

Schriften des Vereins für Socialpolitik

Band 195/VII

Studien zur Evolutorischen Ökonomik VII

Von

Thomas Brenner, Uwe Cantner, Georg Erdmann,
Dirk Fornahl, Horst Hanusch, Reiner Peter Hellbrück, Andreas Pyka,
Carsten Herrmann-Pillath, Paolo Saviotti, Adolf Wagner,
Rolf Walter, Wolfgang Weidlich

Herausgegeben von

Kurt Dopfer



Duncker & Humblot · Berlin

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

SCHRIFTEN DES VEREINS FÜR SOCIALPOLITIK

Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften

Neue Folge Band 195/VII

Studien zur
Evolutionären Ökonomik VII



Duncker & Humblot · Berlin

Studien zur Evolutionären Ökonomik VII

Evolutionäre Ökonomik – Methodologische,
ökonometrische und mathematische Grundlagen

Von

Thomas Brenner, Uwe Cantner, Georg Erdmann,
Dirk Fornahl, Horst Hanusch, Reiner Peter Hellbrück, Andreas Pyka,
Carsten Herrmann-Pillath, Paolo Saviotti, Adolf Wagner,
Rolf Walter, Wolfgang Weidlich

Herausgegeben von

Kurt Dopfer



Duncker & Humblot · Berlin

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in
der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

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

© 2003 Duncker & Humblot GmbH, Berlin

Fremddatenübernahme und Druck:

Berliner Buchdruckerei Union GmbH, Berlin

Printed in Germany

ISSN 0505-2777

ISBN 3-428-11224-5

Gedruckt auf alterungsbeständigem (säurefreiem) Papier
entsprechend ISO 9706 ☉

Inhalt

Kapitel 1

Grundzüge der ökonometrischen und mathematischen Modellierung

Empirische Wirtschaftsforschung aus evolutionsökonomischer Perspektive

Von *Adolf Wagner*, Leipzig 31

Die Messung von technologischer Heterogenität und deren Veränderung. Ein Beitrag zur Empirischen Evolutionsökonomik

Von *Uwe Cantner*, Jena und *Horst Hanusch*, Augsburg 41

Das Modellierungskonzept der Soziodynamik

Von *Wolfgang Weidlich*, Stuttgart 67

Kapitel 2

Konzeptionelle Fundierung der Evolutorischen Ökonomik: Raum und Zeit

Der Raum als Kategorie der Evolutorischen Ökonomik

Von *Carsten Herrmann-Pillath*, Witten-Herdecke 79

Zum Verhältnis von Wirtschaftsgeschichte und evolutorischer Ökonomik

Von *Rolf Walter*, Jena 113

Theoretische Erkenntnisse zur Entstehung und Erzeugung branchenspezifischer Cluster

Von *Thomas Brenner* und *Dirk Fornahl*, Jena 133

Kapitel 3

Evolutorische empirische Modelle

Innovationsnetzwerke in der Biotechnologie

Von *Andreas Pyka*, Augsburg und *Paolo Saviotti*, Grenoble / Valbonne 165

Nutzen des evolutionsökonomischen Forschungsprogramms am Beispiel der Chlor-Alkali-Elektrolyse

Von *Georg Erdmann*, Berlin 197

Entstehung und Ausbreitung geschäftsschädigender Innovationen: ein Fallbeispiel

Von *Reiner Peter Hellbrück*, Würzburg/Schweinfurt 219

Die Messung von technologischer Heterogenität und deren Veränderung

Ein Beitrag zur Empirischen Evolutionsökonomik

Von *Uwe Cantner**, Jena und *Horst Hanusch**, Augsburg

1. Einleitung

Dieser Beitrag befaßt sich mit einer methodischen Diskussion zum Problem der Messung von Strukturen und deren Veränderung im Zeitablauf. Als breiter theoretischer Rahmen dient hierzu die evolutorische Ökonomik, da gerade dort die Analyse des Strukturwandels ein zentrales Forschungsanliegen darstellt. Die Art der zu untersuchenden Strukturen soll hierbei eingeschränkt werden auf solche, die sich aus der Unterschiedlichkeit oder Heterogenität von ökonomischen Akteuren – im weitesten Sinne und damit auch beispielsweise Länder betreffend – ergibt. Außerdem wird diese Heterogenität im weiteren als technologisch determiniert verstanden, d. h. sie ist zurückzuführen auf unterschiedliche technologische und innovative Fähigkeiten einerseits und auf Unterschiede im Imitations- und Lernverhalten andererseits.

Die Quellen und Determinaten dieser Heterogenität und ihre Wirkung auf die technologische und wirtschaftliche Entwicklung sind Gegenstand einer breiten theoretischen Literatur. In diesem Beitrag sollen hierzu hingegen einige empirische Probleme und Fragestellungen angesprochen werden, nämlich wie man vorzugehen hat, möchte man heterogene Strukturen ermitteln und deren Veränderung im Zeitablauf analysieren. Ganz allgemein wird man die folgenden drei Schritte einhalten:

- (1) Zunächst sind diejenigen Variablen zu wählen, mit Hilfe derer man technologische Heterogenität beschreiben kann.
- (2) Auf diese Variablen wird eine geeignete empirische Methodik angewendet, um heterogene Strukturen zu identifizieren und deren Veränderung im Zeitablauf zu messen.

* Wir danken dem Koreferenten Fritz Rahmeyer für die Diskussion unseres Beitrags und vielfältige Hinweise zur Verbesserung des Papiers, den Teilnehmern der Tagung des Evolutorischen Ausschusses auf Schloss Reissensburg vom 13. – 15. Juli 2000, sowie den Teilnehmern an Seminaren in Augsburg, München und Brisbane. Kurt Dopfer sei für die herausgeberische Betreuung gedankt. Für inhaltliche Mängel tragen ausschließlich wir die Verantwortung.

- (3) Die Ergebnisse aus Schritt (2) werden daraufhin untersucht, ob und wie sie durch Kenngrößen zum innovativen und imitativen Verhalten erklärt werden können.

Die nachfolgende Diskussion wird sich nicht mit allen drei Schritten befassen, sondern kurz Schritt (1) ansprechen, um sich dann intensiver mit Schritt (2) auseinanderzusetzen. Für Schritt (3) wird auf einige Beispiele aus der Literatur hingewiesen.

Hauptanliegen des Beitrags ist es, eine allgemein anwendbare empirische Methodik zu diskutieren, die es auf verschiedenen Aggregationsebenen erlaubt, technologische Heterogenität abzubilden. Die ermittelten technologischen Strukturen lassen sich mit Hilfe von Unterschieden (a) in der totalen Faktorproduktivität und (b) in den Input- oder Outputintensitäten sowie Inputkoeffizienten der betrachteten Akteure beschreiben. Als Instrumentarium wird hierzu eine Zwei-Schritt-Prozedur eingeführt, die aus einer nicht-parametrischen Frontierfunktionsanalyse und aus der Berechnung des Malmquist-Produktivitätsindex besteht. Für beide Schritte kann aus prinzipieller Sicht aufgezeigt werden, daß sie spezifische Strukturveränderungen, wie sie vom evolutorischen Ansatz beschrieben und erklärt werden, zu identifizieren und zu bewerten in der Lage sind.

Der Beitrag ist wie folgt aufgebaut: Zunächst wird in Abschnitt 2 die theoretische Konzeption von Heterogenität innerhalb der evolutorischen Ökonomik diskutiert. Hieraus werden Anforderungen an eine empirische Methodik abgeleitet, die derartige Strukturen zu bestimmen und im Zeitablauf zu verfolgen in der Lage sein soll. Abschnitt 3 stellt eine Methodik vor, welche diesen Anforderungen gerecht werden kann. Ein zusammenfassender Abschnitt 4 regt Erweiterungsmöglichkeiten an und gibt Hinweise auf empirische Anwendungen der angesprochenen Methodik.

2. Konzeptionelles zur Heterogenität bei innovationsökonomischen Fragestellungen

In einem ersten Abschnitt soll auf das Konzept der Heterogenität zunächst im allgemeinen und dann in Bezug auf die ökonomische Theorie des technologischen Fortschritts eingegangen werden. Mit diesem Schritt wird ein allgemeiner analytischer Rahmen entworfen, mit welchem sich die Heterogenität von Akteuren abbilden läßt, welche sich aus der unterschiedlichen technologischen Leistungsfähigkeit von Akteuren ergibt. Die Festlegung der Heterogenität auf Unterschiede in der technologischen Leistungsfähigkeit stellt eine Einschränkung dar, denn Heterogenität kann zweifelsohne auch auf andere Quellen und Umstände zurückgeführt werden. Ist man allerdings an primär innovationsökonomischen Fragestellungen interessiert, dann ist diese Fokussierung auf die analytisch relevante Heterogenität sicherlich zu empfehlen.

2.1 Einige theoretische Grundüberlegungen

Heterogenität

Vergleicht man die theoretischen Grundkonzepte der Neoklassik und der Evolutik, so lassen sich eine Reihe von Unterschieden festmachen. Hierunter nimmt die Heterogenität der Akteure in Bezug auf deren Verhalten, Leistungsvermögen, Einstellungen und anderer Eigenschaften eine bedeutende Stellung ein. Das Konzept der Heterogenität bezieht sich also auf die Unterschiedlichkeit innerhalb einer Gruppe oder Population von Beobachtungen. Bei den Beobachtungen mag es sich um Haushalte, um Unternehmen, um Sektoren und Branchen, um Regionen oder Volkswirtschaften handeln, welche sich hinsichtlich ihrer Aktivitäten, Verhaltensweisen und/oder dem damit verbundenen Erfolg unterscheiden, mit dem sie bestimmte Güter konsumieren oder produzieren, Produktionstechniken einsetzen, innovative Aktivitäten unternehmen, organisatorische Strukturen bevorzugen u.a.m. Im Prinzip betrifft Heterogenität die Nicht-Gleichheit oder Asymmetrie von Akteuren innerhalb der betrachteten Gruppe.

