

Klodt, Henning

Article — Digitized Version

Kapitalgebundener technischer Fortschritt: ein Überblick

Weltwirtschaftliches Archiv

Provided in Cooperation with:

Kiel Institute for the World Economy – Leibniz Center for Research on Global Economic Challenges

Suggested Citation: Klodt, Henning (1985) : Kapitalgebundener technischer Fortschritt: ein Überblick, Weltwirtschaftliches Archiv, ISSN 0043-2636, Mohr, Tübingen, Vol. 121, Iss. 1, pp. 151-170

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/3299>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Kapitalgebundener technischer Fortschritt: Ein Überblick

Von

Henning Klodt

Most casual students of the problem seem to believe that the major part of observed technological progress is the embodied type, but there is very little solid information on this point.

Solow [1962a, S. 216]

Eine rege Investitionstätigkeit der Unternehmen verbessert nicht nur die Ausstattung der Arbeitsplätze mit Sachkapital, sondern fördert zugleich die Anwendung neuen technischen Wissens auf breiter Front. Seit den frühen siebziger Jahren ist aber in allen wichtigen Industrieländern ein ausgeprägter Rückgang der Investitionstätigkeit eingetreten. Seine Folgen für die Effizienz der Produktion werden explizit erfaßt in Modellen mit kapitalgebundenem Fortschritt, die allerdings in den letzten Jahren stark in Vergessenheit geraten sind. Ein Aufarbeiten der über zwanzigjährigen Diskussion um dieses Konzept könnte dazu beitragen, einige strukturelle Aspekte der gegenwärtigen Wachstums- und Produktivitätsschwäche aufzuhellen. Dabei soll nicht nur eine Übersicht der wachstumstheoretischen Literatur zu diesem Thema gegeben werden, sondern es geht nicht zuletzt um die Möglichkeiten zur Weiterentwicklung vorhandener Ansätze, die sich aus einer Verknüpfung des Konzepts des kapitalgebundenen Fortschritts mit den Ergebnissen der mikroökonomischen Innovationsforschung ergeben.

Der technische Fortschritt kann als kapitalgebunden¹ bezeichnet werden, wenn die jeweils neueste Technik nur in den gerade produzierten Kapitalgütern enthalten ist, in den älteren Jahrgängen (*vintages*) dagegen nicht. Das Alter eines Kapitalguts ist damit entscheidend für seine Effizienz. Im Gegensatz zu den Modellen mit ungebundenem Fortschritt besteht also in *vintage*-Modellen stets eine mehr oder weniger ausgeprägte Diskrepanz zwischen der bestmöglichen und der durchschnittlich angewandten Technologie. Bei ungebundenem Fortschritt wird jede technische Verbesserung sofort von allen übernommen; bei kapitalgebundenem Fortschritt kann es dagegen günstiger sein, mit der alten Technik weiterzuarbeiten, denn die Einführung des neuen Wissens in die Produktion ist nicht mehr kostenlos, sondern erfordert die Anschaffung neuer Produktionsanlagen.

Während bei ungebundenem technischen Fortschritt gar keine Verknüpfung zwischen Investitionstätigkeit und technologischem Niveau der Produktion besteht, wird bei kapitalgebundenem Fortschritt zumindest kurzfristig eine Abhängigkeit der Diffusion neuer Technologien von Veränderungen der Investitionsquote unterstellt. Längerfristig ist die technologische Effizienz jedoch auch bei den meisten dieser Modelle unabhängig vom Investitionsverhalten. Es soll gezeigt werden, daß dieses Ergebnis ganz maßgeblich von den Annahmen darüber abhängt, welche Kombinationsmöglichkeiten

¹ v. Weizsäcker [1966] führte diesen Begriff in den deutschen Sprachgebrauch ein.

zwischen neuen und alten Techniken bestehen: Die vorliegenden Ansätze zum kapitalgebundenen Fortschritt gehen durchweg davon aus, daß neue Investitionsgüter nur (substitutiv) an die Stelle älterer treten können, nicht jedoch (komplementär) zum Nachrüsten und Modernisieren alter Anlagen einsetzbar sind. Möglicherweise sind aber die Schäden einer Investitionsschwäche für die Modernisierung bestehender Anlagen nicht weniger wichtig und vor allem dauerhafter als ihre Auswirkungen auf die Altersstruktur des Anlagevermögens, so daß die Beeinträchtigung der technologischen Effizienz auch in *vintage*-Ansätzen nur unzureichend erfaßt wird.

I. Zur Entstehung von *vintage*-Ansätzen

Ökonomen zur Zeit der Klassiker hätte es wohl kaum verwundert, wenn mit sinkenden Investitionsquoten das Tempo der Effizienzsteigerung in einer Volkswirtschaft abnimmt, denn ihnen galt die Kapitalbildung als Voraussetzung einer vertieften Arbeitsteilung und damit als wichtigste Quelle wirtschaftlichen Wohlstands¹. Die neoklassische Wachstumstheorie dagegen lenkte das Augenmerk sehr stark auf den technischen Fortschritt, und zwar zunächst in seiner ungebundenen Form. Nicht nur im langfristigen Gleichgewicht, sondern auch im kurzfristigen Anpassungsprozeß bleibt der Wachstumsbeitrag der Sachinvestitionen in derartigen Modellen gering, denn – so wird argumentiert – die Produktionselastizität des Kapitals sei zu niedrig, als daß Verschiebungen bei der Investitionstätigkeit einen wesentlichen Teil der Veränderungen gesamtwirtschaftlicher Wachstumsraten erklären könnten².

