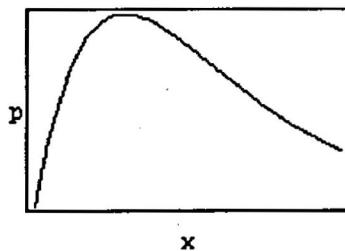


Abb. 1: F&E-Erfolgswahrscheinlichkeit bei abnehmenden Opportunitäten

Wie man der Abbildung entnehmen kann, nimmt durch die gewählte Verteilung aufgrund zunehmender Erfahrung auf höheren Technologieniveaus die F&E-Erfolgswahrscheinlichkeit $p_{i+1 \leftarrow i}$ anfangs noch zu. Ab einem bestimmten Niveau machen sich jedoch die Auswirkungen des Wolff'schen Gesetzes auf die technologischen Möglichkeiten derart bemerkbar, daß die F&E-Erfolgswahrscheinlichkeiten ab diesem Punkt wieder zu sinken beginnen. Das Ausmaß

⁹ MACHLUP, F. (1984), S.175.

der Abnahme der technologischen Möglichkeiten wird durch den Faktor d bestimmt: Wird ein größeres d gewählt, wird der sinkende Kurvenverlauf steiler, was in unserem Zusammenhang als eine vergleichsweise höhere Wirksamkeit der Beschränkungen durch das Wolffsche Gesetz interpretiert werden kann. Der Faktor a gewichtet das Ausmaß des Gesamteffekts und wird benötigt, um die eigenen F&E-Anstrengungen zu den noch folgenden Beeinflussungen der technologischen Opportunitäten ins Verhältnis zu setzen.

2.2 Intraindustrielle technologische Spillovers

Spillovereffekte resultieren aus den F&E-Anstrengungen der einzelnen Akteure, wobei man hier auf den zumindest teilweise Öffentlichen-Gut-Charakter des technischen Wissens abstellt. Ein Unternehmen kann sich unter Umständen Erkenntnisse anderer Unternehmen aneignen, ohne sich an den im Forschungsprozeß entstandenen Kosten zu beteiligen¹⁰. Die Spillovereffekte stellen nun im brancheninternen Innovationskontext eine wesentliche dynamische Komponente dar: Durch sie wird die Diffusion des in den Spillovers gebundenen Wissens und damit der Innovationsprozeß insgesamt beschleunigt.

Der Grad der Verfügbarkeit bzw. der Öffentliche-Gut-Anteil hängt entscheidend von der 'Spezifität' des betrachteten technischen Wissens ab. Obwohl die beiden Charakteristika öffentlicher Güter (Nicht-Rivalität und Nicht-Ausschließbarkeit) für die in den Spillovers gebundenen Informationen in Abhängigkeit von der institutioneilen Ausprägung der intellektuellen Eigentumsrechte (Copyrights, Trademarks, Patente, etc.) gleichermaßen vorliegen, sind die Spillovers für ein Unternehmen nicht uneingeschränkt verwendbar. Nelson spricht in diesem Zusammenhang von „latent publicness“.¹¹ Mit fortschreitendem technischen Niveau wird ein immer größerer Anteil des damit verbundenen Wissens spezifisch/implizit ('tacit') und entzieht sich dadurch einer unmittelbaren Verwendbarkeit Dritter¹². Erst nachdem ein Mindestmaß an Erfahrung akkumuliert wurde, ist dieses Wissen für eigene Belange einsetzbar: "In such cases

¹⁰ Die Öffentlichen-Gut-Charakteristika von technischem Wissen im Innovationswettbewerb werden von den Aneignungsbedingungen (appropriability conditions) determiniert, welche neben den technologischen Möglichkeiten den zweiten wichtigen angebotsseitigen Strukturfaktor im Innovationswettbewerb darstellen. Für eine detaillierte Analyse dieser beiden Strukturfaktoren und deren Zusammenspiel siehe CANTNER/PYKA (1995).

¹¹ NELSON, R R (1988), S. 314.

¹² Die höhere Verfügbarkeit auf niedrigeren Technologieniveaus kann auch durch zunehmende Normierung und Standardisierung im Zeitablauf begründet werden, wodurch zunächst vorhandene Spezifitäten abgebaut werden.

‘technology transfer’ may be as expansive and time-consuming as independent R&D.“¹³ Die Spezifität wird für höhere Technologieniveaus tendenziell weitaus größer sein als auf einem niedriger anzusetzendem Niveau: “Frontier knowledge is typically tacit, since receiver competence is lacking.”¹⁴ Betrachtet man den Grad der Verfügbarkeit v auf unserer Skala der Technologieniveaus, läßt sich folgender Verlauf (Abb.2) begründen:

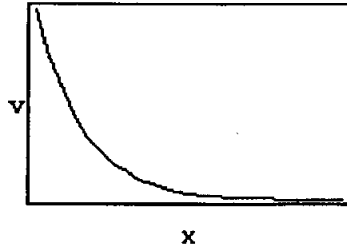


Abb.2: Abnehmende Verfügbarkeit mit zunehmenden Technologieniveaus

Die Verfügbarkeit v nimmt exponentiell mit dem Technologieniveau x_i ab; formal stellt sich dieser Zusammenhang folgendermaßen dar:

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

wobei der Faktor l für das Ausmaß der Zunahme der Spezifität mit fortschreitender technischer Entwicklung verantwortlich ist.

Für die Wirkung intraindustrieller Spillovereffekte ist neben der Verfügbarkeit von Wissen auch deren Nützlichkeit von Bedeutung. Diese setzt sich in unserem Zusammenhang aus zwei Komponenten zusammen. Zum einen steigt der Informationsgehalt der Spillovers mit dem Technologieniveau, von dem diese Effekte ausgehen.

Zum anderen nehmen mit steigendem Technologieniveau die firmenspezifischen technologischen Möglichkeiten und damit die F&E-Erfolgswahrscheinlichkeit ab, so daß der Spilloverwirkung zunehmende Bedeutung zukommt, sprich deren Nützlichkeit steigt. Dies kann folgendermaßen begründet werden: Im Zusammenhang mit der Entwicklung entlang eines bestimmten Technologiepfades und den dort wirksamen Beschränkungen durch das Wolff'sche Gesetz, spricht man von intensiven technologischen Möglichkeiten ('intensive technological opportuni-

¹³ Ders. (1990), S. 197.

¹⁴ CARLSSON, B. (1994), S. 13.

ties')¹⁵. Liegen beispielsweise die technischen und naturwissenschaftlichen Engpässe noch in weiter Ferne, sind die 'intensive technological opportunities' noch nicht erschöpft, es besteht noch ein großes Potential für 'direkte' Verbesserungsinnovationen. In dem Maße wie die intensiven technologischen Opportunitäten abnehmen, werden intraindustrielle Spillovers nützlicher, da innerhalb einer Industrie von einer gewissen technologischen Nähe der verwendeten Verfahren und produzierten Outputs ausgegangen werden darf.

Für die Nützlichkeit u , der in den intraindustriellen Spillovers gebundenen Informationen, ergibt sich auf unserer Technologieskala demnach folgender linearer Zusammenhang, wobei der Faktor β letztendlich zur Gewichtung des Gesamteffektes herangezogen wird (graphische Darstellung in Abb. 3):

$$(3) \quad u_i = \beta * x_i, \quad \beta > 0.$$

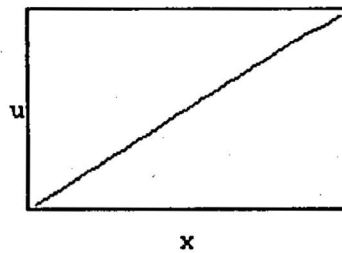


Abb. 3: Zunehmender Nutzen mit zunehmenden Technologieniveaus

Der Grad der Verfügbarkeit v und die Nützlichkeit u determinieren gemeinsam die Wahrscheinlichkeitsverteilung für F&E-Erfolge, welche aus den intraindustriellen Spillovers resultiert. Formal werden die beiden Funktionen als nicht streng-separabel, multiplikativ zu der folgenden individuellen Übergangsrate verknüpft und um den kumulativen Effekt des technologischen Fortschritts erweitert:

$$(4) \quad q_{i+1 \leftarrow i} = \beta * x_i^2 * e^{-\frac{x_i}{1}}$$

Die Wahrscheinlichkeit $q_{i+1 \leftarrow i}$, von einem Technologieniveau i auf ein höheres Niveau $i+1$ über die Internalisierung brancheninterner Spillovers zu gelangen, zeigt in der Graphik (Abb. 4) folgende Gestalt:

¹⁵ Vgl. COOMBS, R. (1988).

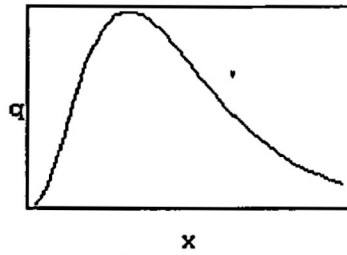


Abb. 4: Intraindustrielle Spillovers

Auf einem sehr niedrigen Technologieniveau sind die Möglichkeiten, welche sich durch Spillovereffekte erschließen lassen noch vergleichsweise unerheblich, da diese Erkenntnisse auch durch eigene F&E-Anstrengungen problemlos entwickelt werden können. In dem Maße wie das Potential der eigenen Trajektorie ausgeschöpft wird, nimmt die Bedeutung der Spillovers zu. Ab einem gewissen Punkt jedoch machen sich die Absorptionsschwierigkeiten aufgrund der Spezifität der in den Spillovers gebundenen Informationen bemerkbar.

2.3 Interindustrielle Spillovers

Die einzelnen Branchen mit ihren technologischen Möglichkeiten existieren allerdings nicht beziehungslos nebeneinander her, sondern es bestehen zahlreiche gegenseitige Beeinflussungen, Nebenwirkungen und Rückkopplungen in Form von interindustriellen Spillovers. "Often an 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."¹⁶ Z.B. können technologische Weiterentwicklungen in einer Branche für eine andere gänzlich neue Verwendungsgebiete erschließen. Das obige Beispiel von Mikroprozessoren wieder aufgreifend, handelt es sich bei einer Umstellung von der elektronischen zur optischen Datenübertragung um die Einbeziehung eines solchen neuen Technologiepfades, um die Grenzen des Wolff'schen Gesetzes weiter hinauszuschieben. Auch zu Beginn der industriellen Revolution konnten zahlreiche Erfindungen, obwohl längst verfügbar, erst kommerziell verwendet werden, nachdem Fortschritte in der Eisen- und Stahlerzeugung eine Massenproduktion möglich machten.