Es ist allerdings nicht unumstritten, ob diese Asymmetrie für die Beschreibung des Zustands einer Gruppe oder auch für deren Entwicklung relevant ist. Die neoklassische Analyse würde dies im allgemeinen verneinen, mit der Konsequenz einer theoretischen Modellierung auf Basis von symmetrischen oder repräsentativen Akteuren. Modelle dieser Art werden damit begründet, daß die Unterschiedlichkeit oder Heterogenität der Akteure für die Beschreibung des Zustands und der Entwicklung einer Gruppe von Akteuren keinerlei Rolle spiele. Das Durchschnittsverhalten der Akteure allein sei analytisch relevant und interessant. Heterogenität sei dementsprechend ein kurzfristiges Phänomen und trete entsprechend nur bei Übergangsprozessen (transitory dynamics) auf.

Im Gegensatz hierzu stellt die Heterogenität oder Asymmetrie der Akteure ein grundlegendes Prinzip in der Theorie der ökonomischen Evolution dar. Selektionsmodelle, Ansätze aus der Synergetik sowie Entwicklungsansätze basieren geradezu auf heterogenen Einheiten und versuchen auf dieser Basis zu analysieren, welche Struktur eine System aufweist und wie sich diese Struktur verändert. Jeder der drei Ansätze verwendet dabei Heterogenität in einem spezifischen Kontext: Selektionsmodelle versuchen zu erklären, wie Heterogenität bspw. durch Innovationen entsteht und wie sie dann im Wettbewerbsprozeß auch wieder reduziert wird. In synergetischen Ansätzen wird Heterogenität als Grundlage für selbstorganisierende Prozesse gesehen, wie sie sich bspw. im Rahmen von Lernprozessen zwischen heterogenen Akteuren ergeben können. Im Entwicklungsansatz wird Heterogenität mit den Entwicklungsstufen eines Systems in Verbindung gebracht.

Im Rahmen der ökonomischen Theorie des technologischen Fortschritts betrachtet man Heterogenität zunächst als das Ergebnis von innovativen, imitativen und adaptiven Aktivitäten und unterschiedlichem innovativen, imitativen und adaptiven Erfolgs. Daneben wird Heterogenität aber auch als Quelle weiteren Fort-

schritts angesehen, wenn etwa technologisch schlechtere Akteure erst dann versuchen, die eigene Leistungsfähigkeit zu verbessern, wenn eine technologische Lücke zu anderen aufgetreten oder wenn diese Lücke zu groß geworden ist. Ebenso mögen innovative Aktivitäten von Technologieführern dann verstärkt entfaltet werden, wenn es nachfolgenden Akteuren gelingt, den Rückstand erheblich zu verringern oder gar ganz zu schließen. Weiterhin stellt Heterogenität die Quelle von imitativem und adaptivem Lernen dar, sowie von cross-fertilization-Effekten, welche zu weiterem Fortschritt an der Technologie-Frontier führen können.

Heterogenität als Asymmetrie und Varietät

Um die technologische Heterogenität der Akteure beschreiben zu können, beruft man sich einerseits auf die Eigenschaften und Verhaltensweisen der Akteure selbst, sowie andererseits auf die Art der eingesetzten Inputs und der produzierten Outputs. In der ökonomischen Theorie des technologischen Fortschritts charakterisiert man die Akteure geradezu anhand der Art, des Niveaus, der Intensität und der Richtung ihrer Innovationsaktivitäten – sowohl auf der Input- wie auch auf der Outputseite.

In diesem Zusammenhang läßt sich Heterogenität auch mit dem Konzept der Varietät (*variety*) beschreiben. Nach *Saviotti* (1996) versteht man darunter die Anzahl unterscheidbarer Elemente innerhalb einer Grundgesamtheit von Artefakten. In diesem Sinne lassen sich Input- und Outputvarietät (*Saviotti* (1996, 94)) unterscheiden, erstere im Sinne der Anzahl unterschiedlicher Arten von Produktionsprozessen und letztere als die Anzahl unterschiedlicher Output-Typen.

Allerdings sollt man Heterogenität gerade im innovationsökonomischen Kontext nicht einfach als ein Phänomen verstehen, dem man durch einfaches Abzählen unterscheidbarer Elemente beikommen könnte. Jeder Innovator versucht eine bessere Leistung zu erbringen als seine Wettbewerber. Und dieses „besser“ zeigt sich in Gütern und Dienstleistungen mit einem vergleichsweise überlegenen Preis-Leistungsverhältnis. In diesem Zusammenhang wäre eine Konzeption wünschenswert, mit welcher sich die Unterschiede quantifizieren lassen, aus denen sich die Heterogenität ergibt. So gesehen ist man bei der Output-Varietät daran interessiert, ob die beobachtbare Varietät auf Qualitätsunterschieden beruht (etwa höhere oder niedrigere Qualität) oder ob sie sich aus einem engeren oder breiteren Spektrum spezifischer Charakteristika ergibt (mehr oder weniger eingebaute Eigenschaften). Ebenso läßt sich auf der Inputseite argumentieren: die Varietät verschiedener Produktionsprozesse kann sich entweder aus der unterschiedlichen Effizienz (mehr oder weniger effizient) oder aus den Inputintensitäten ergeben (bspw. mehr oder weniger kapitalintensiv).

Eine diese Zusammenhänge recht gut abbildende Konzeption findet sich in *Dosi* (1988), der zwischen der Asymmetrie und der Varietät unterscheidet. Immer dann, wenn die Unternehmen als besser und schlechter eingestuft werden können,

spricht Dosi von Asymmetrie. Der Grad der Asymmetrie innerhalb einer Industrie ergibt sich aus der Dispersion der Inputeffizienzen bei einem gegebenen (homogenen) Output oder der Dispersion der mit Preisen gewichteten Leistungsmerkmale der verschiedenen Outputtypen der Unternehmen. Alle Unterschiede oder Asymmetrien, die nicht in eine eindeutige Rangfolge im Sinne von besser und schlechter gebracht werden können, werden als Varietät bezeichnet. Dies tritt immer dann auf, wenn Unternehmen unterschiedliche Produktionstechniken zur Produktion eines homogenen Output einsetzen oder sie Produktinnovationen hervorbringen, welche sich in unterschiedlichen Regionen des Eigenschaftensraums befinden.

Hierauf Bezug nehmend soll im weiteren eine Heterogenität der Akteure behandelt werden, welche auf Unterschieden in der technologischen Leistungsfähigkeit beruht – dies bedeutet, daß Heterogenität als eine technologisch bedingte Heterogenität verstanden wird. Daneben umfaßt das vorgeschlagene Konzept der Heterogenität aber auch technologische Leistungsfähigkeiten, die nicht direkt miteinander verglichen werden können – wie etwa die Produktion von alten und neuen Gütern oder der Einsatz von unterschiedlichen Produktionstechniken. In diesen Fällen können die Leitungsfähigkeiten nicht unmittelbar miteinander verglichen werden (in Bezug auf real physische Faktoren). Deshalb muß auf andere Maße zurückgegriffen werden wie etwa den jeweiligen ökonomischen Erfolg dieser Leistungsfähigkeiten, welcher mit Hilfe der Profitabilität, dem Marktanteil, den Wachstumsraten, den Kosten etc. gemessen werden kann.

Heterogenität und Aggregationsniveau

Technologische Heterogenität läßt sich auf unterschiedlichen Aggregationsniveaus beobachten. Die hier vorgeschlagene Konzeption soll daher nicht nur die technologische Leistungsfähigkeit von einzelnen mikroökonomischen Akteuren erfassen, sondern auch auf höheren Aggregationsniveaus anwendbar sein, wie etwa der sektoralen, der regionalen oder der makroökonomischen Ebene. Die Heterogenität auf höheren Aggregationsebenen hat zunächst einmal einen durchaus eigenen Charakter. Zweifelsohne wird nämlich durch die Aggregation ein Teil der Heterogenität auf niedrigeren Ebenen überdeckt. Die übergeordnete Ebene wird so zum Teil nur durch einen – wie auch immer gemessenen – Durchschnitt charakterisiert. Trotz dieses zu erwartenden Informationsverlustes kann man davon ausgehen, daß auch unter Sektoren, Regionen und Volkswirtschaften in Bezug auf den Outputmix und das Qualitätsspektrum (z. B. landwirtschaftliche Produkte in Deutschland im Vergleich zu Indien) sowie in Bezug auf die Art und den Anteil des Einsatzes von bestimmten Produktionstechnologien (z. B. Baumwollproduktion in Pakistan im Vergleich zu den USA) zum Teil erhebliche Unterschiede und damit Heterogenität bestehen. Dementsprechend soll der Begriff der lokal angewendeten Technologien auch in einer aggregierten Betrachtung verwendet werden, auch wenn damit ein Informationsverlust verbunden ist.

Heterogenität und lokaler Fortschritt

Heterogenität, so wie sie zunächst eingeführt wurde, ist eine Momentaufnahme einer Gruppe von Beobachtungen. Gerade aber im Rahmen des technologischen Fortschritts muß man davon ausgehen, daß Heterogenität andauernd verändert wird. Man könnte sich exogene Faktoren vorstellen, durch welche alle Akteure oder Einheiten einer Gruppe von Beobachtungen betroffen sind. Interessanter ist ohne Zweifel endogener Fortschritt. In dem Maße, wie dieser von einzelnen Akteuren oder einer enger abgegrenzten Gruppe von Akteuren gemeinsam vorangetrieben wird, ist der entsprechende Fortschritt auch spezifisch für den einzelnen – das heißt nichts anderes, als daß der Fortschritt lokal ist (*Atkinson/Stiglitz 1969, David 1975, Antonelli 1994*). Auch wenn man diese Art des Fortschritts bei mehreren Akteuren in sehr ähnlicher Weise feststellt – wie etwa das catching-up zu dem/den Technologieführern – so ist der Fortschritt ebenfalls in dem Sinne lokal, als daß nur ein Teil der Beobachtungen innerhalb einer Gruppe hiervon betroffen ist.