Dieser Investitionspessimismus der Neoklassik wurde jedoch schon seit Beginn der sechziger Jahre aus den eigenen Reihen angegriffen, und zwar mit der Hypothese eines kapitalgebundenen technischen Fortschritts. Wenn – wie in diesen Modellen unterstellt – die Nutzung neuer Produktionstechniken erst durch die Installation neuer Kapitalgüter möglich wird, kommt der Investitionstätigkeit eine entscheidende Rolle bei der Realisierung der durch technischen Fortschritt eröffneten Wachstumspotentiale zu. Damit wurden, wie Phelps [1962] es ausgedrückt hat, die Investitionen mit der Technologie vermählt.

Modelle mit kapitalgebundenem Fortschritt wurden erstmals von Johansen [1959] und Solow [1960] formuliert. Ausgangspunkt ihrer Überlegungen war eine scheinbar paradoxe Beobachtung in der herkömmlichen Wachstumstheorie: Wird eine Produktionsfunktion mit ungebundener Fortschrittskomponente regressionsanalytisch ge-

¹ „The productive powers of the same number of labourers cannot be increased, but in consequence either of some addition and improvement to those machines and instruments which facilitate and abridge labour; or of a more proper division and distribution of employment. In either case an additional capital is almost always required“ [Smith, 1776, hier 1976, S. 364].

² Nach Denison [1979; 1980], der für seine Berechnungen einen einfachen produktionstheoretischen Ansatz mit ungebundenem technischen Fortschritt benutzt, ist der Rückgang des Sozialproduktszuwachses in den Vereinigten Staaten – von 2,6 vH pro Jahr zwischen 1948 und 1973 auf – 0,6 vH zwischen 1973 und 1976 – zu mehr als zwei Drittel durch Veränderungen einer unerklärten Restgröße, die den technischen Fortschritt repräsentieren soll, bewirkt worden. Der Beitrag rückläufiger Sachinvestitionen fällt dagegen bei ihm kaum ins Gewicht. – Ein weiteres aktuelles Beispiel für diese Argumentation liefert Bosworth [1982].

schätzt, ergibt sich für die Produktionselastizität des Kapitals durchweg ein deutlich höherer Wert, als aufgrund der Verteilungsquoten des Volkseinkommens zu erwarten wäre. Die Diskrepanzen sind derart kraß, daß Marktunvollkommenheiten oder Skalenerträge als Ursache kaum in Frage kommen; statt dessen liegt die Vermutung nahe, daß sich der Wachstumsbeitrag des Kapitals nicht allein auf die Substitution von Arbeit beschränkt und somit eine Fehlspezifikation des zugrundeliegenden Modells vorliegt [Solow, 1962b; Nelson, 1964]. Auch internationale Querschnittsanalysen lassen eine wesentlich engere Beziehung zwischen den Wachstumsraten und den Investitionsquoten der einzelnen Länder erkennen, als aufgrund neoklassischer Wachstumsmodelle mit ungebundenem Fortschritt zu vermuten wäre [vgl. z. B. Kaldor, 1961; Kendrick, 1981].

Bis in die heutige Zeit ist immer wieder versucht worden, die Relevanz des kapitalgebundenen Fortschritts empirisch zu bestätigen – die theoretische Diskussion um dieses Konzept ist jedoch seit Ende der sechziger Jahre weitgehend verstummt. Das mag einmal damit zusammenhängen, daß sich der Ansatz des *learning-by-doing* sowie der Humankapitalansatz, die beide unter dem Begriff des arbeitsgebundenen technischen Fortschritts eingeordnet werden können, in den Vordergrund geschoben hatten¹. Vor allem aber war die Frage, inwieweit die Durchsetzung neuer Technologien bei unzureichender Investitionstätigkeit behindert wird, in Zeiten allgemein hoher Investitionsquoten wohl kaum relevant.