¹⁶ ROSENBERG, N. (1994), S. 77.

Im Gegensatz zu den intensiven technologischen Möglichkeiten innerhalb einer Technologielinie bezeichnet man mit '*extensive technological opportunities*' solche technologischen Möglichkeiten, die sich aus der gegenseitigen 'Befruchtung' (cross-fertilization bzw. hybridization) zunächst vollständig unterschiedlicher Technologielinien ergeben.

Um allerdings Informationen aus interindustriellen Spillovers zu nutzen, also extensive technologische Möglichkeiten zu erschließen, müssen von den betroffenen Unternehmen bereits Erfahrungen auf verwandten Gebieten erworben bzw. eine genügend große absorptive Kapazität entwickelt worden sein.¹⁷ Ohne diese absorptiven Fähigkeiten könnten die in diesem Fall durch unternehmens- und technologiespezifische Eigenschaften gekennzeichneten Informationen überhaupt nicht auf ihre Verwertbarkeit hin überprüft werden¹⁸. Desweiteren werden sich solche interindustriellen Synergieeffekte erst auf vergleichsweise höheren Technologieniveaus herausstellen, d.h. auf einer niedriger anzusetzenden Entwicklungsstufe waren diese Optionen, aufgrund mangelnder Erfahrung und Wissen überhaupt noch nicht absehbar oder, um noch einmal Machlup zu zitieren: "The more there is invented, the easier it becomes to invent still more."¹⁹

Obige Begründung interindustrieller Spillovereffekte gilt analog auch für den Wissenstransfer aus den Universitäten und dem Wissenschaftssektor. Im folgenden werden auch diese Effekte unter dem Stichwort interindustrielle Spillovers geführt.

Die absorptiven Fähigkeiten eines Unternehmens werden analog zu anderem Erfahrungswissen in der Produktion ('learning-by-doing', 'learning-by-using') im Zeitablauf akkumuliert ('learning-by-innovating'), so daß auf unserer Technologieskala bei höheren Technologieniveaus eine höhere Wahrscheinlichkeit, aus den interindustriellen Spillovers neue Opportunitäten zu erschließen, erwartet werden kann. Formal stellt sich die F&E-Erfolgswahrscheinlichkeit $r_{i+1 \leftarrow i}$ aus den interindustriellen externen Effekten, erweitert um den kumulativen Effekt, folgendermaßen dar:

$$(5) \quad r_{i+1 \leftarrow i} = \gamma * x_i / (1 + e^{b(g-x_i)}), \quad \gamma, b, g \geq 0$$

¹⁷ "The ability to calibrate the requirements for change and to effectuate the necessary adjustments would appear to depend on the ability to scan the environment, ...", TEECE, D., PISSANO, G. (1994), S. 545.

¹⁸ Vgl. CANTNER/PYKA (1995)

¹⁹ MACHLUP, F. (1984), S. 175.

Für diese, aus einer sigmoiden Funktion entwickelten Erfolgswahrscheinlichkeit ergibt sich qualitativ der in Abbildung 5 skizzierte Verlauf:

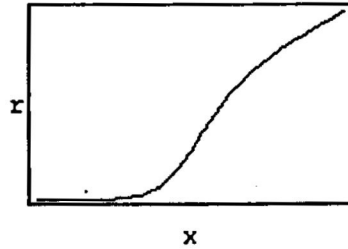


Abb. 5: Interindustrielle Spillovers

Wichtig ist hier die Interpretation des Faktors b , welche den Schwierigkeitsgrad zum Aufbau einer absorptiven Kapazität beschreibt. Je kleiner dieser Faktor gewählt wird, desto frühzeitiger bzw. auf einem relativ niedrigeren Technologieniveau wird bereits die Fähigkeit zum Nutzen der interindustriellen Spillovers erworben. Der Parameter $g \in [0;1]$ kann als Sensitivitätsparameter interpretiert werden, der angibt, ab welchem Technologiezustand eine erhöhte absorptive Fähigkeit für interindustrielle Spillovers entwickelt wird. Je kleiner g , desto stärker können sich interindustrielle Spillovereffekte schon auf niedrigeren Technologieniveaus auswirken. Der Faktor γ dient wieder der Gewichtung der einzelnen Effekte untereinander.

2.4 Wissenschaftlicher Fortschritt und Stand der Technik

Neben den bisher angeführten firmenspezifischen Effekten haben wir bereits eingangs auf zwei Einflußgrößen hingewiesen, denen sich Unternehmen nicht entziehen können. Es handelt sich hierbei um die technologische Veralterung und um die Entwicklung des Stands der Technik. Wenden wir uns zuerst der Veralterung zu.

Von Unternehmen eingesetzte Technologien veraltern hier in dem Sinne, daß ihr relativer technologischer Abstand gegenüber den von der Wissenschaft neu hervorgebrachten technologischen Opportunitäten zunimmt. Die Wissenschaften²⁰, allen voran die Grundlagenforschung, betrieben an Universitäten und anderen Forschungsinstituten leisten entscheidende Beiträge für die technische Entwicklung, "... and provided the basis for the other important forces that offset diminishing returns to technological opportunity..."²¹ Allerdings sind die Zu-

²⁰ "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, A. et. al.(1995), S.189.

²¹ Ebenda.

sammenhänge zwischen der institutionalisierten Grundlagenforschung und der angewandten industriellen Forschung nicht eindeutig, im Sinne der Kausalität, daß neuen Erkenntnissen in den Wissenschaften Fortschritte in der angewandten Forschung folgen²². Wenn es auch dafür zahlreiche Belege gibt, beispielsweise die Forschungsergebnisse der Atomphysiker Bohr, Pauli, Heisenberg und Schrödinger in den 30'er Jahren und darauf aufbauend die Entwicklungen in der Rüstungsindustrie, so lassen sich auch zahlreiche Belege für eine umgekehrte Kausalität finden: Carnot beschäftigte sich mit der Thermodynamik, um die Abläufe in Dampfmaschinen, welche seinerzeit bereits in den Fabriken verwendet wurden, zu verstehen. Diese Wirkungsrichtung von der angewandten zur grundlagenbezogenen Forschung wird von einigen Autoren sogar als die Regel herausgestellt²³. Von einem übergeordneten Standpunkt läßt sich aber dennoch feststellen, daß das Gebiet der Wissenschaften im Zeitablauf große Fortschritte erzielt und dadurch den 'Pool' der potentiellen Technologien und Produkte ständig erweitert. Durch diesen Prozeß werden neue Methoden dem 'Pool' hinzugefügt und veraltete verschwinden. "More generally, the problem-solving power that can be tapped by industrial scientists increases."²⁴ Aus diesen Gründen wollen wir den wissenschaftlichen Fortschritt im weiteren als exogen annehmen.

Für unsere Analyse der evolutorischen Entwicklung von Technologien ist entscheidend, daß den im Zeitablauf sich erschöpfenden technologischen Opportunitäten von Seiten der Wissenschaft kontinuierlich neue Impulse versetzt werden, wodurch den Konsequenzen aus dem Wolff'schen Gesetz immer wieder neue Potentiale gegenübergestellt werden. Vom Standpunkt der Unternehmen stellt sich diese Fortschrittsrate als Ursache der beobachteten Obsoleszenz dar, der man sich nur, zumindest teilweise, durch F&E entziehen kann: "Diejenigen, die darauf zu verzichten können glauben, werden irgendwann zurückbleiben: In der Evolution ist *Stillstand* gleichbedeutend mit *Rückstand*."²⁵ Immer wieder scheiden alte Technologien aus, wobei der industriellen Forschung gleichzeitig neue technologische Opportunitäten angeboten werden. Der hier beschriebene Alterungsprozeß hat zusätzlich zur Folge, daß sich unterschiedliche Technologien einander annähern und in letzter Konsequenz auch unbeschränkt verfügbar werden.

²² ROSENBERG, N. (1984).

²³ Vgl. NELSON, R.R. (1994); "Rosenberg (1982) argued, that the industrial research laboratory made the scientific research agenda more responsive to economic factors and therefore 'endogenized' science to some degree.", MOWERY, D. (1990), S. 348.

²⁴ KLEVORICK, A. et. al. (1995), S. 189.

²⁵ ERDMANN, G. (1993), S. 215.

Dies führt uns direkt zu der Entwicklung des allgemeinen Stands der Technik. Über das gemeinhin steigende Ausbildungsniveau und sonstige hier nicht explizit berücksichtigte Externalitäten kann ein generell verfügbares und von allen ohne direktes eigenes Engagement erreichbares Technologieniveau definiert werden. Dieses Niveau entspricht x_1 , dem linken Rand unserer Skala, und unterliegt ebenfalls einer exogenen Fortschrittsrate.

Aufgrund der Exogenität der beiden angesprochenen Effekte wird von einer konstanten Beeinflussung o ausgegangen. Allerdings wird diese für höhere Technologieniveaus wirksamer werden. Dies liegt an der größeren Wissenschaftsnähe dieser Niveaus und der damit zunehmenden Unsicherheit der Innovationsvorhaben, wodurch die Wahrscheinlichkeit für F&E-Mißerfolge steigt. Auf unser Technologieniveauskala ergibt sich deshalb folgende Obsoleszenzrate $o_{i-1 \leftarrow i}$:

$$(6) \quad o_{i-1 \leftarrow i} = o * x_i, \quad 0 < o < 1;$$

Diese Obsoleszenzrate $o_{i-1 \leftarrow i}$ kann als permanente Verschiebung der Skala nach links interpretiert werden: Während auf dem rechten Rand neue Technologieniveaus erreichbar werden, scheiden am linken Rand des Spektrums kontinuierlich alte Technologien aus, bzw. der 'allgemeine Stand der Technik' steigt. Aufgrund dieser Verschiebung sind die einzelnen Technologieniveaus als relative Größen zu verstehen. Darüberhinaus sorgt die exogene Entwicklung des Stands der Technik dafür, daß die technologisch schlechtesten Unternehmen stets auf ein Niveau angehoben werden, welches ihnen erlaubt, die relativ schlechteste Technologie x_1 anzuwenden.