Entsprechend zur Anwendung lokaler Technologien läßt sich lokaler technologischer Fortschritt auch auf höheren Aggregationsstufen festmachen. So ist technologischer Fortschritt für ein bestimmtes Land spezifisch (USA versus Togo), für eine bestimmte Region (Tiger-Staaten versus EU), oder für einen bestimmten Sektor (Maschinenbau in Deutschland verglichen mit Japan). Auch hier gilt: Fortschritt auf höherer Aggregationsebene verdeckt den Fortschritt, der auf niedrigeren Ebenen stattfindet, so daß nur ein durchschnittlicher Fortschritt aufscheint.

2.2 Empirische Fragen und Probleme

Die Bedeutung der Heterogenität für die theoretische Analyse hervorzuheben ist ein erster Schritt. Ein notwendiger zweiter betrifft die Frage, wie man Heterogenität auch empirisch messen kann und zwar so, daß die theoretischen Zusammenhänge auch einer empirischen Überprüfung zugänglich sind. Diese Aufgabe ist keineswegs eine einfache zu lösende und der zu beschreitende Weg nicht offensichtlich. Im Prinzip, so muß man festhalten, steht die evolutorische Ökonomik hier vor dem gleichen Problem wie die Neoklassik, welche sich einer typologischen Vorgehensweise verschrieben hat: Welche Variablen und Größen sind notwendig und relevant, um die zu untersuchenden Zusammenhänge entsprechend abbilden und überprüfen zu können?

Während der typologische Ansatz mit durchschnittlichen Größen und Variablen auskommt, versucht die evolutorische Populationssicht Variablen zu identifizieren, in denen sich die Untersuchungseinheiten unterscheiden, also heterogen sind, und die dabei Wesentliches über die Leistungsfähigkeit und den Fortschritt der betrachteten Gruppe von Beobachtungen auszusagen vermögen. Um sich hierfür eine methodische Basis schaffen zu können, muß man sich zunächst fragen, wie man technologische Leistungsfähigkeit mißt. Und die Antwort hierauf hat insbesondere

auf die beiden folgenden Fragen einzugehen: (1) Was bewirkt technologischer Fortschritt und (2) wie läßt sich eine Innovation von einem bekannten, alten Artefakt unterscheiden?

Die theoretische Diskussion oben zeigte bereits, daß endogener Fortschritt mit Heterogenität einhergeht, die bei Innovator-Nicht-Innovator Strukturen auftritt. Diese Heterogenität läßt sich ganz allgemein auf unterschiedlichen Innovationserfolg zurückführen. Die unmittelbar empirische Frage ist nun, wie diese technologisch bedingte Heterogenität zu messen ist.

Die nächste Frage, wie sich Neues von Altem unterscheidet, betrifft das Problem, ob eher ein spezifisches oder ein generelles Maß verwendet werden soll. Ein Blick in die empirische Literatur (bspw. *Grupp* 1997) zeigt, daß es eine Reihe von Variablen und Größen gibt, mit deren Hilfe man die Effekte von technologischem Fortschritt und Innovationen aufdecken kann. So sind beispielsweise alle Charakteristika, welche in der Technometrie verwendet werden, technischer Natur. Bei *Saviotti* (1996) findet sich beispielsweise die Beschreibung der technologischen Entwicklung in der Hubschrauber-Technologie: Der Fortschritt äußert sich hier in der technischen Verbesserung der Motorleistung, des Rotordurchmessers, der Anzahl der Motoren, etc. Ein anderes Beispiel ist die Computerindustrie, in welcher sich der Fortschritt neben anderem in der sich kontinuierlich erhöhenden Speicherkapazität widerspiegelt. Als letztes Beispiel diene die Automobilindustrie und die dort eingesetzten Produktionsverfahren: Anfang des letzten Jahrhunderts hat hier technologisch-organisatorischer Fortschritt, der als Fordismus bezeichnet wurde, zu einer enormen Steigerung der Automobilproduktion pro Stunde geführt; hohe Qualitätssteigerungen, im Sinne einer Verringerung der Ausschußzahlen, konnten unter dem Stichwort Toyotism in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts einen weiteren Fortschritt in der Automobilproduktion einläuten.

Trotz aller Verdienste derartiger Studien, ihre spezifische und an technischen Größen orientierte Analytik hat auch Nachteile. Selbst wenn man mit Hilfe dieser Vorgehensweise die spezifischen Eigenschaften von Technologien und deren Weiterentwicklung hinreichend exakt nachzuzeichnen vermag, so wird hierdurch auch die Vergleichbarkeit von verschiedenen Beobachtungen und verschiedenen Studien möglicherweise erheblich beeinträchtigt. Darüber hinaus erlaubt es eine derart spezifische Vorgehensweise nicht, eine Aggregation der Leistungsfähigkeit von der Unternehmung zur sektoralen und industriellen Ebene und von dort zur regionalen oder makroökonomischen Ebene vorzunehmen. Der Grund hierfür ist ganz offensichtlich, denn die Aggregation der Güter verschiedener Unternehmen in einem Sektor, oder der Güter aus verschiedenen Sektoren in einer Volkswirtschaft kann nicht durchgeführt werden, wenn man zur Messung technische Attribute wie etwa Stückzahl, kg, Mb usw. verwendet

Zur Überwindung dieser Probleme soll im folgenden ein alternativer Weg beschrieben werden. Hierzu werden zunächst vier Anforderungen an die Methodik einer empirischen Evolutionsökonomik formuliert. Auf deren Basis kann ein empirischer

risches Instrumentarium entworfen werden, welches es erlaubt, lokal angewendete Techniken sowie lokalen technologischen Fortschritt zu erfassen und zu bewerten. Für jede der aufgestellten Anforderungen soll zunächst eine kurze Charakterisierung erfolgen, eine ausführliche Darstellung wird bei der Umsetzung in Abschnitt 3 geleistet.

Anforderung 1

Das gesuchte Maß muß einerseits exakt genug sein, die technologische Heterogenität und den lokalen Fortschritt zu messen. Andererseits sollte es nicht zu spezifisch sein, um die Vergleichbarkeit von Beobachtungen nicht gänzlich aufzuheben. Zusätzlich sollte es auf breiter Ebene und auf verschiedenen Aggregationsniveaus einsetzbar sein. *Saviotti (1996, 52) formuliert in diesem Zusammenhang wie folgt: „... a taxonomy at all levels of aggregation in such a way that the relationships of the various units of analysis within and between each level of aggregation can be analysed.“*

Vorschlag 1

Eine allgemeine, breit anwendbare Taxonomie läßt sich auf der Kennzahl der *totalen Faktorproduktivität* (TFP) und deren Veränderung in der Zeit aufbauen. Dieser Vorschlag mag auf den ersten Blick wenig neu erscheinen, da das TFP-Maß zum einen in der traditionellen – neoklassisch ausgerichteten – Analyse eine wichtige Rolle einnimmt und sich dort bereits einer intensiven und kontroversen Diskussion stellt. Mit Bezug auf die vorliegende Problematik mag man hier an die zahlreichen Studien des *growth accounting* denken, innerhalb derer das TFP-Maß im Gleichgewichtskontext der traditionellen Produktionstheorie und der Annahme homogener Produktionsweisen und damit homogener Strukturen angewendet wird. Im evolutorischen Kontext sind diese Annahmen nicht haltbar. Aus diesem Grund wird der Vorschlag, die totale Faktorproduktivität in das Zentrum des methodischen Instrumentariums zu stellen, an weitere Anforderungen geknüpft. Dies führt zu Anforderung 2.

Anforderung 2

Die Art und Weise, wie die totale Faktorproduktivität gemessen wird, sollte sich nicht an der neoklassisch fundierten Vorgehensweise traditioneller Art orientieren. Zunächst einmal bedeutet dies, daß die Methode geeignet sein muß, zwischen verschiedenen Leistungsniveaus zu unterscheiden, d. h. zwischen Innovator und Nicht-Innovator, so daß man Aussagen über bessere und schlechtere technologische Leistungsfähigkeit treffen kann.

Vorschlag 2

Um dieser Anforderung gerecht zu werden, wird eine sogenannte *Frontieranalyse* vorgeschlagen. Die Frontierfunktion oder Technologiefrontier wird dabei von denjenigen Beobachtungen aufgespannt, welche die höchste Leistungsfähigkeit aufweisen. Alle Beobachtungen mit schlechterem Leistungsvermögen befinden sich dann in einer bestimmten Distanz zu dieser Frontierfunktion wobei der jeweilige Abstand als ein Maß für den technologischen Leistungsunterschied herangezogen werden kann.

Anforderung 3

Entsprechend den Ausführungen oben sollte neben der Unterscheidung in „besser“ und „schlechter“ auch dafür gesorgt sein, daß die empirische Vorgehensweise unterschiedliche Produktionsfunktionen und unterschiedliche Outputstrukturen zuläßt; das heißt, es soll Varietät bezüglich der Produktionstechniken und des Outputmixes abgebildet werden können. Folglich darf die empirische Analyse bezüglich dieser Kriterien keine spezifische funktionale Form einer Produktionsfunktion *a priori* unterstellen. Vielmehr sollte sie eine offene Anzahl dieser Beziehungen zulassen.