II. Drei Grundmodelle

Die vorliegenden *vintage*-Ansätze lassen sich grob in drei Gruppen einteilen, die verschiedene Annahmen darüber beinhalten, wie stark die Kapitalintensität der Produktionsprozesse auf Veränderungen der relativen Faktorpreise reagieren kann. Produktionstechniken, deren Faktoreinsatzverhältnis rein technisch definiert ist, werden mit unverformbarem, hartgebranntem Ton (*clay*) verglichen, anpassungsfähige Techniken mit Kitt (*putty*), der sich in jede gewünschte Form kneten läßt². Wird außerdem zwischen Substitutionalität ex ante und ex post unterschieden, ergeben sich folgende Versionen:

- Die Besetzung der Produktionsanlagen mit Arbeitskräften kann sowohl bei neuen als auch bei alten Jahrgängen von Kapitalgütern beliebig variiert werden (*putty – putty*).
- Bei neuen Anlagen kann die Kapitalintensität frei gewählt werden; sind sie jedoch einmal installiert, ist keine Änderung des Arbeitseinsatzes an den einzelnen Jahrgängen mehr möglich (*putty – clay*).
- Das Faktoreinsatzverhältnis ist auch bei neu zu produzierenden Anlagen technisch fest vorgegeben. Für eine wachsende Wirtschaft wird zusätzlich unterstellt, daß die Kapitalintensität der jeweils neuesten Anlagen fortlaufend steigt – unabhängig davon, wie sich die relativen Faktorpreise entwickeln (*clay – clay*).

¹ Wegbereiter der *learning-by-doing*-Theorie waren Arrow [1962] und Kaldor [1961]. Beim Humankapitalansatz sind insbesondere Mincer [1958], Schultz [1960] und Denison [1962] zu nennen. Eine Verknüpfung beider Ansätze liefern Kaldor und Mirrlees [1962].

² Diese Metapher geht auf Phelps [1963] zurück.

Die Konsequenzen dieser unterschiedlichen Modellkonstruktionen zeigen sich vor allem beim Übergang zwischen zwei Gleichgewichtszuständen¹. In der Literatur werden die Effekte einer veränderten Investitionstätigkeit durchweg am Beispiel einer exogen erhöhten Sparneigung diskutiert. Davon soll auch hier nicht abgewichen werden. Zur Vereinfachung soll weiterhin unterstellt werden, daß die physische Lebensdauer von Kapitalgütern unbegrenzt sei; ihr Ausscheiden aus dem Produktionsprozeß wird dann allein durch Rentabilitätsabwägungen bestimmt.

1. *Putty-putty*

Im *putty-putty*-Fall sorgt die Konkurrenz auf dem Arbeitsmarkt dafür, daß zur Inbetriebnahme neuer Anlagen gerade so viele Arbeitskräfte von bestehenden Anlagen abgezogen werden, daß die Grenzproduktivität der Arbeit an allen Jahrgängen gleich ist. Je älter eine Anlage wird, desto weniger rentable Arbeitsplätze stellt sie bereit, denn sie konkurriert mit immer mehr und immer effizienteren neuen Anlagen. Da an neuen Anlagen im Zuge des technischen Fortschritts ständig höhere Löhne gezahlt werden können, muß auch bei bereits installierten Anlagen die Grenzproduktivität der Arbeit kontinuierlich steigen. Die technologische Effizienz alter Anlagen wird aber durch den technischen Fortschritt nicht berührt; also muß die Grenzproduktivität der Arbeit durch Abzug von Arbeitskräften – durch eine steigende Kapitalintensität – erhöht werden. Je älter ein Kapitalgut ist, desto kapitalintensiver wird mit ihm produziert. Je rascher die Löhne steigen, desto rascher steigt auch die Kapitalintensität jedes einzelnen Jahrganges [Solow, 1960; 1962b]. Endgültiges Verschrotten gibt es nicht; statt dessen steigt die Kapitalintensität alter Anlagen bis ins Unendliche, und ihre Kapitalproduktivität sowie der mit ihnen verbundene Arbeitseinsatz streben gegen Null. Im Gleichgewicht ist die Verteilung der Arbeitskräfte auf die einzelnen Jahrgänge allein durch das Tempo des technischen Fortschritts bestimmt und im Zeitablauf konstant [Phelps, 1962; Matthews, 1964; Phelps, Yaari, 1964].

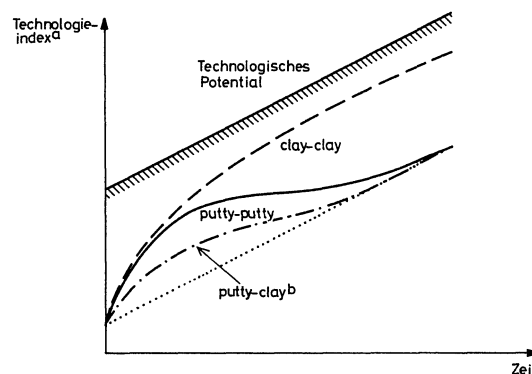
Ein Investitionsschub (der durch eine erhöhte Sparneigung und eine daraus folgende Zinssenkung ausgelöst wird) führt zu einem verstärkten Abzug von Arbeitskräften bei allen Jahrgängen, bis die Grenzproduktivitäten an allen Arbeitsplätzen wieder ausgeglichen sind. Das erfordert eine überproportionale Verminderung des Arbeitseinsatzes an den ohnehin schwach besetzten älteren Jahrgängen, denn an den Anlagen mit geringer Effizienz kann die Arbeitsproduktivität nur mit einer stärkeren Kapitalintensivierung erhöht werden als an jüngeren Anlagen. So kommt es zunächst zu einer raschen Verringerung der Lücke zwischen bestmöglicher und durchschnittlich angewandter Technologie². Wird die erhöhte Investitionsquote auch in den