3. Ein theoretisches Modell der Technologieevolution

In der theoretischen Physik hat sich in den letzten Jahren ein eigenständiger Forschungsschwerpunkt, die Synergetik herausgebildet. Dieser Ansatz beschäftigt sich mit dem Verhalten von Systemen, die sich aus einer Vielzahl von Subsystemen zusammensetzen. Vor allem Untersuchungen zur Entropie in thermodynamischen Prozessen führten zur Entwicklung der Theorie der Selbstorganisation, welche mittlerweile auch in zahlreichen anderen Disziplinen (Chemie, Biologie etc.) ihre Anwendung findet. In jüngerer Zeit werden Methoden der Synergetik auch

immer wieder in der ökonomischen Theorie verwendet und hier nahezu ausschließlich im Teilgebiet der evolutorischen Ökonomik.

Die evolutorische Entwicklung von Technologien, so wie sie sich auf einer makroskopischen Ebene darstellt, ist von den Aktionen und deren Interdependenzen auf der mikroskopischen Ebene abhängig, wobei natürlich auch Rückwirkungen der (Makro-) Technologiestruktur insgesamt auf die individuelle Ebene, zu berücksichtigen sind. Da hier die Entwicklung von einer Vielzahl von unterschiedlichen Akteuren (den Unternehmen auf den verschiedenen Technologieniveaus) determiniert wird, drängt sich eine Beschreibung des Prozesses der Evolution von Technologien mit Hilfe eines synergetischen Verfahrens auf.

3.1 Die Mastergleichung

Das Konzept der Mastergleichung dient der Beschreibung von Systemen, welche sich aus einer Vielzahl von Akteuren zusammensetzen, wobei für die Entwicklungen der einzelnen Subsysteme keine deterministischen Gesetzmäßigkeiten, sondern nur stochastische Verteilungen bekannt sind. Da bei der Technologieevolution inhaltliche Präzisierungen konkreter Entwicklungsrichtungen per se unmöglich sind, aber sehr wohl probabilistische Verhaltensmuster unterstellt werden können, scheint die Mastergleichung zur Beschreibung des dynamischen Systems der Technologieevolution geeignet. Der Formalismus der Mastergleichung dient der Beschreibung der in der Zeit kontinuierlichen Entwicklung eines diskreten Zustandsvektors, welcher in unserer Anwendung durch die Skala der relativen Technologieniveaus festgelegt wird. Sie beschreibt nun die zeitliche Entwicklung der Ausprägungen des Zustandsraums, indem für jeden Zeitpunkt die Wahrscheinlichkeit einen bestimmten Zustand anzutreffen, berechnet wird. In dem vorliegenden Modell entspricht ein Zustand einem relativen Technologieniveau und die Wahrscheinlichkeit dieses Niveau anzutreffen, wird als relativer Technologieanteil desselben interpretiert, mit anderen Worten als relative Anzahl der Unternehmen, welche sich auf diesem Technologieniveau befinden. Formal stellt sich die Technologieskala X wie in Kapitel 2 dar: $X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$, $x_i = i/n$, $i \in \{1, \dots, n\}$, wobei im folgenden $n=100$ unterschiedliche Technologieniveaus betrachtet werden. Der Ausdruck $P(x_i|t)$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, das Niveau x_i zum Zeitpunkt t anzutreffen. Diese Wahrscheinlichkeit, welche aus der Wahrscheinlichkeit der Periode $t-1$ entwickelt wird, setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Der Mastergleichung liegt die Markov-Annahme zugrunde, d.h. es werden nur soge-

nannte Ein-Schritt-Prozesse betrachtet: In jeder Periode hängt die Veränderung der Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Technologieniveaus x_i ($\frac{dP(x_i|t)}{dt}$) nur von den jeweiligen Nachbarn x_{i-1} und x_{i+1} ab, was durchaus einem Aspekt der Technologieentwicklung entspricht.²⁶ Die folgende Abbildung 6 gibt die Veränderung eines Systemzustandes schematisch wieder:

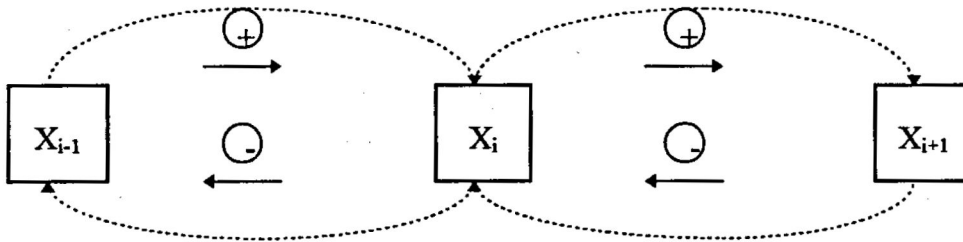


Abb. 6

Einem Teil der Unternehmen, welche in der Periode $t-1$ das Technologieniveau x_{i-1} besetzten, ist es aufgrund ihrer F&E-Anstrengungen und der Nutzung von intra- und interindustriellen Spillovereffekten möglich, in der Periode t das Niveau x_i zu erreichen. Einzelne Unternehmen, welche sich auf dem Niveau x_{i+1} zum Zeitpunkt $t-1$ befanden, unterliegen der technologischen Obsoleszenz und verschlechtern sich auf das Niveau x_i zum Zeitpunkt t . Diese beiden Ströme kommen der Wahrscheinlichkeit des Zustandes x_i in der Periode t zugute. Die Unternehmen, welche zum Zeitpunkt $t-1$ bereits auf dem Niveau x_i waren, betreiben selbst auch F&E bzw. die Spillovereffekte werden auch für sie wirksam. Gleichzeitig unterliegt ein gewisser Anteil von ihnen der technischen Obsoleszenz. Diese beiden Entwicklungen schmälern die Wahrscheinlichkeit, den Zustand x_i anzutreffen, da die betroffenen Unternehmen diesen Zustand verlassen. "Die Mastergleichung stellt eine Art Gewinn-Verlust-Bilanz für die Wahrscheinlichkeit jedes internen Zustandes dar."²⁷

Für unser Modell der Technologieevolution wollen wir die in Kapitel 2 hergeleiteten, individuellen Übergangsraten der Gleichungen (1) für eigene F&E-Anstrengungen, (4) für Effekte aus intraindustriellen Interdependenzen, (5) für interindustrielle Spillovers und (6) für die technische Obsoleszenz heranziehen.

²⁶ "This follows because learning tends to be local. That is, opportunities for learning will be 'close in' to previous activities ...", TEECE, D., PISANO, G. (1994), S. 547.

²⁷ WOECKENER, B. (1993), S. 114.

Da die individuellen Übergangsraten von den Zustandsvariablen X abhängen, handelt es sich bei dem zu entwickelnden Modell um ein sogenanntes nicht-stationäres Markov-Modell, für das die folgenden Aussagen²⁸ gelten:

(i) Für die betrachteten Systeme gilt die sogenannte 'normalization condition', welche folgendes besagt: Gilt in der Startperiode $t=0$ für alle X die Bedingung $\sum_i P(x_i|0) = 1$, dann gilt auch für alle folgenden Perioden $t>0$: $\sum_i P(x_i|t) = 1$, womit die Normierung und Positivität der Wahrscheinlichkeit P_t für alle Zeiten garantiert wäre.

(ii) Für von der Zeit unabhängige Übergangsraten existiert immer zumindest eine stationäre Lösung ($\frac{dP^*(X|t)}{dt} = 0$) der Mastergleichung. Auf einer makroskopischen Ebene ist die Bewegung in einer stationären Lösung zum Stillstand gekommen, es hat sich eine technologische Struktur herauskristallisiert. Dies entspricht allerdings in keinsten Weise einem Stillstand auf der Mikro-Systemebene: Auch in einer stationären Lösung verbessern einige Unternehmen ihr technologisches Niveau, während die Technologien anderer Unternehmen der Obsoleszenz anheimfallen.

(iii) Da es sich bei der, in unserem Modell verwendeten Technologieniveauskala um eine lineare Zustandskette handelt, ist für die stationäre Lösung auch die 'detailed balance'-Bedingung erfüllt. "This means that not only the global balance of all probability fluxes (stationary solution) hold, but that a probability flux balance between each pair of states ... hold separately."²⁹

(iv) Ist die stationäre Lösung einer Mastergleichung eindeutig³⁰, dann geht die zeitabhängige Lösung der Mastergleichung für $t \rightarrow \infty$ für jede beliebige Startverteilung gegen die stationäre Lösung (diese Eigenschaft ist auch unter der Bezeichnung Ergodizität bekannt)³¹.

²⁸ Vgl. HAKEN, H. (1990), S. 108f.

²⁹ HAAG, G. (1989), S.222.

³⁰ Die Lösung der Mastergleichung ist eindeutig, wenn über eine Reihe von Zwischenzuständen, jeder einzelne Zustand von jedem anderen Zustand prinzipiell erreicht werden kann.

³¹ Die Eigenschaft der Ergodizität (bzw. Konvergenz) kann als eine Version des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik, das H-Theorem von Boltzmann, interpretiert werden (vgl. ERDMANN, G. (1993), S. 147).

Die Mastergleichung hat schließlich für unser Modell unter Herannahme der Übergangswahrscheinlichkeiten (1), (4), (5) und (6) folgende Gestalt:

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

bzw. umformuliert

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

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

$$w_{i+1 \leftarrow i} = p_{i+1 \leftarrow i} + q_{i+1 \leftarrow i} + r_{i+1 \leftarrow i}$$

Die rechte Seite der Gleichung (7) beinhaltet alle Veränderungen des Zustandes x_i . Mit positiven Vorzeichen gehen die Veränderungen ein, welche die Wahrscheinlichkeit des Zustandes vergrößern, mit negativen Vorzeichen werden alle Wahrscheinlichkeitsflüsse aus dem Zustand heraus versehen, da sie die respective Wahrscheinlichkeit den Zustand anzutreffen, mindern.

Eine besondere Bedeutung, vor allem für die Computersimulation, haben die Ränder unseres Technologiespektrums, für welche die entsprechenden Gleichungen separat angesetzt werden. Hier ist eine Bewegung nur in eine Richtung möglich (reflektierende Ränder), da die jeweils andere Richtung eine Über- bzw. Unterschreitung des Zustandsraums bedeuten würde. Für das niedrigste Technologieniveau ergibt sich die folgende Bedingung:

$$(9) \quad \frac{dP(x_1|t)}{dt} = o_{1 \leftarrow 2}(x_2)P(x_2|t) - w_{2 \leftarrow 1}(x_1)P(x_1|t)$$

Diese Bedingung kann innerhalb unseres Modellrahmens dahingehend interpretiert werden, daß die schlechtesten Unternehmen stets auf den allgemeinen Stand der Technik x_1 angehoben werden.