Vorschlag 3

Um dieser Anforderung gerecht zu werden, wird die Berechnung der Kennzahl „totale Faktorproduktivität“ und die damit verbundene Bestimmung einer Technologiefrontier auf eine *nicht-parametrische* Art erfolgen. Verglichen mit den traditionellen Verfahren der TFP-Indezzahlen sowie den Verfahren zur Bestimmung von parametrischen Produktions- und Randproduktionsfunktionen ist dieser Ansatz wenig restriktiv in der funktionalen Form, welche die Aggregation der Inputs einerseits und der Outputs andererseits ermöglicht. Prinzipiell sind hierbei genauso viele funktionale Formen zugelassen wie man in einer Untersuchung Beobachtungen hat.

Anforderung 4

Das so gefundene Maß für technologische Leistungsfähigkeit und technologische Heterogenität soll auch in seiner Veränderung über die Zeit bestimmbar sein. Hierbei soll es das Maß der TFP auch ermöglichen, technologischen Fortschritt *lokal* zu erfassen.

Vorschlag 4

Dieser Anforderung genügt die Verwendung des sogenannten *Malmquist-Produktivitätsindex*, der die Veränderung der totalen Faktorproduktivität mißt. Die be-

sondere Eigenschaft dieser Kennzahl ist, daß sie auf einer individuellen und damit lokalen Basis sowohl den technologischen Fortschritt an der Technologiefreigrenze als auch die Veränderungen bei den weniger leistungsfähigen Einheiten unterhalb der Freigrenze angibt.

3. TFP, technologischer Fortschritt und Evolutionstheorie

3.1 TFP als Maß für technologische Leistungsfähigkeit

Zur Messung der technologischen Leistungsfähigkeit und des technologischen Fortschritts soll laut Vorschlag 1 die totale Faktorproduktivität und deren Veränderung dienen. Welche Vor- und auch welche Nachteile sind damit verbunden?

Mit Anforderung 1 wird ein Maß gesucht, das allgemein, d. h. in vielen Anwendungsbereichen und auf allen Aggregationsstufen eingesetzt werden kann. Die TFP-Kennzahl ist ohne Zweifel hierfür geeignet. Ihrer Generalität mag allerdings besonders dann ein Informationsverlust gegenüberstehen, wenn man auf niedrigerem Aggregationsniveau Studien durchführt und die dabei erarbeiteten Ergebnisse mit denjenigen aus einer fallstudienartigen Analyse vergleicht. Dieser Nachteil, eben nicht spezifisch vorzugehen, wird allerdings durch einige Vorteile kompensiert – wenn nicht gar überkompensiert. Die Anwendung der gleichen Methodologie auf verschiedenen Ebenen erlaubt es nämlich, generelle Einsichten darüber zu gewinnen, wie sich Strukturen und deren Veränderung von der mikroökonomischen Ebene der einzelnen Akteure (Individuen und Unternehmen) auf die nächst höheren Ebenen der Industrie und Branche und dann, in einem weiteren Schritt, auf regionale oder nationale Aggregate auswirken.

Kann der TFP-Index und seine Veränderung die technologische Leistungsfähigkeit der untersuchten Einheiten sowie den jeweiligen technologischen Fortschritt hinreichend genau erfassen? Hierzu sei zunächst auf die allgemeine Konstruktion dieser Kennzahl eingegangen. Indexpunkte zur TFP haben vor allem im sogenannten Growth-Accounting eine vornehmliche Anwendung gefunden. Dort wird der aggregierte¹ Output Y , im allgemeinen das BIP, zum Aggregat² verschiedener Inputfaktoren X in Beziehung gesetzt, vor allem Arbeit und Kapital – aber auch eine ganze Reihe von anderen Inputfaktoren, um das sogenannte Residuum aufzufüllen. Ganz allgemein schreibt man für die totale Faktorproduktivität A :

$$A = \frac{Y}{X} .$$

¹ Über die Aggregationsvorschrift bezüglich der Outputs (die Transformationsfunktion) sei hier noch nichts ausgesagt.

² Ebenso soll hier noch nicht auf die Aggregationsvorschrift bezüglich der Inputs, d. h. die Produktionsfunktion eingegangen werden.

Die Veränderung der totalen Faktorproduktivität wird dann als technologischer Fortschritt bezeichnet, wenn man ein Outputwachstum beobachtet, ohne daß damit ein entsprechendes Inputwachstum verbunden ist.³ Die Differenz zwischen Outputwachstum und Inputveränderung wird als Residuum bezeichnet. Abramovitz gab diesem auch den Namen „*measure of our ignorance*“. Damit ist eine Diskussion eröffnet, welche hinterfragt, ob die TFP-Kennzahl die technologische Leistungsfähigkeit und deren Veränderung auch entsprechend korrekt wiedergeben kann. Die Beantwortung dieser Fragen erfordert, daß man zwischen der theoretischen Konzeption einerseits und der empirischen Anwendung andererseits unterscheidet.

Interpretiert man den TFP-Index als Indikator der Leistungsfähigkeit, so geschieht dies entweder in bezug auf ein bekanntes optimales Vergleichsmaß oder aber relativ zur besten Leistungsfähigkeit innerhalb einer Gruppe von Beobachtungen. In der empirischen Anwendung wird man es immer mit letzterem Vergleich zu tun haben. Damit ein derartiger Vergleich aber auch zulässig und entsprechend aussagekräftig ist, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Die verwendeten Kategorien an Inputs und Outputs müssen bezüglich der zu vergleichenden Beobachtungen homogen sein, ansonsten vergleicht man „Äpfel mit Birnen“.
2. Die verwendeten Inputkategorien sollten selbst noch keine Bewertung des jeweiligen Beitrags zur technologischen Leistungsfähigkeit beinhalten.
3. Die Art und Weise, wie die Inputs und die Outputs jeweils aggregiert werden, muß für diejenigen Beobachtungen identisch sein, die miteinander verglichen werden.

In dem Maße, wie diese Forderungen in der empirischen Umsetzung nicht erfüllt sind, wird der Leistungsvergleich – wenn überhaupt durchführbar – entsprechend weniger aussagekräftig sein.

Der Forderung nach der Homogenität der Inputs und Outputs mag man noch vergleichsweise leicht nachkommen können. Vor allem durch die Wahl geeigneter Einheiten kann man dieses Problem relativ leicht lösen – zumindest teilweise. Hiermit verbunden, aber weitaus schwieriger zu lösen, ist die Forderung, daß die Input- und Outputkategorien noch keinerlei Bewertung ihres jeweiligen Beitrags zur technologischen Leistungsfähigkeit enthalten sollen. Dies bedeutet zunächst einmal, daß man reale Einheiten zu verwenden hat, wie beim Produktionsfaktor Arbeit etwa die Anzahl der Arbeitskräfte oder die Arbeitsstunden und nicht die Gehaltssumme oder den Stundenlohn.

Der dritte Problembereich betrifft die Aggregationsfunktion für die Inputs und Outputs. Auf der Inputseite ist hierbei die Produktionsfunktion angesprochen.

³ Derselbe Zusammenhang gilt auch bei einer Verringerung der Inputs, die nicht mit einer Reduktion des Outputs in gleichem Maße verbunden ist.

Deren Bestimmung zieht eine Reihe von Problemen nach sich, auf die hier nicht gesondert eingegangen werden soll. Es sei nur noch einmal darauf hingewiesen, daß man auf Basis lokal angewendeter Technologien und lokal wirkenden Fortschritts nicht davon ausgehen kann, daß alle Beobachtungen die identisch gleiche Aggregations- oder Produktionsfunktion aufweisen. Zumindest a priori muß man diesbezüglich Heterogenität zulassen.

Ein ähnliches Problem stellt sich auch auf der Outputseite, außer man ist in der glücklichen Lage, es mit nur einer Outputkategorie zu tun zu haben. Dies wird in aller Regel nicht der Fall sein und man hat davon auszugehen, daß sich der „Output“ von Beobachtungen hinsichtlich der Qualität und der Anzahl der verschiedenen Outputkategorien unterscheidet. Ein überwiegend beschrittener Weg ist hier, die verschiedenen Outputs mit Hilfe ihrer Marktpreise zu aggregieren.⁴ Diese mögen die Qualitätsunterschiede und die Unterschiede in der Outputart widerspiegeln, allerdings nicht aus einer technischen Sicht heraus, sondern aus Sicht der Konsumenten oder Abnehmer. Diese Vorgehensweise führt dann zu Outputkategorien wie BIP, Sektorumsatz oder Unternehmensumsatz.

Die Interpretation der Veränderung des TFP-Index als technologischen Fortschritt ist mit denselben Problemen konfrontiert wie die Interpretation des TFP an sich. Im Fall von Prozeßinnovationen, durch welche bei konstantem Inputniveau eine größere Menge eines (homogenen) Output produziert werden kann, gibt die Veränderung des TFP recht gut die Wirkung des technologischen Fortschritts wieder. Wenn man allerdings Qualitätsverbesserungen oder neue Produkte berücksichtigt, lassen sich mit Hilfe des aggregierten Outputs diese Effekte – im Sinne eines durchschnittlichen Effekts – nur dann hinreichend genau messen, wenn Preis- und Mengenveränderungen diese Wirkungen auch adäquat repräsentieren. Ist man aber an den Effekten unterhalb des Aggregationsniveaus interessiert, dann kann nur eine Analyse mit disaggregierten Outputs weiterhelfen.