¹ Als gleichgewichtig soll eine Situation bezeichnet werden, in der Produktion und Arbeitsangebot mit konstanter Rate wachsen, die Investitionsquote unverändert bleibt und der technische Fortschritt die Effizienz der jeweils neuesten Kapitalgüter mit einer konstanten Rate in der Zeit erhöht. Letzteres ist der Fall des Solow-neutralen (kapitalvermehrenden) Fortschritts [vgl. Solow, 1963; Hahn, Matthews, 1965]. Im übrigen müssen selbstverständlich die Harrod-Domar-Konsistenzbedingungen erfüllt sein, auch wenn sie in *vintage*-Modellen zuweilen eine andere Gestalt annehmen als in einfachen Wachstumsmodellen (für den *clay-clay*-Fall siehe dazu Solow [1970]).

² Strittig ist in der Literatur geblieben, woran diese Imitationslücke gemessen werden soll. Phelps [1962] argumentiert allein mit dem Durchschnittsalter der Produktionsanlagen, während Matthews [1964] ein – mit der Anzahl der an den einzelnen Jahrgängen eingesetzten Arbeitskräfte –

folgenden Jahren beibehalten, setzt sich dieser Modernisierungsprozeß zunächst noch fort. Schon bald wird jedoch ein Zeitpunkt erreicht sein, in dem die starken Investitionsjahrgänge selbst ein unterdurchschnittliches technologisches Niveau verkörpern¹, so daß sich die Imitationslücke wieder vergrößert. Da – wie oben dargestellt – die Verteilung der Arbeitskräfte und damit auch der Produktion langfristig unabhängig von der Investitionsquote ist, nähert sich die Imitationskurve asymptotisch wieder ihrem alten Expansionspfad.

Potentielle und durchschnittlich angewandte Technologie nach einer dauerhaften Erhöhung der Investitionsquote in verschiedenen vintage-Modellen



^a Mit den Produktionsanteilen gewichtete Effizienz der Produktionsanlagen (logarithmischer Maßstab). – ^b Zur Rolle der Substitutionselastizität im *putty-clay*-Fall siehe Erläuterung im Text.

Dieser Verlauf ist im Schaubild schematisch dargestellt. Dabei gibt die obere Gerade an, wie sich die technologische Effizienz der jeweils neuesten Anlagen erhöht. Unterstellt ist eine konstante Rate Solow-neutralen Fortschritts. Für das *putty-putty*-Modell ist ebenso wie für die beiden anderen Modelle die durchschnittliche Effizienz aller genutzten Anlagen abgebildet; der Abstand dieser Imitationskurven zum technologischen Potential stellt die Imitationslücke dar. Da es sich um einen logarithmischen Maßstab handelt, geben gleiche Abstände gleiche Relationen zwischen bestmöglicher und durchschnittlich realisierter Technologie wieder. Das Schaubild zeigt, daß es im *putty-putty*-Fall nur vorübergehend möglich ist, mit einer erhöhten Investitionsquote die Produktionsprozesse zu modernisieren.

gewichtetes Durchschnittsalter vorschlägt [dagegen: Phelps, Yaari, 1964]. Einleuchtender erscheint es aber, die verschiedenen Kapitalgüter-Jahrgänge mit ihren Anteilen an der Produktion zu gewichten, denn letztlich geht es um das technologische Niveau der Produktion und nicht der Arbeitsplätze.

¹ „Large investments today will present us with a large amount of old equipment in the future“ [Phelps, 1962, S. 553].

2. Putty-clay

Bei Substitutionalität ex ante und Limitationalität ex post ist wegen der technischen Restriktionen kein Ausgleich der Grenzproduktivitäten zwischen den einzelnen Jahrgängen möglich; die Produktivität der Arbeit ist an den ältesten Anlagen am niedrigsten. Diese Produktivität bestimmt zugleich den Lohn; an allen jüngeren Jahrgängen werden „Quasi-Renten“ erzielt [Johansen, 1959; Salter, 1960; Solow, 1962a]. Die für die neuen Kapitalgüter benötigten Arbeitskräfte werden von den jeweils ältesten Anlagen abgezogen, die dann wegen ökonomischer Obsoleszenz stillgelegt werden. Hier ist – im Gegensatz zu *putty-putty* – die Kapitalintensität um so höher, je jünger die Anlagen sind. Wie lange ein Kapitalgut genutzt werden kann, hängt im Gleichgewicht allein von den Lohnsteigerungen und damit von der Rate des technischen Fortschritts ab. Da sich die Lebensdauer nicht ändert, muß bei konstantem Arbeitsangebot die Zahl der Arbeitskräfte an allen Kapitalgüterjahrgängen gleich sein [Massell, 1962a; Phelps, 1963; Matthews, 1964].