Analog beschreibt (10) die Bedingung des rechten Randes x_{100} :

$$(10) \quad \frac{dP(x_{100}|t)}{dt} = -o_{99 \leftarrow 100}(x_{100})P(x_{100}|t) + w_{100 \leftarrow 99}(x_{99})P(x_{99}|t)$$

Die Interpretation hierfür lautet, daß der wissenschaftliche Fortschritt dem industriellen technologischen Fortschritt immer zumindest einen Schritt voraus ist, d.h. daß die Erweiterung der technologischen Möglichkeiten immer durch neue Erkenntnisse aus den Wissenschaften ermöglicht wird. Mit diesen beiden Randgleichungen ist das Modell für die nachfolgenden Simulationen vollkommen spezifiziert.

Für die Lösung von Mastergleichungen werden in der Literatur oft die Mittelwertgleichungen herangezogen³². Die Mittelwertgleichung unseres Modells ergibt sich aus der Mastergleichung (8):

$$(11) \quad \frac{d\bar{x}_i}{dt} = \overline{w_{i \leftarrow i-1}(x_{i-1})} - \overline{w_{i+1 \leftarrow i}(x_i)} + \overline{o_{i \leftarrow i+1}(x_{i+1})} - \overline{o_{i-1 \leftarrow i}(x_i)}$$

Die Mittelwertgleichung hat den Vorteil einer vergleichsweise einfacheren Lösbarkeit und approximiert für unimodale Lösungen der Technologiestruktur den Verlauf der stochastischen Trajektorie exakt. Kommt es dagegen zu einem Phasenübergang in dem Sinne, daß unsere Technologiestruktur bifurkiert, also zu einer bimodalen Verteilung wird, kann durch die Mittelwertgleichung unter Umständen die unwahrscheinlichste Systementwicklung beschrieben werden³³. Aus diesem Grund wird bei der folgenden Analyse unseres Modells das Verhalten mit Hilfe einer numerischen Simulation untersucht.

³² Vgl. WEIDLICH, W., BRAUN, M. (1992), S. 239 f.

³³ Vgl. ERDMANN, G. (1993), S. 150 f.

3.2 Die Simulation des Modells

Nachdem aus den einzelnen Aspekten des F&E-Prozesses in Kapitel 2 die individuellen Übergangsraten entwickelt worden sind und daraus im vorhergehenden Abschnitt die Mastergleichung abgeleitet wurde, kann jetzt das resultierende Modell simuliert werden. Vor der eigentlichen Simulation sind zunächst noch die verwendeten Parameter genauer zu spezifizieren, und vor allem die einzelnen Aspekte untereinander in ihrer Bedeutung für den F&E-Prozeß zu gewichten.

Die F&E-Erfolgswahrscheinlichkeit setzt sich, wie wir gesehen haben, aus vier zentralen Elementen zusammen. Für das Vorankommen eines Unternehmens im Innovationsprozeß sind sicherlich seine eigenen F&E-Anstrengungen von herausragender Bedeutung. Die aus den F&E-Anstrengungen resultierende Übergangsrate wird durch die Gleichung (1) bestimmt. Der Gewichtungsfaktor α wird in den folgenden Berechnungen, aufgrund der Bedeutung der direkten Forschungsanstrengungen, vergleichsweise groß mit 0.7 angesetzt (was 70% am Gesamteffekt entspricht). Die Krümmung der Funktion d , durch die sich die abnehmenden technologischen Möglichkeiten ausdrücken, wird mit 3.5 bestimmt.

Der zweite Bestimmungsfaktor, die intraindustriellen Spillovers (4), werden dagegen einen geringeren Einfluß auf die F&E-Erfolgswahrscheinlichkeit nehmen. Ihre Bedeutung liegt in der gesteigerten Wahrscheinlichkeit, intensive technologische Opportunitäten des eigenen Forschungspfad zu erschließen, was sich letztendlich in einer Intensivierung und Beschleunigung des direkten Forschungsprozesses niederschlagen wird. Der Parameter β steht für die Krümmung der Funktion und wird mit 0.15 festgelegt. Dies entspricht der maximalen Wirksamkeit der intraindustriellen Spillovers auf der ersten Hälfte des Technologiespektrums, da wie wir gezeigt haben, durch Verfügbarkeit und Nützlichkeit vor allem hier die Auswirkungen der intraindustriellen Spillovereffekte zum Tragen kommen. Der Gewichtungsfaktor β beträgt 0.15.

Für die interindustriellen Spillovers gilt (5). Sie sind vor allem in der zweiten Hälfte des Technologiespektrums ($g=0.5$) relevant und ermöglichen dort den betroffenen Unternehmen, extensive technologische Möglichkeiten zu erschließen: Um die Wirkungen der interindustriellen Spillovers für sich auszunutzen, müssen eben absorptive Fähigkeiten entwickelt worden sein,

welche die Umsetzung des spezifischen Wissens erst ermöglichen. Der Parameter b wird im folgenden auf 15 gesetzt, was eine vergleichsweise einfache Aneignung von Know-how impliziert; bereits nach dem ersten Viertel der Technologieskala sind schon Erfolge über Erschließung interindustrieller Spillovers möglich. Der Gewichtungsfaktor γ wird mit 0.15 festgelegt.

Zuletzt ist noch die Obsoleszenzrate (6) $o_{i-1 \leftarrow i}$ zu bestimmen. Aufgrund der durchaus spürbaren Beeinflussung der Technologieevolution durch die Wissenschaften wird sie relativ hoch ($o=1/3$) gesetzt. Nach durchschnittlich jeder dritten Periode wird also ein neues Niveau am rechten Rand potentiell erreichbar.

Schließlich wird noch ein Intensitätsparameter $h=1.625$ eingeführt. Nachdem nun alle Parameter spezifiziert worden sind, können wir die deterministische Makrogleichung des Modells (Mittelwertgleichung) in einer groben Näherung³⁴ (die Übergangsraten sind zum Teil nicht-linear) als Phasendiagramm für verschiedene Fälle (Abb. 7) abtragen.

$$(12) \quad \frac{dx}{dt} = x_i \left\{ \left[h * \left(\alpha * e^{-d * x_i} + \beta * x_i * e^{\frac{-x_i}{1}} + \gamma / [1 + e^{b * (g - x_i)}] \right) \right] - o \right\}$$

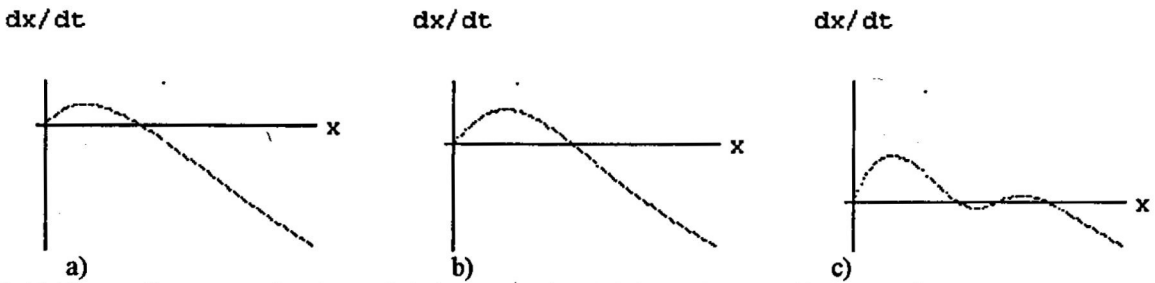


Abb. 7: Phasendiagramme der deterministischen Makrogleichung für verschiedene Fälle

In der Abbildung 7a) findet sich das Diagramm für reine F&E-Prozesse. In diesem Fall wurden die Parameter β und γ beide auf Null gesetzt und somit Effekte aus intra- und interindustriellen Spillovers ausgeschlossen. Im Falle der Abbildung 7b) werden intraindustrielle Spillovers zugelassen ($\beta=0.15$) und wie man sieht ändert sich am grundsätzlichen Verlauf der Kurve nichts wesentliches. Allerdings liegt der Peak der Kurve b) höher und der Schnittpunkt mit der Null-Achse liegt ebenfalls etwas weiter rechts. Aus diesen beiden Abbildungen kann für die Gleichgewichtstrajektorie für den Fall mit intraindustriellen Spillovers ein höherer Wert prognostiziert werden. Betrachtet man schließlich noch die Abb. 7c), bei der sowohl intra- als auch interindustrielle Spillovers zugelassen sind ($\beta=0.15$, $\gamma=0.15$), sieht man im Vergleich zu den beiden

³⁴ Vgl. z. B. WOECKENER, B. (1992).

anderen Abbildungen einen qualitativ veränderten Verlauf. Die Null-Achse wird hier dreimal geschnitten und die Kurve besitzt zwei lokale Maxima. Für diesen Fall kann man bezüglich des gesamten Systemverhaltens, welches die Mastergleichung berechnet, ein von den ersten beiden Fällen sich deutlich unterscheidendes Ergebnis erwarten.

Aus diesem Grund (eingeschränkte Verwendbarkeit der Mittelwertgleichungen bei nicht-unimodalen Verteilungen) ist die zeitliche Entwicklung des Gesamtsystems, so wie es die Mastergleichung beschreibt, von besonderem Interesse. Als erster Fall wird wieder die Variante ohne jegliche Spillovereffekte simuliert³⁵, also ausschließlich die Auswirkungen der direkten F&E-Anstrengungen untersucht. Letztendlich handelt es sich hier um den Fall vollkommen gesicherter intellektueller Eigentumsrechte an Know-how. Außerdem werden Offenlegungen der Forschungsergebnisse aus strategischer Motivation ebenfalls nicht zugelassen. Die entsprechenden Simulationsläufe setzen sich immer aus zehntausend Iterationen zusammen, um den stationären Lösungen der Mastergleichung recht nahe zu kommen. Ebenfalls starten in allen folgenden Simulationsläufen sämtliche Unternehmen auf dem untersten Technologieniveau x_1 ('allgemeiner Stand der Technik'), es gilt also $P(x_1 | 0) = 1$. Die folgende Abbildung 8 zeigt die zeitliche Entwicklung (t) der einzelnen Technologieniveaus (X) ausgedrückt durch deren Wahrscheinlichkeit (P) unter der Voraussetzung vollkommen gesicherter intellektueller Eigentumsrechte ($\beta=0, \gamma=0$).