Abschließend zur Diskussion des TFP-Index sollte man auf einige traditionelle Argumente gegen die Verwendung der TFP eingehen. Hierzu zählen vor allem Aussagen, welche die Veränderung der TFP aufgrund von Vintage-Strukturen, auf Größeneffekte (scale economies) sowie Substitutionseffekte zurückführen. In einer Theorie des lokalen technologischen Fortschritts werden diese Einflußfaktoren jedoch allesamt mit dem technologischen Fortschritt in Verbindung gebracht. So argumentiert beispielsweise *Rosenberg (1976)*, daß ein Substitutionsprozeß entlang einer traditionellen Isoquante als die Anwendung einer bisher nicht eingesetzten Produktionstechnik zu verstehen ist und daher als technischer Fortschritt bezeichnet werden kann.

⁴ Diese Vorgehensweise kommt dem nahe, was *Dosi (1988, 1155–7)* als preisgewichteter Indikator der Leistungsfähigkeit bei Unternehmen mit differenziertem Output bezeichnet.

3.2 Struktur: Lokale Technologien und Frontierfunktionen

Anforderungen 2 und 3 oben machen es notwendig, nach einem Berechnungsverfahren für die TFP zu suchen, mit welchem sich technologische Heterogenität im Sinne der beschriebenen Asymmetrie und Varietät erfassen läßt. Eine hierfür geeignete Methode stellt der Ansatz zur Bestimmung nicht-parametrischer Frontier- oder Randfunktionen dar. Zunächst sollen hierzu kurz die Grundlagen dargestellt werden.

Der Ansatz zur Bestimmung nicht-parametrischer Frontierfunktionen basiert auf Indexpunkten zur totalen Faktorproduktivität, welche denjenigen aus der traditionellen Produktivitätsanalyse definitorisch gleich sind. Der wesentliche Unterschied besteht darin, daß man hier die Aggregationsfunktionen und die Gewichtungsfaktoren nicht spezifiziert, mit denen die Outputgrößen des Zählers einerseits und die Inputgrößen des Nenners andererseits aggregiert werden. Der TFP-Index h_j ist für jede Beobachtung $j(j = 1, \dots, n)$ aus einer Gruppe von n Beobachtungen wie folgt definiert:

$$(1) \quad h_j = \frac{u^T Y_j}{v^T X_j}$$

Hierbei steht der s -Vektor Y_j für die Outputs ($r = 1, \dots, s$) und der m -Vektor X_j für die Inputs ($i = 1, \dots, m$) der Beobachtung j . Der s -Vektor u und der m -Vektor v enthalten die Aggregationsgewichte u_r und v_i .⁵

Der Index h_j ist nichts anderes als ein TFP-Index, wobei die Output- und die Inputaggregationsfunktion jeweils vom linear-arithmetischen Typ sind. Diese Formulierung findet man beispielsweise auch beim Kendrick-Ott Produktivitätsindex, bei dem allerdings die Aggregationsgewichte exogen gegeben und an bestimmte Annahmen des Produktionsgleichgewichts gebunden sind. Bei der nicht-parametrischen Vorgehensweise werden die Aggregationsgewichte hingegen endogen und ohne Rückgriff auf Gleichgewichtsannahmen bestimmt. Ebenso macht es diese Vorgehensweise auch nicht notwendig, daß die Aggregationsfunktionen (und Gewichtungsfaktoren) für alle Beobachtungen identisch sind. Mit dieser Möglichkeit einer endogenen und nahezu freien Wahl von Aggregationsgewichten wird man Anforderung 3 gerecht. Wie man bei dieser Berechnung vorgeht, wird unten noch eingehend diskutiert.

Zuvor sollte man aber auch auf einige Einwände gegen die hier vorgenommene Interpretation eingehen. So wird von einigen Seiten eingewendet (etwa *Chang/Guh* 1991), daß die nicht-parametrische Vorgehensweise wegen der Vorgabe einer

⁵ Bei der Berechnung des TFP können alle Arten von Inputs und Outputs berücksichtigt werden. Dabei erfordert es das nicht-parametrische Verfahren nicht, daß jede Beobachtung auch alle vorkommenden Inputkategorien einsetzt oder alle möglichen Outputkategorien auch produziert. Dies bedeutet, daß man neue Güter ebenso wie neuartige Produktionsfaktoren in die Analyse einbringen kann.

linear-arithmetischen Aggregationsfunktion doch einen spezifischen Typ von Produktionsfunktion festlegt. Dies scheint auf den ersten Blick plausibel zu sein, doch übersieht diese Argumentation folgende Punkte:

1. Da die Aggregationsgewichte endogen bestimmt werden, ist es durchaus möglich, daß sie sich zwischen den Beobachtungen unterscheiden. Dies bedeutet, daß es eine Reihe von parametrisch unterschiedlichen Produktionsfunktionen gibt, auch wenn diese vom gleichen Typ sind.
2. Mit der linear-arithmetischen Aggregationsfunktion sind zumindest zwei unterschiedliche Typen von Produktionsfunktionen angesprochen, die lineare Produktionsfunktion und die Leontief-Produktionsfunktion.
3. Darüber hinaus kann man jede andere Art von Produktionsfunktion zulassen, vorausgesetzt die Substitutionsmöglichkeiten sind kurzfristig stark eingeschränkt (*David 1975*) – die Leontief-Produktionsfunktion repräsentiert dabei den Extremfall, da hier keine Substitutionsmöglichkeiten bestehen. Der lokale Charakter der Technologie kommt bei dieser Interpretation recht gut zum Tragen.
4. Letztendlich ist die Vorgehensweise auch dann einsetzbar, wenn man von der Konzeption der neoklassischen Produktionsfunktion gänzlich abgeht und nur noch Produktionspunkte zuläßt. In diesem Fall dienen die Aggregationsgewichte dazu, Linearkombinationen von Produktionstechniken zu konstruieren. Hierauf wird unten noch eingegangen.

Diese (nahezu) nicht restringierte Formulierung der totalen Faktorproduktivität macht sie zur zentralen Größe der nachfolgenden Anwendung der nicht-parametrischen Frontieranalyse. Sie erlaubt es, technologisch bedingte Heterogenität festzustellen und zu bewerten, wobei man Aussagen treffen kann, wie „eindeutig besser“, „eindeutig schlechter“ oder auch „nicht vergleichbar“. Das für solche Aussagen gewählte Referenzmaß stellt auf die besten Beobachtungen innerhalb einer Gruppe ab. Daher sind diese Aussagen im Sinne relativer Bewertungen zu interpretieren.

Das Grundprinzip der nicht-parametrischen Methode besteht darin, den Produktivitätsindex h_j einer Beobachtung j so zu bestimmen, daß diese Maßzahl als relative Leistungsfähigkeit oder Effizienzkennzahl verwendet werden kann. Entsprechend hat man Beobachtung j mit den *best-practice* Beobachtungen zu vergleichen. Letztere erhalten hierbei eine Effizienzkennzahl $h = 1$, die weniger effizienten Beobachtungen eine Maßzahl $h < 1$. Auf diese Art und Weise lassen sich alle Beobachtungen miteinander vergleichen, und mit Hilfe der j (in aller Regel) verschiedenen Kennzahlen h läßt sich die Heterogenität der technologische Leistungsfähigkeit innerhalb einer Gruppe von Beobachtungen beschreiben. Diese Eigenschaft des Verfahrens genügt Anforderung 2 oben.

Die Bestimmung des TFP-Index für Beobachtung l , $l \in \{1, \dots, n\}$, beim simultanen Vergleich mit allen Beobachtungen n , kann durch folgendes beschränktes Maximierungsproblem dargestellt werden:

$$(2) \quad \max h_l = \frac{u^T Y_l}{v^T X_l}$$

$$NB : \frac{u^T Y_j}{v^T X_j} \leq 1; j = 1, \dots, n; u, v > 0 .$$

Das Maximierungsproblem in (2) bestimmt den Produktivitätsindex für Beobachtung l unter den Nebenbedingungen, daß die Produktivitätsindices aller n Beobachtungen den Wert 1 nicht überschreiten dürfen. Diese Nebenbedingungen normieren h auf das Intervall $(0, 1)$. Außerdem müssen die Elemente der Vektoren u und v positiv sein. Diese Bedingung soll ausdrücken, daß alle Inputs und alle Outputs einen positiven Effizienz- oder Produktionsbeitrag leisten.

Da für Zähler und Nenner des Produktivitätsindex linear-arithmetische Aggregationsfunktionen verwendet werden, bezeichnet man das Problem (2) auch als lineare Quotientenprogrammierung. Für Probleme dieser Art existieren eine Reihe von Lösungsverfahren, von denen die sogenannte Charnes-Cooper-Transformation das bekannteste ist. *Charnes* und *Cooper* (1962) transformieren das Problem (2) in ein lineares Programm, welches mit den Standardlösungsverfahren gelöst werden kann (Simplexalgorithmus). Führt man diesen Schritt durch und transformiert man das entstandene lineare Programm in seine duale Form, so erhält man folgende sogenannte *Charnes / Cooper / Rhodes Envelopment Form* (*Charnes / Cooper / Rhodes* 1978) des nicht-parametrischen Ansatzes:

$$(3) \quad \min \theta_l$$

$$NB : \quad \begin{aligned} Y \lambda_l &\geq Y_l \\ \theta_l X_l - X \lambda_k &\geq 0 \\ \lambda_l &\geq 0 \end{aligned}$$

Hier stehen Y_l und X_l für die s - und m -Vektoren der Outputs bzw. Inputs der Beobachtung l . Y und X sind die $s \times n$ bzw. $m \times n$ -Matrix der Outputs bzw. Inputs aller n Beobachtungen. Führt man die Berechnung in (3) für alle n Beobachtungen durch, so erhält man neben den Effizienzkennzahlen eine Effizienz- oder Technologie-Frontier, welche als Referenzmaßstab für alle Beobachtungen dient. Die Technologie-Frontier ist dabei als eine *best-practice*-Konzeption zu verstehen, da sie von denjenigen Beobachtungen aufgespannt wird, welche die vergleichsweise höchste technologische Leistungsfähigkeit aufweisen.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind wie folgt zu interpretieren. Der zu minimierende Parameter θ_l gibt dasjenige Niveau der Inputfaktoren an, auf welches man die Inputfaktoren der Beobachtung l proportional reduzieren muß, damit diese auf der *best-practice*-Randfunktion produziert. Aufgrund der Dualität entspricht der Wert für θ_l dem Wert von h_j und ist so ebenfalls als ein Maß für die relative technologische Leistungsfähigkeit zu interpretieren. Findet man in der Analyse

$\theta_l = 1$, so gehört l zu den *best-practice*-Beobachtungen, welche die Randfunktion aufspannen. Bei $\theta_l < 1$ hingegen produziert l nicht auf der best-practice-Frontier und weist gegenüber den best-practice-Beobachtungen eine schlechtere technologische Leistungsfähigkeit auf.