Problematisch ist im *putty-clay*-Modell die Wahl der Kapitalintensität für neue Anlagen, denn sie muß eine rentable Produktion nicht nur bei den gegenwärtigen, sondern auch bei den höheren Löhnen der Zukunft ermöglichen. Um diese Entscheidung optimal fällen zu können, müssen alle künftigen Quasi-Renten schon heute bekannt sein und auf ihren Gegenwartswert abdiskontiert werden. Das setzt aber die Kenntnis der künftig zu zahlenden Löhne voraus. Je größer die für die nächsten Jahre erwarteten Lohnsteigerungen sind, desto kapitalintensiver werden die Anlagen schon heute ausgelegt. Als Hilfskonstruktion kann mit statischen [Solow, 1962a; Salter, 1965; Sheshinski, 1967] oder mit adaptiven Erwartungen [Matthews, 1964; Park, 1968] der Unternehmer bezüglich der Reallohnentwicklung gearbeitet werden.

Die bei einem Investitionsschub für neue Anlagen zusätzlich benötigten Arbeitskräfte werden allein von den ältesten Produktionsanlagen freigesetzt, die dann vorzeitig zu verschrotten sind. Wie stark der kurzfristige Modernisierungseffekt ausfällt, hängt hier von der Höhe der Substitutionselastizität zwischen Kapital und Arbeit ab¹. Je größer die Substitutionalität, desto stärker steigt infolge der Faktorpreisänderungen die Kapitalintensität der neuesten Anlagen, desto weniger Arbeitskräfte müssen von alten Anlagen abgezogen werden und desto weniger steigt die Produktion am neuesten Kapitaljahrgang. Im Grenzfall einer unendlich hohen Substitutionselastizität wird das zusätzlich Ersparte bereits bei unmerklich kleinen Faktorpreisänderungen in neue Kapitalgüter investiert, so daß gar keine alten Produktionsanlagen aus dem Markt gedrängt werden. Die Modernisierung der Produktion würde dann allein von der erhöhten Kapitalintensität der effizientesten Arbeitsplätze getragen; eine Umschichtung von Arbeitskräften fände nicht statt. Eine höhere Substitutionalität ex ante ist also gleichbedeutend mit einem geringeren Modernisierungseffekt einer gesteigerten Inve-

¹ Matthews [1964] weist zwar nach, daß auch im *putty-putty*-Modell die jahrgangsspezifische Verteilung der Arbeitskräfte mit der Substitutionselastizität zusammenhängt, sie bleibt aber langfristig unabhängig vom Niveau der Investitionsquote. Im Anpassungsprozeß entscheidet die Substitutionselastizität im *putty-putty*-Modell vorrangig darüber, wie stark die Faktorpreisänderungen und damit die Verteilungswirkungen infolge einer Kapitalintensivierung ausfallen; die Veränderung der Imitationslücke dagegen bleibt unabhängig von der Höhe der Substitutionselastizität, da diese für alte wie neue Anlagen gleich ist [siehe auch McCarthy, 1967; Levhari, Sheshinski, 1967; Hu, 1972].

stitutionsquote¹. Im Schaubild ist eine derart hohe Substitutionselastizität unterstellt, daß die kurzfristige Verringerung der Imitationslücke kleiner ausfällt als im *putty-putty*-Fall.

Langfristig gilt auch bei *putty-clay*, daß die hohen Investitionen von heute die alten Anlagen von morgen sind. Da die ökonomische Lebensdauer der Kapitalgüter auch im neuen Gleichgewicht allein von dem Tempo des technischen Fortschritts und der durch ihn ermöglichten Lohnsteigerung bestimmt wird, fällt die technologische Effizienz der Produktion dann wieder auf ihr Ausgangsniveau zurück, wenn die starken Investitionsjahrgänge zunehmend die Grenze der Rentabilität erreichen.

Exkurs: *Capital lengthening*

Seit Erscheinen des grundlegenden Aufsatzes von Phelps [1963] ist immer wieder behauptet worden, eine Erhöhung der Investitionsquote könne im *putty-clay*-Modell auch zu einer verlängerten Nutzungsdauer alter Kapitalgüter führen². Dies *capital lengthening* wird wie folgt begründet: Eine erhöhte Spartätigkeit führt zu sinkenden Zinsen. Diese Verbilligung von Kapital ließe nicht nur die Neuinvestitionen steigen, sondern mache zugleich alte Anlagen rentabler. Bei einer Substitutionselastizität über Eins³ fiele dann der Rationalisierungseffekt der Kapitalintensivierung neuer Anlagen größer aus als der Erweiterungseffekt der Investitionen, so daß per saldo Arbeitskräfte am neuesten Kapitalgüter-Jahrgang freigesetzt würden. Diese Arbeitskräfte sind an den genutzten alten Anlagen nicht zusätzlich unterzubringen, da deren Faktoreinsatzrelationen fix sind. Also komme nur die Reaktivierung bereits stillgelegter Anlagen bzw. der Verzicht auf laufende Stilllegungen in Frage. Infolgedessen steige die Lebensdauer der Kapitalgüter so stark an, daß möglicherweise der Modernitätsgrad der gesamten Produktion bei einem Investitionsschub sogar sinke [vgl. dazu außer Phelps, 1963 z.B. Massell, 1962a; Matthews, 1964; Phelps, Yaari, 1964; v. Weizsäcker, 1966; Park, 1968].