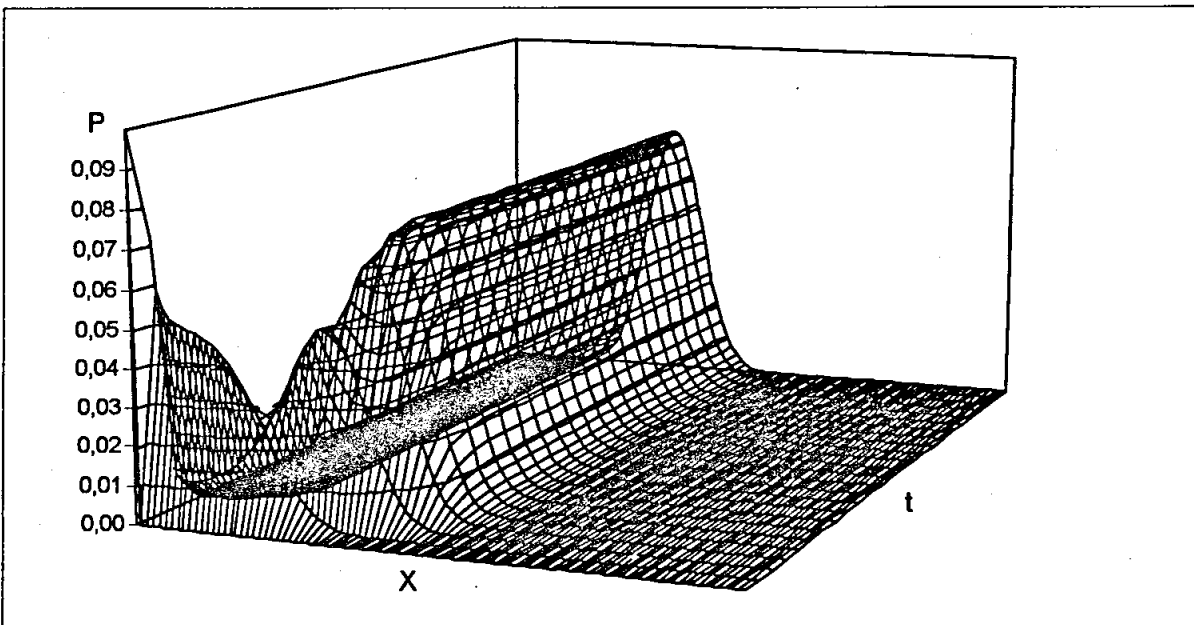


Abb. 8: Die Technologieentwicklung ohne Spillovereffekte ($\beta=0, \gamma=0$)

³⁵ Der Mastergleichungs-Algorithmus wurde in C++ Version 3.0 von Borland International Inc. programmiert.

Ein Großteil der Unternehmen kann sich aufgrund ihrer eigenen F&E-Anstrengungen verbessern und erreicht zügig ein höheres Technologieniveau. Bereits nach 500 Iterationen reicht das Spektrum der besetzten Technologieniveaus über das erste Viertel der relativen Technologiskala hinaus. Diese Entwicklung, ist besonders gut den in der Abbildung 9 gezeigten Phasenportraits ausgewählter Perioden zu entnehmen. Der Anteil der Unternehmen auf den niedrigsten Technologieniveaus nimmt bis zur 700. Periode und nochmal bis zur 1000. Periode deutlich ab, wobei sich bereits eine gewisse Struktur herauszukristallisieren beginnt. Die technologische Evolution führt hier zu einer Verteilung unterschiedlicher technologischer Niveaus mit einem Maximum der Wahrscheinlichkeit, respektive des Technologieanteils, unmittelbar nach dem ersten Viertel der möglichen Zustände.

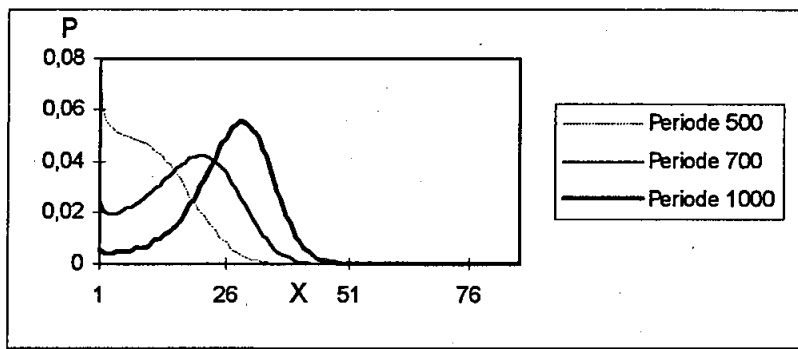


Abb. 9: Phasenportraits zu Beginn der Technologieevolution

Verfolgt man diese Entwicklung weiter, nähert man sich schnell einer stationären Lösung der Mastergleichung an. Die Bewegungen auf der Makroebene kommen nahezu zum Erliegen, an der gefundenen Struktur ändert sich nichts mehr. Vergleicht man in Abbildung 10 die Phasenportraits der 2000. und der 3000. Iteration, so ist praktisch Deckungsgleichheit festzustellen.

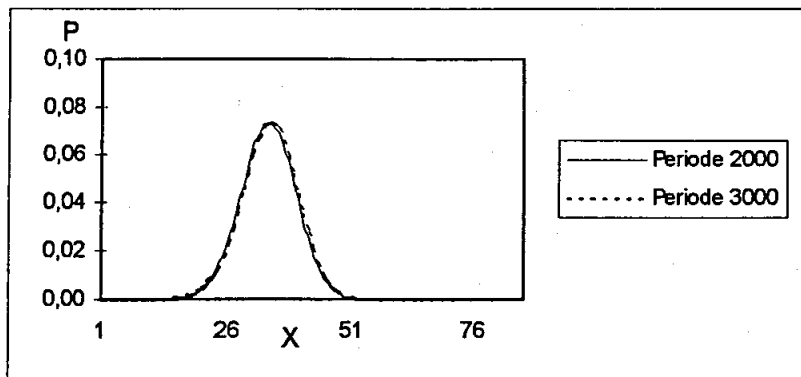


Abb. 10: Die stationäre Lösung ohne Spillovers

Eine stabile Verteilung der unterschiedlichen Technologieniveaus um das einzige Maximum ca. bei x_{34} ist die stationäre Lösung der technologischen Evolution unter Ausschluß von Spillovereffekten. Einigen Unternehmen gelingt es in diesem System dennoch, vergleichsweise hö-

here technologische Niveaus zu erreichen, was aus den positiven Wahrscheinlichkeiten bis ca. zum Niveau x_{50} geschlossen werden kann.

Wie verändert sich nun die technologische Struktur, wenn man nicht einen Innovationsprozeß ohne gegenseitige Interdependenzen der beteiligten Akteure unterstellt und den Implikationen aus den Öffentlichen-Gut-Eigenschaften technischen Know-Hows Rechnung trägt? Wir betrachten zunächst die Situation mit intraindustriellen Spillovereffekten ($\beta=0.15$), die gegenseitige Befruchtung unterschiedlicher Branchen (interindustrielle Spillovers) wird weiterhin ausgeschlossen ($\gamma=0$). Betrachtet man wieder die zeitliche Entwicklung der technologischen Struktur, kann man der Abbildung 11 einen Verlauf entnehmen, welcher sich qualitativ kaum von der vorhergehenden Situation unterscheidet.

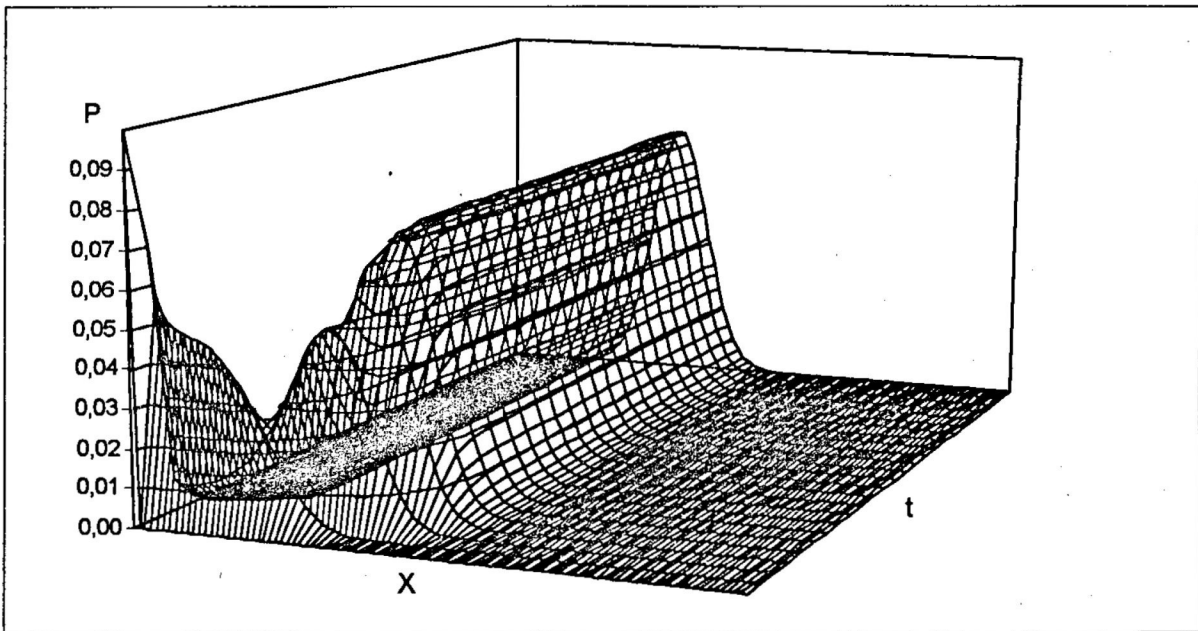


Abb. 11: Die Technologieentwicklung unter Berücksichtigung intraindustrieller Spillovers ($\beta=0.15$ $\gamma=0$)

Die von intraindustriellen Spillovers ausgehenden Beeinflussungen wurden bereits eingangs in ihren Auswirkungen als weniger bedeutsam eingestuft. Dennoch beschleunigt sich durch die Inanspruchnahme dieser externen Effekte das Innovationstempo. Vergleicht man in den Abbildungen 12a) und b) die Phasenportraits der Situation ohne Spillovers mit der Situation mit intraindustriellen Spillovers, so sieht man bereits nach 500 Perioden, daß es einzelnen Unternehmen gelungen ist, relativ höhere technologische Niveaus zu besetzen.