Abbildung 1 verdeutlicht dies an einem einfachen Beispiel. Verschiedene Beobachtungen produzieren eine Outputeinheit ($y = 1$) mit zwei Inputfaktoren der Mengen x_1 und x_2 . Mit Hilfe des Programms (3) kann für jede Beobachtung die relative technologische Leistungsfähigkeit bestimmt werden. Hierbei wird die Technologief Frontier F_t berechnet, in diesem Fall der Streckenzug DAB . Die drei Beobachtungen D , A und B weisen ein Effizienzniveau von 1 auf ($\theta_D = \theta_A = \theta_B = 1$). Die technologische Leistungsfähigkeit der anderen Beobachtungen ist vergleichsweise schlechter. Für Beobachtung C wird dessen Leistungsfähigkeit gegenüber der Technologief Frontier radial gemessen, d. h. auf einem Fahrstrahl zum Ursprung. Die Maßzahl θ_C entspricht hier dem Streckenverhältnis OC'/OC .

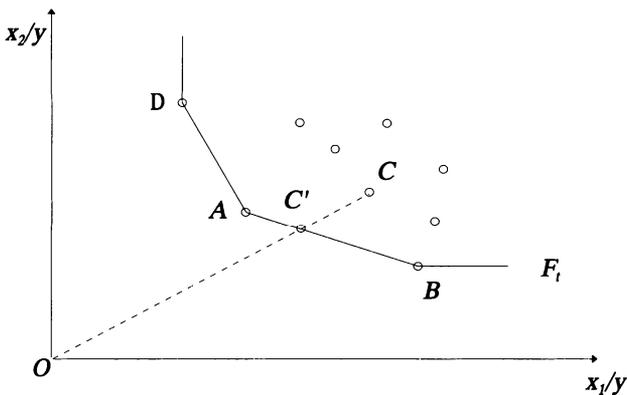


Abbildung 1: Technologie-Frontier und Effizienzmessung

Der n -Vektor λ_l enthält die Gewichtungsfaktoren derjenigen *best-practice*-Beobachtungen, mit welchen die Beobachtung l verglichen wird. Ist die Beobachtung l *best-practice* ($\theta_l = 1$), dann enthält der Vektor λ_l an der l -ten Stelle den Wert 1 und ansonsten 0. Bei $\theta_l < 1$ hingegen findet man an der l -ten Stelle des Vektor λ_l den Wert 0 und zumindest an einer anderen Stelle $i \neq l$ einen positiven Wert. Im Beispiel der Abbildung 1 stellen die Beobachtungen A und B die Referenzbeobachtungen zu C dar. Entsprechend weisen in Vektor λ_C die Stellen λ_C^A und λ_C^B positive Werte auf, während alle anderen 0 sind. Der Wert dieser Faktoren gibt das Gewicht an, mit dem die Referenzbeobachtungen A und B jeweils in die Konstruktion von C' eingehen.

Mit Hilfe der λ -Vektoren können Gruppen von Beobachtungen identifiziert werden, die Ähnlichkeiten bezüglich der Produktionsstruktur aufweisen. Diese

Gruppen unterscheiden sich in den Inputintensitäten, Outputintensitäten oder Inputkoeffizienten.

Über Programm (3) erhält man demnach zwei Indikatoren für Heterogenität: Sie beschreiben zum einen die Asymmetrie und zum anderen die Varietät der technologischen Leistungsfähigkeit innerhalb einer Gruppe von Beobachtungen:

1. Kennzahl θ ist ein Indikator der Leistungsfähigkeit im Sinne von *best-practice* bzw. *below-best-practice*; hierdurch wird die *Asymmetrie* innerhalb der Beobachtungen bestimmt.
2. Über die Anzahl der *best-practice*-Beobachtungen sowie deren Gewichtung innerhalb der λ -Vektoren lassen sich Gruppen ähnlicher Produktionsstruktur identifizieren; hierdurch läßt sich die *Varietät* innerhalb der Beobachtungen abbilden.

Über eine Modifikation in Programm (3) können die beiden angesprochenen Strukturen noch weitergehend analysiert werden. Für die Varietät innerhalb der Beobachtungen läßt sich – wie bereits aus der Definition ersichtlich – kein Leistungsvergleich im Sinne von „besser“ oder „schlechter“ durchführen. Die jeweiligen *best-practice*-Beobachtungen weisen alle einen Wert $\theta = 1$ auf. Durch eine einfache Veränderung in Programm (3) (Andersen/Petersen 1989) kann allerdings eine Art Quantifizierung dieser Varietät vorgenommen werden. Die Modifikation setzt an den Nebenbedingungen an; dort nimmt man einfach die zu untersuchende Beobachtung l aus der Gruppe der möglichen Vergleichsbeobachtungen heraus:

$$(4) \quad \begin{array}{l} \min \theta_l \\ \text{NB :} \\ \quad Y_{-l} \lambda_l \geq Y_l \\ \theta_l X_l - X_{-l} \lambda_k \geq 0 \\ \quad \lambda_l \geq 0 \end{array}$$

Die Matrizen Y_{-l} und X_{-l} enthalten die Outputs und Inputs aller n Beobachtungen außer der Beobachtung l . Die hierbei berechnete Effizienzkennzahl ist θ_l , die auch als Super-Effizienz bezeichnet wird (Andersen/Petersen 1989). Für alle *below-best-practice* Beobachtungen ist deren Wert identisch zum Wert θ_l in Programm (3). Für alle *best-practice* Beobachtungen hingegen gilt $\theta_l \geq 1$. Die Differenz $\theta_l - 1$ läßt sich als Effizienzpuffer oder als technologischer Vorsprung interpretieren; $\theta_l = 1,5$ bedeutet beispielsweise, daß Beobachtung l einen Vorsprung oder Effizienzpuffer von 50% aufweist. Beobachtung l würde erst dann als *below-best-practice* eingestuft, wenn seine Effizienz um mehr als 1/3 reduziert würde. θ_l ist in diesem Sinne als ein Maß zu verstehen, mit dessen Hilfe man auch solche Beobachtungen miteinander vergleichen kann, welche nach Programm (3) unvergleichbar sind (Cantner/Westermann (1998)).

Abbildung 2 zeigt exemplarisch, wie man mit Programm (4) zur Bewertung von Beobachtung A kommt. Die Referenz-Frontier für A ist hier DB und θ_A^* entspricht

dem Streckenverhältnis OA'/OA , dessen Wert ganz offensichtlich größer als 1 ist. A könnte sich hier auf dem Fahrstrahl OA solange verschlechtern bis A' erreicht ist, ohne dabei *below-best-practice* zu werden.⁶

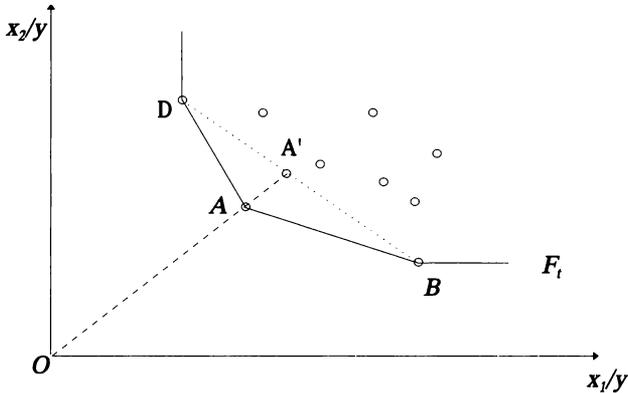


Abbildung 2: Vergleich der *best-practice* Beobachtungen

Die bisher diskutierten Frontier-Konzepte basierten auf der Annahme, daß die verwendete Produktionstechnologie konstante Skalenerträge aufweist. Man mag nun einwenden, daß in vielen Sektoren die technologische Leistungsfähigkeit auch von der Größe der Beobachtung beeinflusst wird. Um dieser Vorstellung gerecht zu werden, muß man die oben angewendeten Programme derart umformen, daß die Technologie-Frontier auch Formen variabler Skalenerträge annehmen kann. Dies erreicht man durch eine zusätzliche Nebenbedingung, die besagt, daß sich die Summe der Elemente des λ_l -Vektors zu 1 addieren müssen. Mit e^T als einem n -Vektor ($n-1$ -Vektor bei der Super-Effizienz), der nur die Elemente 1 enthält, führt dies zu folgender Formulierung:

$$(5) \quad \begin{aligned} & \min \theta_l^v \\ & NB : \\ & \quad Y \lambda_l \geq Y_l \\ & \quad \theta_l^v X_l - X \lambda_l \geq 0 \\ & \quad e^T \lambda_l \geq 1 \end{aligned}$$

Die Kennzahl der technologischen Leistungsfähigkeit, die man auf diese Art und Weise erhält, wird mit θ_l^v bezeichnet (mit „v“ für variable Skalenerträge). Der Bezug zur Analyse mit konstanten Skalenerträgen ist folgendermaßen: $\theta_l^v \geq \theta_l$.