Diese unterstellte Wirkungskette enthält jedoch einen grundsätzlichen Argumentationsfehler: Es wäre nicht nur zu erklären, warum angeblich an neuen Jahrgängen Arbeitskräfte freigesetzt werden, sondern auch, weshalb es einzelwirtschaftlich lohnend sein sollte, diese Arbeitskräfte an alten Anlagen wieder in den Produktionsprozeß einzugliedern. Alte Anlagen sind im *putty-clay*-Modell so lange rentabel, wie die mit ihnen erbrachte Wertschöpfung die laufenden Kosten übersteigt [Solow, 1962a]. Da die Wertschöpfung technisch vorgegeben ist, müssen die variablen Kosten sinken, wenn alte Anlagen länger als bisher genutzt werden sollen. Für die Unternehmer in diesem Modell sind aber allein die Lohnkosten beeinflussbar, nicht dagegen die Kapitalkosten für einmal installierte Anlagen. Ob alte Anlagen noch verzinst werden müssen, hängt nicht davon ab, ob sie ökonomisch genutzt oder stillgelegt werden. Insofern erhöht eine Zinssenkung nicht die „Quasi-Renten“ alter Anlagen – im Gegenteil: die gleichzeitig

¹ Darüber hinaus spielt die Erwartungsbildung der Unternehmer bezüglich der Lohnentwicklung eine Rolle [Matthews, 1964; Park, 1968]. Da die Tendenz obiger Aussagen davon jedoch unberührt bleibt, soll hier nicht näher darauf eingegangen werden.

² Die Grundgedanken sind bereits bei Massell [1962a] ausgeführt; die erste pointierte Darstellung sowie der Begriff „*capital lengthening*“ stammen jedoch von Phelps [1963].

³ Hier werden der Einfachheit halber statische Lohnerwartungen der Unternehmer unterstellt. Zur Argumentation bei adaptiven Erwartungen vgl. Matthews [1964] und Park [1968].

mit den sinkenden Zinsen eintretenden Realloohnerhöhungen reduzieren sogar noch die Rentabilität alter Anlagen, so daß mehr von ihnen als bisher stillgelegt werden müssen. Was geschieht aber nun mit den an neuen Anlagen freigesetzten Arbeitskräften? Des Rätsels Lösung liegt darin, daß es bei sehr hoher Substitutionalität gar nicht zu dem von Phelps [1963] und anderen unterstellten Zinsrückgang kommt, sondern das zusätzlich bereitgestellte Sparkapital wird bereits bei geringfügigen Faktorpreisänderungen vollständig investiert¹. Da die Reallöhne kaum steigen, werden auch bei hoher Substitutionalität alle Arbeitsplätze am neuesten Kapital-Jahrgang erhalten bleiben, wenn verstärkt investiert wird.

3. *Clay-clay*

Die wenigsten Entscheidungs- und Optimierungsprobleme gibt es in der Welt der *clay-clay*-Modelle. Beeinflußbar ist (via Sparquote) nur noch der Umfang der Neuinvestitionen, während die Kapitalintensität eines jeden einzelnen Anlagenjahrgangs technisch determiniert ist. Konsistenzprobleme zwischen den für neue Anlagen benötigten Arbeitskräften und dem tatsächlichen Arbeitsangebot gibt es nicht, denn die ökonomische Nutzungsdauer der Kapitalgüter paßt sich so an, daß gerade so viel Arbeitskräfte an alten Anlagen freigesetzt wie an neuen gebraucht werden [Eltis, 1963; Solow *et al.*, 1966; Solow, 1970].

Im langfristigen Gleichgewicht liefert *clay-clay* ähnliche Ergebnisse wie *putty-clay* (höhere Kapitalintensität bei jüngeren Jahrgängen, gleicher Arbeitseinsatz bei allen genutzten Jahrgängen). In bezug auf die ökonomische Lebensdauer von Produktionsanlagen besteht jedoch ein wesentlicher Unterschied: Während im *putty-clay*-Fall auch diese allein durch die Rate des technischen Fortschritts bestimmt ist, wird sie in *clay-clay*-Modellen zusätzlich von der Höhe der Investitionsquote beeinflusst. Da auch ex ante keine Substitution möglich ist, reicht bei höheren Investitionen das verfügbare Arbeitsangebot nur zur Besetzung einer geringeren Zahl von Kapitalgüter-Jahrgängen als bei niedrigerer Investitionsquote.

Eine Investitionserhöhung um einen bestimmten Betrag führt zu einer prozentual gleichen Erhöhung des Arbeitseinsatzes und der Produktion am neuesten Kapitalgüter-Jahrgang². Der kurzfristige Anstieg der technologischen Effizienz fällt hier also stärker aus als bei den beiden anderen Modellen. Im Unterschied zu *putty-putty* und *putty-clay* kommt es auch langfristig nicht wieder zu einem Rückgang des Modernitätsgrades. Da die Kapitalintensität neuer Anlagen unverrückbar festliegt, muß zur Besetzung der starken Investitionsjahrgänge mit Arbeitskräften so lange mehr als ein Kapitalgüter-Jahrgang stillgelegt werden, bis wieder eine stabile Verteilung der Arbeitskräfte nach Jahrgängen erreicht ist.