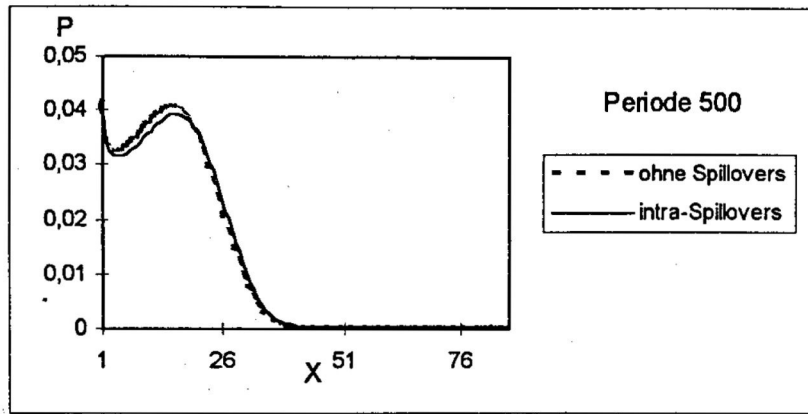


Abb. 12a

Noch ausgeprägter ist die Situation nach 1000 Iterationen. Hier kann man bereits deutlich erkennen, daß sich durch die Berücksichtigung technologischer externer Effekte auf Branchenebene ein durchschnittlich höheres Technologieniveau eingestellt hat. Für den weiteren

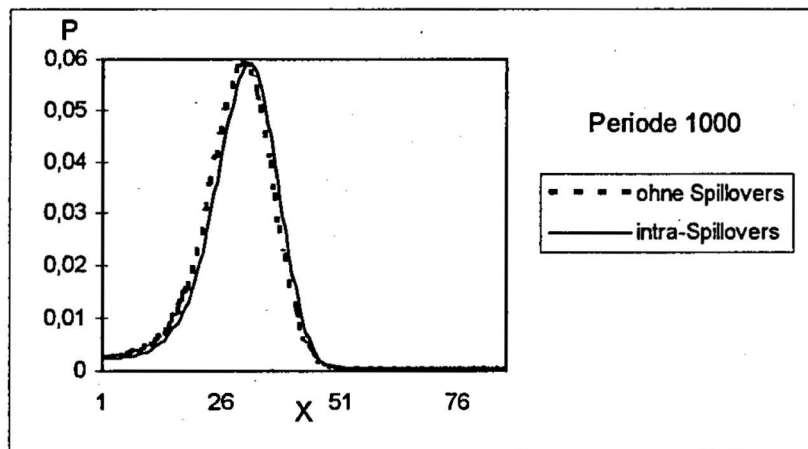


Abb. 12b

Entwicklungsweg bleibt dieses Ergebnis erhalten. Ähnlich wie im Fall ohne Spillovers wird frühzeitig die stationäre Lösung erreicht, wenn auch mit einem höheren durchschnittlichen Technologieniveau um ca. x_{36} und von Null verschiedenen Wahrscheinlichkeiten bis zum Niveau x_{55} . Bezüglich der Rolle von intraindustriellen Spillovers in der Evolution von Technologien bestätigen sich unsere zu Beginn angestellten Vermutungen. Sie stellen keine Struktur beeinflussende Determinante im Innovationsprozeß dar, dennoch wird durch sie der Fortschrittsprozeß in einer Branche entlang einer spezifischen F&E-Trajektorie positiv berührt. "The logic of such feedbacks 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."³⁶

Von den mit interindustriellen Spillovers verbundenen Auswirkungen auf die Erschließung extensiver technologischer Opportunitäten im Innovationsprozeß dürften hingegen auch qualitativ Veränderungen in der Entwicklung der Technologiestruktur zu beobachten sein. Interindustrielle Spillovers können den betroffenen Unternehmen in Situationen, wo weitere Forschungsanstrengungen auf dem ursprünglichen Technologiepfad aufgrund der Beschränkungen des Wolff'schen Gesetzes immer schwieriger werden, grundsätzlich neue Pfade, mit noch unausgeschöpften technologischen Möglichkeiten, erschließen. Im folgenden Simulationslauf werden daher neben den bereits untersuchten branchenmäßigen Interdependenzen ($\beta=0.15$), zusätzlich interindustrielle Spillovers zugelassen ($\gamma=0.15$). Die Abbildung 13 zeigt die von den vorhergehenden Situationen sich deutlich unterscheidende dynamische Entwicklung der Technologiestruktur.

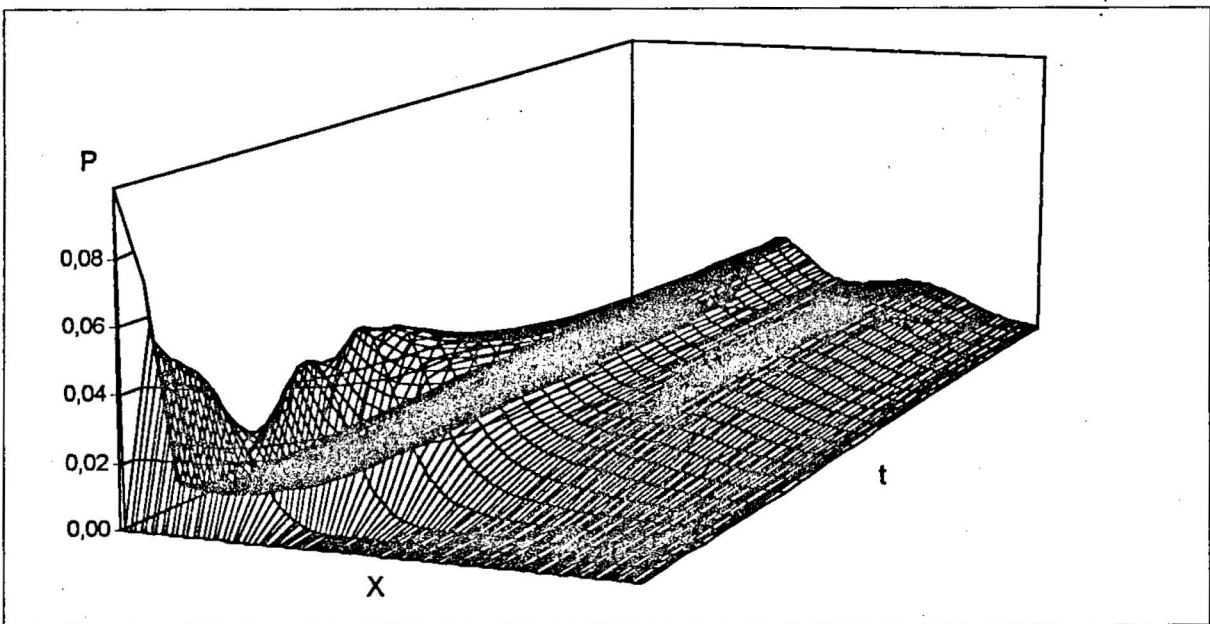


Abb.13: Die Technologieentwicklung unter Berücksichtigung von intra- u. interindustriellen Spillovers ($\beta=0.15$, $\gamma=0.15$)

Anfänglich zeigen die Phasenportraits der Abbildung 14 einen mit den vorhergehenden Situationen vergleichbaren Verlauf. Da zunächst alle Unternehmen vom gleichen Technologieniveau x_1 starten ($P(x_1|0)=1$), verfügen sie noch nicht über die absorptiven Fähigkeiten, interindustrielle Spillovers umzusetzen. Dies ändert sich aber bereits nach der 1000. Iteration schlagartig. Hier sind Technologieniveaus bis x_{65} besetzt. Auf diesen höheren Niveaus ist bereits ab-

sorptive Kapazität entwickelt worden, d.h. die betroffenen Unternehmen können die in den Spillovers gebundenen Informationen nutzen und sich extensive technologische Möglichkeiten erschließen.

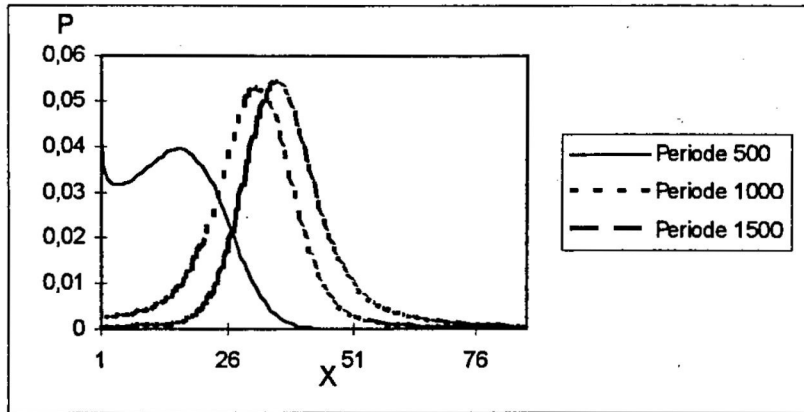


Abb. 14: Phasenportraits zu Beginn der technologischen Entwicklung

Diese Entwicklung setzt sich im weiteren Verlauf (vgl. Abb. 15) fort, was zunächst auch noch keine stationäre Lösung zulässt. Ein immer größer werdender Anteil der Unternehmen ist auf diese Weise in der Lage, höhere technologische Niveaus zu besetzen und es zeigt sich, daß die technologische Struktur sich auf zwei lokale Maxima hin entwickelt. Ein nicht zu vernachlässigender Anteil der Unternehmen befindet sich jetzt auf Technologieniveaus des vordersten Drittels der Skala, während der Rest weiterhin auf der ersten Hälfte angesiedelt ist.