⁶ In Cantner/Westermann (1998) ist unterschieden, ob der Vergleich der *best-practice* Beobachtungen nur innerhalb dieser Gruppe (ohne Beobachtung l) stattfindet oder aber innerhalb der Gruppe aller Beobachtungen (wieder ohne Beobachtung l selbst).

Das Verhältnis dieser beiden Kennziffern $\sigma_l = \theta_l/\theta_l^y$ gibt diejenige relative technologische Leitungsfähigkeit an, welche allein auf die Größe der Beobachtung zurückzuführen ist. Entsprechend stellt dann θ_l^y die relative Leistungsfähigkeit dar, die unabhängig von der Größe der Beobachtung ist.

3.3 Strukturelle Dynamik: Lokaler Fortschritt, Catching-up und Falling-Behind

Die weiteren Ausführungen betreffen Anforderung 4, welche sich auf die Strukturdynamik und deren Erfassung bezieht. Für die dynamische Analyse technologischer Strukturen ist es nicht möglich, die in der statischen Strukturanalyse gewonnenen Ergebnisse einfach über den Zeitablauf zu verfolgen. Der Grund hierfür findet sich darin, daß die statischen Effizienzergebnisse als relative Aussagen, bezogen auf die best-practice Technologie-Frontier, zu verstehen sind. Für eine dynamische Analyse müssen daher die Ergebnisse einzelner nacheinander abfolgender Perioden zueinander in Beziehung gesetzt werden. Dies geschieht, indem man die Beobachtungen der Periode t sowohl mit der Technologie-Frontier der Periode $t - 1$ wie auch mit derjenige der Periode $t + 1$ vergleicht. Führt man dies für alle Perioden durch, so lassen sich die strukturellen Veränderungen im Zeitablauf verfolgen.

Die gewählte Verfahrensweise basiert auf dem sogenannten Malmquist-Produktivitätsindex, welcher die Produktivitätsveränderung einer Beobachtung zwischen zwei Zeitpunkten mißt. Eine spezifische Eigenschaft dieser Indexzahl ist es, daß sie sich zerlegen läßt in einen Term, der den technologischen Fortschritt (oder Rückschritt) an der Technologie-Frontier angibt, und einen zweiten Term, der Auskunft über catching-up bzw. falling-behind Prozesse gibt. Der Malmquist-Index findet seine theoretische Fundierung in Arbeiten von *Malmquist* (1953) und *Moorsten* (1961). Im Rahmen der Produktivitätsmessung wurde dieser Index von *Caves/Christensen/Diewert* (1982a, 1982b) eingesetzt. *Färe/Grosskopf/Lindgren/Roos* (1994) haben gezeigt, wie die Effizienzkennzahl θ bei der Berechnung des Malmquist-Index eingesetzt werden kann.

Die Berechnungsweise des Malmquist-Index sei anhand eines Beispiels zweier Technologie-Frontiers F_t und F_{t+1} der Perioden t und $t + 1$ erklärt. Dieses Beispiel ist in Abbildung 3 dargestellt, in welcher für die Beobachtung A der Produktivitätsfortschritt von Periode t zu Periode $t + 1$ und damit die Veränderung A_t nach A_{t+1} bestimmt wird.

Zunächst werden die Beobachtungen A_t und A_{t+1} mit der Technologie-Frontier F_t verglichen und die Ergebnisse zueinander ins Verhältnis gesetzt. Man erhält Ob/OA_t , dividiert durch Od/OA_{t+1} ; ist dieser Quotient kleiner als 1, dann hat die Produktivität von A zugenommen. In einem zweiten Schritt werden A_t und A_{t+1} gegenüber der Technologie-Frontier F_{t+1} bewertet und aus den Ergebnissen wieder der Quotient gebildet, hier Oc/OA_t , dividiert durch Oe/OA_{t+1} . Wiederum gilt bei

einem Wert des Quotienten kleiner als 1, daß die Produktivität von A zugenommen hat. Da man zwei Maße für die Produktivitätsentwicklung berechnet hat, die nicht notwendigerweise identisch sind, berechnet man in einem letzten Schritt das geometrische Mittel. Der resultierende Index, der Malmquist-Produktivitätsindex für Beobachtung A , lautet dann:

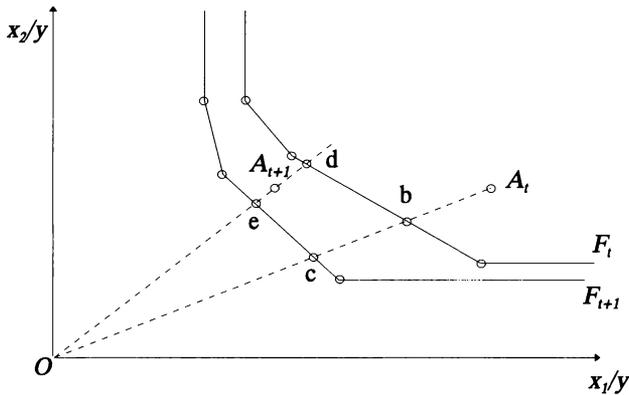


Abbildung 3: Malmquist Produktivitätsindex

$$(6) \quad M_A^{t+1} = \left(\frac{Ob/OA_t \quad Oc/OA_t}{Od/OA_{t+1} \quad Oe/OA_{t+1}} \right)^{0,5}$$

Mit (6) ist die Produktivitätsveränderung der Beobachtung A von t nach $t+1$ angegeben. In allgemeiner Form und unter Verwendung der Effizienzkennzahl θ ist der Malmquist-Index wie folgt definiert:

$$M_i^{t+1} = \left(\frac{\theta_i^{t,t} \quad \theta_i^{t,t+1}}{\theta_i^{t+1,t} \quad \theta_i^{t+1,t+1}} \right)^{0,5}$$

$\theta_i^{t,s}$, $t, s \in T$, gibt die Effizienz der Beobachtung i in Periode t an, wenn als Vergleichsmaßstab die Technologie-Frontier der Periode s dient.⁷

Eine Eigenschaft des Malmquist-Index ist seine Zerlegbarkeit in einen Faktor, der den Fortschritt an der Technologie-Frontier erfaßt, und einen zweiten Faktor, der Auskunft über Catching-Up oder Falling-Behind gibt. Durch Umformung von (6) erhält man:

⁷ Die jeweiligen linearen Programme, um die verschiedenen θ -Maße zu berechnen, finden sich im Anhang.

$$\begin{aligned}
 M_l^{t+1} &= \left(\frac{\theta_l^{t,t}}{\theta_l^{t+1,t}} \frac{\theta_l^{t,t+1}}{\theta_l^{t+1,t+1}} \right)^{0,5} \\
 (7) \quad &= \left(\frac{\theta_l^{t,t}}{\theta_l^{t+1,t+1}} \right) \left(\frac{\theta_l^{t+1,t+1}}{\theta_l^{t+1,t}} \frac{\theta_l^{t,t+1}}{\theta_l^{t,t}} \right)^{0,5} \\
 &= \text{MC} \cdot \text{MT} .
 \end{aligned}$$

Die zweite Zeile in (7) weist die Zerlegung aus, mit MC als Veränderung der technologischen Lücke und MT als technologischen Fortschritt an der Technologie-Frontier. MC gibt an, ob sich der Abstand der Beobachtung l zur Technologie-Frontier verringert hat oder nicht. Entsprechend ist $\text{MC} < 1$ ($\text{MC} > 1$) als catching-up (falling-behind) zu interpretieren. Die Veränderung der Technologie-Frontier (MT) wird als technologischer Fortschritt bezeichnet. Dieser wird zweimal gemessen, einmal auf einem Fahrstrahl mit der Faktorintensität wie in Periode t und ein zweites Mal auf einem Fahrstrahl mit der Faktorintensität wie in Periode $t + 1$. Aus den beiden Werten berechnet man wieder das geometrische Mittel. Bei technologischem Fortschritt (Rückschritt) an der Technologie-Frontier findet man $\text{MT} < 1$ ($\text{MT} > 1$).

Für Beobachtung A in Abbildung 3 sieht die Zerlegung folgendermaßen aus:

$$\begin{aligned}
 M_A^{t+1} &= \left(\frac{Ob/OA_t}{Oe/OA_{t+1}} \right) \left(\frac{Oe/OA_{t+1}}{Od/OA_{t+1}} \frac{Oc/OA_t}{Ob/OA_t} \right)^{0,5} \\
 &= \text{MC} \quad \text{MT} .
 \end{aligned}$$

Der erste Term in Klammern enthält die Veränderung des relativen Abstands der Beobachtung A gegenüber seiner jeweiligen Technologie-Frontier. Der zweite Ausdruck in Klammern steht für die (geometrisch gemittelte) Veränderung der für A relevanten Teilfrontier. Im Beispiel sind beide Terme offensichtlich kleiner als 1, so daß A die Technologielücke gegenüber der Technologie-Frontier verringern konnte und das für A relevante Teilstück der Frontierfunktion selbst Fortschritt erfährt.