In allen folgenden Jahren bleibt diese verkürzte Lebensdauer von Produktionsanlagen bestehen, so daß in diesem Modell mit einer erhöhten Investitionsquote die technologische Effizienz der Produktion auf Dauer erhöht werden kann³.

¹ Phelps übersieht offenbar, daß die aus einer gesteigerten Spartätigkeit folgende Zinssenkung nicht unabhängig von der Substitutionselastizität ist.

² Das gilt zumindest bei linear-homogener Produktionsfunktion. Auf steigende oder sinkende Skalenerträge soll hier nicht eingegangen werden.

³ Ausführlich und sehr anschaulich wird der *clay-clay*-Fall bei Solow [1970] geschildert.

4. Technologische Effizienz und Wachstum

Als Gemeinsamkeit aller drei Modellvarianten ist festzuhalten, daß langfristig der Altersaufbau der Produktionsanlagen sowie die Verteilung von Produktion und Arbeits-einsatz auf die einzelnen Jahrgänge stabil sind. Die Effizienzsteigerung bei neuen Kapitalgütern (die hier den technischen Fortschritt repräsentiert) ist so zugleich die Effizienzsteigerung im gesamtwirtschaftlichen Durchschnitt. Also hängt die gleichge-wichtige Wachstumsrate einer Volkswirtschaft – genau wie im Modell mit ungebunde-nem Fortschritt – allein von der Rate des technischen Fortschritts und der Bevölke-rungsvermehrung ab. Die Höhe der Investitionsquote hat trotz des kapitalgebundenen Charakters des technischen Fortschritts auf das Wachstumstempo langfristig keinen Einfluß¹.

Die technologische Effizienz der Produktion wird nur im *clay-clay*-Modell, also in einer Welt ohne jegliche Substitutionsmöglichkeiten zwischen Kapital und Arbeit, langfristig vom Investitionsverhalten beeinflusst; in den beiden anderen Modellen erreicht der Abstand zwischen bestmöglicher und durchschnittlich angewandter Tech-nologie auch bei einer dauerhaft veränderten Investitionsquote nach Abschluß vor-übergehender Anpassungsprozesse wieder sein altes Niveau. Im *putty-clay*-Fall ist darüber hinaus auch kurzfristig der Modernisierungseffekt einer verstärkten Investi-tionstätigkeit um so niedriger, je elastischer das Faktoreinsatzverhältnis auf veränderte relative Preise reagiert.

Daraus sollte nun aber nicht gefolgert werden, eine hohe Substitutionalität sei unter diesen Annahmen für das Wachstum schädlich. Der starke Modernisierungseffekt im *clay-clay*-Fall beispielsweise wird schließlich mit einer vorzeitigen Verschrottung alter Anlagen erkaufte, die erheblich stärker ist als bei den beiden anderen Modellen². Da ganz allgemein in neoklassischen Wachstumsmodellen Substitutionsmöglichkeiten erst dann genutzt werden, wenn sie eine Steigerung der Produktion versprechen³, folgt für den Wachstumspfad im Anpassungsprozeß genau das Gegenteil wie für den Technolo-giepfad: Je größer die Substituierbarkeit der Produktionsfaktoren, desto besser werden auch bei kapitalgebundenem Fortschritt die Wachstumschancen einer verstärkten Investitionstätigkeit genutzt⁴.

III. Ergebnisse empirischer Untersuchungen im Überblick

Keines der drei *vintage*-Modelle läßt sich mit dem üblicherweise verfügbaren Datenmaterial unmittelbar empirisch testen. Bekannt sein müßte nicht nur der Alters-

¹ Für eine mathematische Ableitung dieser Aussage vgl. z. B. Hamberg [1963; 1971]. – Zur Diskussion über die praktische Relevanz der säkularen Wachstumsrate vgl. v. Weizsäcker [1966, Anhang].

² Auf die negativen Wachstumsfolgen einer sehr raschen Modernisierung verweisen auch Phelps, Yaari [1964].

³ Das ergibt sich zwangsläufig aus den Annahmen der Vollbeschäftigung und der Grenzproduk-tivitätsentlohnung aller Faktoren.