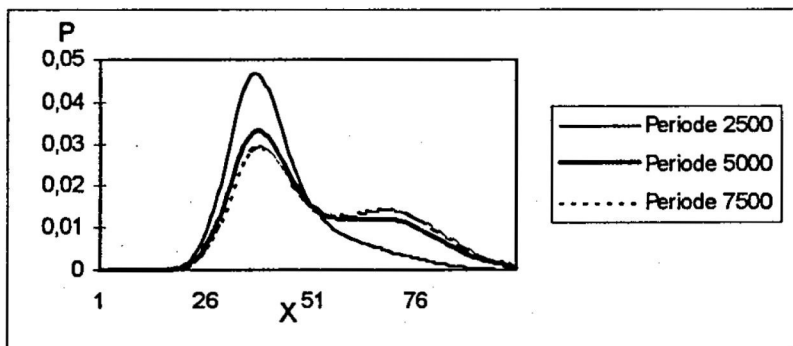


Abb. 15: Phasenportraits im fortgeschrittenem Verlauf der Technologieevolution

Unter Einbezug der interindustriellen Spillovers liefert die Mastergleichung also eine zusätzlich heterogene Technologiestruktur, wobei sich durch die Bifurkation des Systems, sowohl für den niedrigeren Teil der Skala, als auch für den höheren Teil jeweils ein Maximum herausbildet. "... 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 ..."³⁷ Eine stationäre Lösung, also Stillstand auf der Makroebene, erreicht dieses System weitaus später. Erst nach ca. der 7000. Iteration kommen die strukturellen Veränderungen langsam zum Erliegen. Letztendlich bedeutet dies, daß unser System der Technologieevolution durch die Einbeziehung der interindustriellen Spillovers entscheidend an Dynamik gewonnen hat.

Für derartige Bifurkationen zeigen sich vorallem die Parameter b , g und d verantwortlich. Unter ceteris-paribus Bedingungen lassen sich für die einzelnen Parameter Intervalle angeben, innerhalb derer eine sektorale Aufspaltung auftritt: $b > 12$, $3.35 < d < 3.65$, $0.48 < g < 0.53$. Bemerkenswert ist Parameter b der angibt, inwieweit die absorptiven Fähigkeiten ausreichen, um interindustrielle Spillovers umzusetzen.

Die präsentierten Ergebnisse der Simulationsanalyse zeigen, welche Rolle das Zusammenspiel von F&E-Anstrengungen, intra-, interindustriellen Spillovers und technologischer Obsoleszenz im Innovationsprozeß einnimmt. Für das Entstehen heterogener Technologiestrukturen bzw. der Co-Existenz unterschiedlichster technologischer Niveaus zeichnen sich überwiegend die Interdependenzen, welche sich aus intra- und vor allem interindustriellen technologischen Spillovers ergeben, verantwortlich. Eine einzige 'beste' Technologie, so wie sie sich nach der neoklassischen Theorie durchsetzen müßte, kann aus den Simulationsergebnissen allerdings nicht abgeleitet werden. Vielmehr scheint eine heterogene Technologielandschaft sowohl Voraussetzung, als auch notwendige Konsequenz der Evolution von Technologien zu sein.

4. **Schlußfolgerungen**

Ziel dieses Beitrages ist die Erfassung der verschiedenen Determinanten der Technologieevolution und ihres Zusammenspiels. Dazu wurde zunächst auf jeden der Einflußfaktoren aus einer mikrotechnologischen Perspektive detailliert eingegangen. Neben den direkten kumulativen unternehmerischen F&E-Anstrengungen wurden drei weitere wichtige Quellen berücksichtigt, welche dem Wolffsehen Gesetz der technischen Entwicklung entgegenwirken. Erstens erweitern wissenschaftliche Erkenntnisse den 'Pool' der technologischen Möglichkeiten, zweitens können die technologischen Möglichkeiten einer Industrie durch Fortschritte in anderen, sowohl vertikal als auch horizontal verschiedenen Industrien, bereichert werden. Schließlich gibt

³⁷

SAHAL, D. (1985), S. 79.

es noch positive Rückkopplungen innerhalb einer Branche, durch welche sich in zukünftigen Perioden F&E-Erfolge leichter realisieren lassen.

Die Evolution von Technologien übt zum einen einen negativen Selektionsdruck aus, dem die vergleichsweise niedrigeren technologischen Niveaus, respektive die Unternehmen auf diesen Niveaus zum Opfer fallen. Gleichzeitig übt sie durch die Entstehung neuer Opportunitäten eine positive Selektion auf höheren Technologieniveaus aus. Die Ausnützung der extensiven technologischen Möglichkeiten stellt an die betroffenen Unternehmen bestimmte Voraussetzungen: Ohne entsprechende absorptiven Fähigkeiten können sie nicht genutzt werden.

Das zur Modellierung verwendete Verfahren, die Mastergleichung, erweist sich dabei als besonders geeignet, da es die qualitative Änderung des Innovationsprozesses unter Berücksichtigung von technologischen Spillovers nachzuzeichnen in der Lage ist. Dabei wird die Makrostruktur durch die Evolution auf der Mikroebene sowie Rückkopplungseffekte determiniert. Unter bestimmten Voraussetzungen ist die Technologieevolution durch Phasenübergänge gekennzeichnet, wodurch sich eine zusätzlich heterogene Technologielandschaft auf der Makroebene etablieren kann. Für die neoklassische Theorie ist das Auftreten einer langfristigen heterogenen Technologiestruktur ein transitorisches bzw. allenfalls durch Marktversagen zu erklärendes Phänomen. Der von uns verfolgte evolutorische Ansatz weist dagegen den Vorteil auf, solche in der ökonomischen Realität durchaus die Regel darstellende Phänomene beschreiben und die dafür verantwortlichen Ursachen identifizieren zu können. Die Möglichkeit Phasenübergänge abzubilden, ist zur Beschreibung der Technologieevolution von herausragender Bedeutung, da ein konstituierendes Merkmal von Innovationen eben Neuigkeit, im Sinne einer nicht-antizipierbaren Entwicklung ist. Sie stellen daher eine in die Zukunft offene Entwicklung, gekennzeichnet durch das Zusammenwirken von 'Zufall und Notwendigkeit' dar.

Das vorgestellte Modell soll als Ausgangspunkt weiterer Forschungsarbeiten herangezogen werden. So ist zum einen daran zu denken, die interindustriellen Spillovereffekte zu endogenisieren und damit ein Netzwerk von sektoralen Verflechtungen abzubilden. Zum anderen ist an eine technologiepolitische Diskussion und Analyse zu denken, die durch eine Sensitivitätsanalyse der Modellparameter gestützt würde. Schließlich kann durch die Mastergleichung auch die Entwicklung eines zweidimensionalen Zustandsraums beschrieben werden, wobei in der zweiten Dimension einfache Marktbeziehungen (Substitution zwischen Qualität und Preisen) mit in das Modell aufgenommen werden könnten.

LITERATURVERZEICHNIS

- AYRES, R.U. (1988), Barriers and Breakthroughs: An "Expanding Frontiers" Model of the Technology-Industry Life-Cycle, *Technovation* 7, 1988, pp. 87-115.
- BERNARD, J. CANTNER, U., WESTERMANN, G. (1996), Technological Leadership and Variety: A Data Envelopment Analysis for the French Machinery Industry, forthcoming in: Special Issue of the *Annals of Operations Research* 1996.
- CANTNER, U., HANUSCH, H., WESTERMANN, G. (1996), Detecting Technological Performance and Variety - An Empirical Approach, forthcoming in: HELMSTÄDTER, E., PERLMAN, M. (eds.), *Proceedings of the Schumpeter Society* 1994.
- CANTNER, U., PYKA, A. (1995), Absorptive Fähigkeiten und technologische Spillovers, *Institut für Volkswirtschaftslehre der Universität Augsburg, Volkswirtschaftliche Diskussionsreihe*, # 133, 1995.
- CARLSSON, B. (1994), Technological Systems and Economic Performance, in: DODGSON, M. (ed.), *The Handbook of Industrial Innovation*, 1994.
- COOMBS, R. (1988), Technological Opportunities and Industrial Organization, in: DOSI, G. et al. (eds.) (1988).
- DAVID, P.A., FORAY, D. (1995), Marshallian Externalities and the Emergence and spatial stability of Technological Enclaves, Paper presented at the Conference of the 'Economics of Localized Technological Change', Turin, 10.-11. Juni, 1995.
- DOSI, G. (1982), Technological Paradigms and Technological Trajectories: A suggested Interpretation of the Determinants and Directions of Technical Change, *Research Policy*, Vol. 11, pp. 147-162.
- DOSI, G. et al. (eds.) (1988), *Technical Change and Economic Theory*, Pinter Publishers, London, New York, 1988.
- EHRENREICH, H. (1995), Strategic Curiosity: Semiconductor Physics in the 1950s, *Physics Today*, January 1995, pp. 28-34.
- ERDMANN, G. (1993), *Elemente einer evolutiven Innovationstheorie*, Mohr, Tübingen 1993.
- HAAG, G. (1989), *Dynamic Decision Theory: Applications to Urban and Regional Topics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Netherlands, 1989.
- HAAG, G., WEIDLICH, W., (eds.) (1988), *Interregional Migration, Dynamic Theory and Comparative Analysis*, Springer Berlin et al. (1988).
- HAKEN, H. (1990), *Synergetik: eine Einführung: Nichtgleichgewichtige Phasenübergänge und Selbstorganisation in Physik, Chemie und Biologie*, Springer Berlin, 1990.
- KAUFMANN, S.A. (1988), The Evolution of Economic Webs, in: ANDERSON, P.W. et al. (eds.), *The Economy as an Evolving Complex System*, Redwood City, Addison Wesley, 1988.
- KLEVORICK, A. et al. (1995), On the Sources and Significance of Interindustry Differences in Technological Opportunities, *Research Policy*, Vol. 24, pp. 185-205.
- MACHLUP, F. (1984), *The Economics of Information and Human Capital*, Princeton University Press.
- MONTANO, M.A.J., EBELING, W. (1980), A Stochastic Evolutionary Model of Technological Change, *Collective Phenomena*, Vol. 3, 1980, pp. 107-114.
- MOWERY, D.C. (1990), The Economic History of Industrial Research in US Manufacturing, *AEA Papers and Proceedings*, May 1990, pp. 345-349.
- NELSON, R.R. (1988), Institutions Supporting Technical Change in the United States, in: DOSI, G. et al. (eds.), a.a.O., pp. 312-329.
- NELSON, R.R. (1990), Capitalism as an Engine of Progress, *Research Policy*, Vol. 19, pp. 193-214.