Wie man aus Abbildung 3 bereits entnehmen kann, ist der durch (6) gemessene Fortschritt lokal in dem Sinne, daß er für jede Beobachtung spezifisch ist. Der lokale Fortschritt ist dabei davon abhängig, (a) wie eine Beobachtung zur Technologie-Frontier aufschließen kann und (b) wie die Technologie-Frontier sich verändert. Dabei ist die Veränderung der Technologie-Frontier ebenfalls lokal in dem Sinne, daß sich nur der für Beobachtung l relevante Teil (angegeben durch die Elemente des λ -Vektors) der Frontierfunktion verändert. Darüber hinaus lassen sich die *best-practice*-Beobachtungen bei der dynamischen Analyse miteinander vergleichen. Hierzu betrachtet man die jeweiligen MT-Werte, welche die Leistungsfähigkeit derjenigen *best-practice*-Beobachtungen angeben, die die Technologie-Frontier nach außen zu verschieben.

4. Zusammenfassung

Die Diskussion in diesem Beitrag ist einer allgemeinen Methodik gewidmet, mit deren Hilfe sich technologische Strukturen innerhalb einer Gruppe von Akteuren sowie Strukturveränderung in der Zeit bestimmen lassen. Hierzu sind in Abschnitt 2 aus der konzeptionellen Diskussion der Heterogenität einige Anforderungen an die empirische Methodik abgeleitet worden. Es zeigt sich, daß eine möglichst wenig restringierte Methode zur Bestimmung der totalen Faktorproduktivität von Beobachtungen diesen Anforderungen genügen kann und sich damit

- (1) technologische Heterogenität systematisieren und
- (2) ihre Veränderung im Zeitablauf verfolgen läßt.

Abschnitt 3 spezifiziert die Methode, in dem dort zunächst die nicht-parametrische Bestimmung von Frontierfunktionen diskutiert wird, welche es erlaubt, Strukturen innerhalb einer Gruppe von Beobachtungen zu identifizieren. Als vorteilhaft hat es sich hierbei erwiesen, daß man auf die Annahme einer für alle Beobachtungen identischen Produktionsfunktion – und einer dadurch implizierten technologischen Homogenität – verzichten kann. Für die Analyse der Strukturveränderungen wird der Malmquist-Produktivitätsindex verwendet. Dieser ist geeignet, lokale Veränderungen in der technologischen Leistungsfähigkeit der Beobachtungen zu messen und ersetzt dadurch Verfahren, bei denen Fortschritt als eine alle Beobachtungen umfassende Trendvariable ermittelt wird.

Heterogene Strukturen und deren Veränderung können mit Hilfe dieses Verfahrens folgendermaßen charakterisiert werden:

- (1) Unterschiede in der Leistungsfähigkeit in der Anwendung einer bestimmten Produktionstechnik.
- (2) Unterschiede in der Anwendung der Art von Produktionstechniken.
- (3) Unterschiede in der Intensität lokalen Fortschritts.
- (4) Unterschiede in der Art des Fortschritts, d. h. technologischer Fortschritt und Catching-up oder technologischer Rückschritt und Falling-behind.

Ohne Zweifel birgt die diskutierte Vorgehensweise noch einige Erweiterungsmöglichkeiten. Es sei hier nur auf stochastische Elemente, die Konzeption der Frontierfunktion (Cantner/Hanusch 1996), die Beziehung zwischen verschiedenen Aggregationsebenen, die Berücksichtigung von neuen Produkten und Produktionsfaktoren u. a.m. hingewiesen.

Auf Möglichkeiten und Ergebnisse der empirischen Umsetzung des angesprochenen Verfahrens konnte im Rahmen dieses Beitrags nicht eingegangen werden. Hierzu sei verwiesen auf beispielsweise *Färe/Grosskopf/Norris/Zhang* (1994), *Bernard/Cantner/Westermann* (1996), *Cantner/Hanusch/Westermann* (1997), *Bernard/Cantner* (1999), *Krüger/Cantner/Hanusch* (2000). Darüber hinaus steht man bei der empirischen Umsetzung auch vor der Aufgabe, die gefundenen Struk-

turen mit Kennzahlen zur technologischen Veränderung in Beziehung zu setzen. Hierzu sei auf *Krüger/Cantner/Hanusch* (2000), *Bernard/Cantner* (1998) und *Cantner* (1996) verwiesen.

Anhang

Allgemein schreiben sich die linearen Programme zur Bestimmung des Malmquist-Produktivitätsindex wie folgt:

$$\begin{aligned} \min \quad & \theta_l^{t,s} \\ \text{s.t. :} \quad & Y^s \lambda_l \geq Y_l^t \\ & \theta_l X_l^t - X^s \lambda_l \geq 0 \\ & \lambda_l \geq 0 \end{aligned}$$

t steht hier für die Periode, in der Beobachtung l gemacht wird und s für die Periode der jeweiligen Frontierfunktion.

Literatur

- Andersen, P./Petersen, N.C.* (1989): A Procedure for Ranking Efficient Units in Data Envelopment Analysis, Dep. of Management, Odense University, no.11, 1989.
- Antonelli, C.* (1994): The Economics of Localized Technological Change and Industrial Dynamics, Dordrecht et al.: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- Atkinson, A./Stiglitz, J.E.* (1969): A New View of Technological Change, *Economic Journal*, vol.79, 573–78.
- Banker, R.D./Charnes, A./Cooper, W.W.* (1984): Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis, *Management Science* 30 (1984), 1078–92.
- Bernard, J./Cantner, U.* (1999): French Regional Performance and Variety – A Non-Parametric Frontier Approach, in: P.Y. Badillo/J.C. Paradi (eds.), *La méthode DEA – analyse des performances*, Paris: Hermes Science Publications, 1999, 255–273.
- Bernard, J./Cantner, U.* (1998): Retombées technologiques, effets de rattrapage et dynamique intra-sectorielle, in: J. Bernard/M. Catin (eds.), *Les Conditions Économiques du Changement Technologique*, Paris, Montreal: L’Harmattan, 1998, 95–116.
- Bernard, J./Cantner, U./Westermann, G.* (1996): Technological Leadership and Variety – A Data Envelopment Analysis for the French Machinery Industry, *Annals of Operations Research* 68, 1996, 361–377.
- Cantner, U.* (1996): Heterogenität und technologische Spillovers – Grundelemente einer ökonomischen Theorie des technologischen Fortschritts, *Habilitationsschrift*, Universität Augsburg, 1996.

- Cantner, U./Hanusch, H.* (1996): Intrasektorale technologische Dynamik, in: E. Helmstädter/G. Poser/H.J. Ramser (Hrsg.), Beiträge zur angewandten Wirtschaftsforschung, Festschrift K.H. Oppenländer, Berlin: Duncker&Humblot, 1996, 187 – 216.
- Cantner, U./Hanusch, H./Westermann, G.* (1997): Technological Performance and Variety – The Case of the German Electronics Industry, in: K. Nielsen/B. Johnson (eds.), Institutions and Change – New Perspectives on Markets, Firms and Technology, Aldershot: Edward Elgar, 1997, 116 – 140.
- Cantner, U./Westermann, G.* (1998): Localized Technological Progress and Industrial Dynamics – An Empirical Approach, *Economics of Innovation and New Technology* 6, 1998, 121 – 45.
- Caves, D.W./Christensen, L.R./Diewert, W.E.* (1982a): Multilateral Comparisons of Output, Input and Productivity Using Superlative Index Numbers, *Economic Journal* 92, 1982, 73 – 86.
- Caves, D.W./Christensen, L.R./Diewert, W.E.* (1982b): The Economic Theory of Index Numbers of the Measurement of Input, Output and Productivity, *Econometrica* 50, 1982, 1393 – 1414.
- Chang, K.-P./Guh, Y.-Y.* (1991): Linear Production Functions and the Data Envelopment Analysis, *European Journal of Operations Research* 52, 1991, 215 – 23
- Charnes, A./Cooper, W.W.* (1962): Programming with Linear Fractional Functionals, *Naval Research Logistics Quarterly*, vol.9, 181 – 86.
- Charnes, A./Cooper, W.W./Rhodes, E.* (1978): Measuring the Efficiency of Decision Making Units, *European Journal of Operational Research*, vol.2, 1978, 429 – 44.
- David, P.* (1975): *Technical Choice, Innovation and Economic Growth*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Dosi, G.*, (1988): Sources, Procedures, and Microeconomic Effects of Innovation, *Journal of Economic Literature* XXVI, 1988, 1120 – 71.
- Färe, R./Grosskopf, S./Lindgren, B./Roos, P.* (1994): Productivity Development in Swedish Hospitals: A Malmquist Output Index Approach, in Charnes et al. (1994), 253 – 72.
- Färe, R./Grosskopf, S./Lovell, C.A.K.* (1994): *Production Frontiers*, Cambridge, MA: Cambridge University Press, 1994.
- Färe, R./Grosskopf, S./Norris, M./Zhang, Z.* (1994): Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries, *American Economic Review* 84(1), 1994, 66 – 83.
- Grupp, H.* (1997): *Messung und Erklärung des Technischen Wandels*, Heidelberg: Springer-Verlag, 1997.
- Krüger, J./Cantner, U./Hanusch, H.* (2000): Total factor productivity, the East Asian Miracle and the World Production Frontier, *Weltwirtschaftliches Archiv* 136, 2000, 111 – 36.
- Malmquist, S.* (1953): Index Numbers and Indifference Surfaces, *Trabajos de Estadística* 4, 1953, 209 – 42.
- Moorsteen, R.H.* (1961): On Measuring Productive Potential and Relative Efficiency, *Quarterly Journal of Economics* 75, 1961, 451 – 67.

- Pyka, A. / Krüger, J. / Cantner, U. (1999): Twin-Peaks – What the knowledge based approach can say about the dynamics of the world income distribution, paper prepared for the European Meeting on Applied Evolutionary Economics, June 7–9, 1999, Grenoble.*
- Rosenberg, N. (1976): Perspectives on Technology, Cambridge: Cambridge University Press, 1976.*
- Saviotti, P.P. (1996): Technological Evolution, Variety and the Economy, Edward Elgar, 1996.*