- NELSON, R.R.** (1994), The Co-Evolution of Technology, Industrial Structure and Supporting Institutions, *Industrial Structure and Corporate Change*, Vol. 3, pp. 47-63.
- ROSENBERG, N.** (1984), *Inside the Black-Box*, Cambridge, Cambridge University Press, 1984.
- ROSENBERG, N.** (1994), *Exploring the Black-Box: Technology, Economics and History*, Cambridge University Press, 1994.
- SAHAL, D.** (1985), Technological Guideposts and Innovation Avenues, *Research Policy*, Vol. 14, pp. 61-82.
- TEECE, D., PISANO, G.** (1994), The Dynamic Capabilities of Firms: An Introduction, *Industrial and Corporate Change*, Vol. 3, 1994, pp. 537-556.
- UTTERBACK, X, ABERNATHY, W.** (1975), A Dynamic Model of Process and Product Innovation, *Omega*, Vol. 33, pp. 639-656.
- WEIDLICH, W., BRAUN, M.** (1992), The Master Equation Approach to Nonlinear Economics, *Journal of Evolutionary Economics* 1992 (2), pp. 233-265.
- WOECKENER, B.** (1992), Zur Relevanz der Mastergleichung für die Modellierung ökonomischer Prozesse, *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik*, Vol. 210.
- WOECKENER, B.** (1993), Konkurrierende Innovationen, Netzwerk-Externalitäten und Standardisierung durch den Markt, in: **WAGNER, A.** (ed.), *Dezentrale Entscheidungsfindung bei externen Effekten*, Tübingen 1993.
-

Beiträge in der Volkswirtschaftlichen Diskussionsreihe seit 1991

Im Jahr 1993 erschienen:

Beitrag Nr. 83:	Manfred Stadler	Innovation, Growth, and Unemployment. A Dynamic Model of Creative Destruction
Beitrag Nr. 84:	Alfred Greiner Horst Hanusch	Cyclic Product Innovation or: A Simple Model of the Product Life Cycle
Beitrag Nr. 85:	Peter Welzel	Zur zeitlichen Kausalität von öffentlichen Einnahmen und Ausgaben. Empirische Ergebnisse für Bund, Länder und Gemeinden in der Bundesrepublik Deutschland
Beitrag Nr. 86:	Gebhard Flaig Manfred Stadler	Dynamische Spillovers und Heterogenität im Innovationsprozeß. Eine mikroökonomische Analyse
Beitrag Nr. 87:	Manfred Stadler	Die Modellierung des Innovationsprozesses. Ein integrativer Mikro-Makro-Ansatz
Beitrag Nr. 88:	Christian Boucke Uwe Cantner Horst Hanusch	Networks as a Technology Policy Device - The Case of the "Wissenschaftsstadt Ulm"
Beitrag Nr. 89:	Alfred Greiner Friedrich Kugler	A Note on Competition Among Techniques in the Presence of Increasing Returns to Scale
Beitrag Nr. 90:	Fritz Rahmeyer	Konzepte privater und staatlicher Innovationsförderung
Beitrag Nr. 91:	Peter Welzel	Causality and Sustainability of Federal Fiscal Policy in the United States
Beitrag Nr. 92:	Friedrich Kugler Horst Hanusch	Stock Market Dynamics: A Psycho-Economic Approach to Speculative Bubbles
Beitrag Nr. 93:	Günter Lang	Neuordnung der energierechtlichen Rahmenbedingungen und Kommunalisierung der Elektrizitätsversorgung
Beitrag Nr. 94:	Alfred Greiner	A Note on the Boundedness of the Variables in Two Sector Models of Optimal Economic Growth with Learning by Doing
Beitrag Nr. 95:	Karl Morasch	Mehr Wettbewerb durch strategische Allianzen?
Beitrag Nr. 96:	Thomas Kuhn	Finanzausgleich im vereinten Deutschland: Desintegration durch regressive Effekte
Beitrag Nr. 97:	Thomas Kuhn	Zentralität und Effizienz der regionalen Güterallokation
Beitrag Nr. 98:	Wolfgang Becker	Universitärer Wissenstransfer und seine Bedeutung als regionaler Wirtschafts- bzw. Standortfaktor am Beispiel der Universität Augsburg
Beitrag Nr. 99:	Ekkehard von Knorring	Das Umweltproblem als externer Effekt? Kritische Fragen zu einem Paradigma -
Beitrag Nr. 100:	Ekkehard von Knorring	Systemanalytischer Traktat zur Umweltproblematik

Beitrag Nr. 101:	Gebhard Flaig Manfred Stadler	On the Dynamics of Product and Process Innovations A Bivariate Random Effects Probit Model
Beitrag Nr. 102:	Gebhard Flaig Horst Rottmann	Dynamische Interaktionen zwischen Innovationsplanung und -realisation
Beitrag Nr. 103:	Thomas Kuhn Andrea Maurer	Ökonomische Theorie der Zeit
Beitrag Nr. 104:	Alfred Greiner Horst Hanusch	Schumpeter's Circular Flow, Learning by Doing and Cyclical Growth
Beitrag Nr. 105:	Uwe Cantner Thomas Kuhn	A Note on Technical Progress in Regulated Firms
Beitrag Nr. 106:	Jean Bernard Uwe Cantner Georg Westermann	Technological Leadership and Variety A Data Envelopment Analysis for the French Machinery Industry
Beitrag Nr. 107:	Horst Hanusch Marcus Ruf	Technologische Förderung durch Staatsaufträge Das Beispiel Informationstechnik

Im Jahr 1994 erschienen:

Beitrag Nr. 108:	Manfred Stadler	Geographical Spillovers and Regional Quality Ladders
Beitrag Nr. 109:	Günter Lang Peter Welzel	Skalenerträge und Verbundvorteile im Bankensektor. Empirische Bestimmung für die bayerischen Genossen- schaftsbanken
Beitrag Nr. 110:	Peter Welzel	Strategic Trade Policy with Internationally Owned Firms
Beitrag Nr. 111:	Wolfgang Becker	Lebensstilbezogene Wohnungspolitik - Milieuschutz- satzungen zur Sicherung preiswerten Wohnraumes
Beitrag Nr. 112:	Alfred Greiner Horst Hanusch	Endogenous Growth Cycles - Arrow's Learning by Doing
Beitrag Nr. 113:	Hans Jürgen Ramser Manfred Stadler	Kreditmärkte und Innovationsaktivität
Beitrag Nr. 114:	Uwe Cantner Horst Hanusch Georg Westermann	Die DEA-Effizienz öffentlicher Stromversorger Ein Beitrag zur Deregulierungsdiskussion
Beitrag Nr. 115:	Uwe Canter Thomas Kuhn	Optimal Regulation of Technical Progress In Natural Monopolies with Incomplete Information
Beitrag Nr. 116:	Horst Rottman	Neo-Schumpeter-Hypothesen und Spillovers im Innovationsprozeß - Eine empirische Untersuchung
Beitrag Nr. 117:	Günter Lang Peter Welzel	Efficiency and Technical Progress in Banking. Empirical Results for a Panel of German Co-operative Banks
Beitrag Nr. 118:	Günter Lang Peter Welzel	Strukturschwäche oder X-Ineffizienz? Cost-Frontier- Analyse der bayerischen Genossenschaftsbanken
Beitrag Nr. 119:	Friedrich Kugler Horst Hanusch	Preisbildung und interaktive Erwartungsaggregation
Beitrag Nr. 120:	Uwe Cantner Horst Hanusch Georg Westermann	Detecting Technological Performances and Variety An Empirical Approach to Technological Efficiency and Dynamics

Beitrag Nr. 121:	Jean Bernard Uwe Cantner Horst Hanusch Georg Westermann	Technology and Efficiency Patterns A Comparative Study on Selected Sectors from the French and German Industry
------------------	--	--

Bisher im Jahr 1995 erschienen:

Beitrag Nr. 122:	Gebhard Flaig	Die Modellierung des Einkommens- und Zinsrisikos in der Konsumfunktion: Ein empirischer Test verschiedener ARCH-M-Modelle
Beitrag Nr. 123:	Jörg Althammer Simone Wenzler	Intrafamiliäre Zeitallokation, Haushaltsproduktion und Frauenerwerbstätigkeit
Beitrag Nr. 124:	Günter Lang	Price-Cap-Regulierung Ein Fortschritt in der Tarifpolitik?
Beitrag Nr. 125:	Manfred Stadler	Spieltheoretische Konzepte in der Markt- und Preistheorie Fortschritt oder Irrweg?
Beitrag Nr. 126:	Horst Hanusch	Die neue Qualität wirtschaftlichen Wachstums
Beitrag Nr. 127:	Wolfgang Becker	Zur Methodik der Wirkungsanalyse von Maßnahmen der Verkehrsaufklärung
Beitrag Nr. 128:	Ekkehard von Knorring	Quantifizierung des Umweltproblems durch Monetarisierung?
Beitrag Nr. 129:	Axel Olaf Kern	Die "optimale" Unternehmensgröße in der deutschen privaten Krankenversicherung - eine empirische Untersuchung mit Hilfe der "Survivor-Analyse"
Beitrag Nr. 130:	Günter Lang Peter Welzel	Technology and Efficiency in Banking. A "Thick Frontier"-Analysis of the German Banking Industry
Beitrag Nr. 131:	Tina Emslander Karl Morasch	Verpackungsverordnung und Duales Entsorgungssystem Eine spieltheoretische Analyse
Beitrag Nr. 132:	Karl Morasch	Endogenous Formation of Strategic Alliances in Oligopolistic Markets
Beitrag Nr. 133:	Uwe Cantner Andreas Pyka	Absorptive Fähigkeiten und technologische Spillovers - Eine evolutionstheoretische Simulationsanalyse
Beitrag Nr. 134:	Ekkehard von Knorring	Forstwirtschaft und externe Effekte - Krisenmanagement durch Internalisierung? -
Beitrag Nr. 135:	Friedrich Kugler Horst Hanusch	Wie werden Einzel- zu Kollektiventscheidungen? Zur Aggregationsproblematik beim Übergang von der Mikro- zur Makroebene aus volkswirtschaftlicher Sicht
Beitrag Nr. 136:	Peter Welzel	Quadratic Objective Functions from Ordinal Data. Towards More Reliable Representations of Policy-makers' Preferences