⁴ Das gilt sowohl für die kurzfristige Anpassung als auch für das Niveau des langfristig erreichten Wachstumspfad [Atkinson, 1970]. – Die Anpassung an den neuen Wachstumspfad wird bei gebundenem Fortschritt sogar schneller vollzogen in Modellen mit ungebundenem Fortschritt, da die Erhöhung der Investitionsquote vorübergehend auch den genutzten technischen Fortschritt erhöht [Koyck, 't Hooft-Welvaars, 1965].

aufbau der gesamten Produktionsanlagen, sondern darüber hinaus die Verteilung des Arbeitseinsatzes und der Produktion auf die einzelnen Jahrgänge zu jedem Zeitpunkt. Es liegt nahe, nach vereinfachenden Meßkonzepten zu suchen, die unter bestimmten Annahmen einen kapitalgebundenen Fortschritt abbilden können:

- Werden eine konstante Rate Solow-neutralen technischen Fortschritts¹ und eine fest vorgegebene physische Lebensdauer von Kapitalgütern unterstellt, so läßt sich im *putty-putty*-Modell aus einer genügend langen Zeitreihe der Bruttoanlageinvestitionen eine Kennziffer für das „Effektivkapital“ berechnen, die in eine herkömmliche Produktionsfunktion anstelle des Kapitalstocks eingefügt werden kann [Solow, 1960; 1962b; 1963].
- Wenn sich die technologische Qualität der Produktionsanlagen im Zeitverlauf nur mäßig ändert, liefert das Durchschnittsalter des Bruttoanlagevermögens eine recht zuverlässige Näherung für die Effizienz des Kapitalstocks. Eine Produktionsfunktion mit Kapital und Arbeit als Produktionsfaktoren sowie dem Durchschnittsalter des Kapitalstocks als Effizienzfaktor liefert den einfachsten Schätzansatz für ein *putty-putty*-Modell [Nelson, 1964; You, 1976].
- Als Näherungswert für die technologische Effizienz der Kapitalgüter läßt sich auch die als „Modernitätsgrad“ bezeichnete Relation von Netto- zu Bruttoanlagevermögen benutzen: Wenn die Investitionen zurückgehen, wird der Anteil bereits abgeschriebener Anlagen am Bruttokapitalstock zunehmen, und der Modernitätsgrad sinkt. Ist die Absenkung der Investitionsquote von Dauer, stabilisiert sich die Altersstruktur des Anlagevermögens, und der Modernitätsgrad erreicht wieder sein ursprüngliches Niveau [Görzig, 1976a; 1980].
- Da sowohl im *putty-putty*- als auch im *putty-clay*-Fall Veränderungen der Investitionsquoten stets nur temporäre Abweichungen vom exponentiellen Pfad des technischen Fortschritts hervorrufen, können Schwankungen der Restgröße herkömmlicher produktionstheoretischer Ansätze als Ausdruck eines kapitalgebundenen Fortschritts aufgefaßt werden. Wenn es gelingt, diese Trendabweichungen mit dem Investitionsverhalten in eine stabile Beziehung zu bringen, ist damit ein indirekter Nachweis für die Existenz kapitalgebundenen Fortschritts erbracht [Massell, 1962b]².

Zur Bestimmung der einzelnen Parameter können entweder regressionsanalytische Schätzverfahren oder Komponentenzerlegungen benutzt werden. Dabei wird von einigen Autoren zusätzlich von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, im *trial-and-error*-Verfahren einige Parameterwerte vorzugeben, um insgesamt zu plausiblen Resultaten zu gelangen [vgl. z. B. Solow, 1962b].

In der praktischen Anwendung dominiert der *putty-putty*-Ansatz, da er die geringsten Anforderungen an die erforderliche Datenbasis stellt. Ein Blick auf die Ergebnisse

¹ Daß auch im *putty-putty*-Fall bei Aufgabe der Annahme eines Solow-neutralen Fortschritts nicht mehr von einem aggregierbaren Kapitalstock ausgegangen werden kann, zeigt Fisher [1965].

² Massell unterstellt darüber hinaus, daß der Einfluß der Investitionen auf diese kapitalgebundene Komponente mit zunehmendem Alter nach Maßgabe einer geometrischen Reihe abnimmt. Mit Hilfe einer Koyck-Transformation kann dann der kapitalgebundene Fortschritt allein auf die Investitionsausgaben der Vorperiode zurückgeführt werden. – Der praktische Nutzen dieses bestechend einfachen Ansatzes wird allerdings stark eingeschränkt durch methodische Konsistenzprobleme, die eine ökonometrische Schätzung nach der Methode der kleinsten Quadrate nicht mehr zulassen [Kmenta, 1971].

empirischer Studien zeigt, daß auch für dicht beieinanderliegende Untersuchungszeiträume recht unterschiedliche Fortschrittskoeffizienten ermittelt wurden; Intriligator [1965] und Frisch [1968] ermitteln sogar für identisches Zahlenmaterial voneinander abweichende Koeffizienten. In immerhin sieben der achtzehn ausgewiesenen Studien wird die Relevanz des kapitalgebundenen Fortschritts völlig verneint (Tabelle)¹. Eines der interessantesten Resultate liefert Nelson [1964]: Er stellt für die Gesamtperiode seiner Untersuchung keinen Einfluß des kapitalgebundenen Fortschritts auf das Wirtschaftswachstum fest, wohl aber für die einzelnen Unterperioden. Das steht im Einklang mit der theoretisch begründeten Erwartung, daß kapitalgebundener Fortschritt stets nur Abweichungen vom langfristigen Wachstumstrend, nie dagegen den Trend selbst erklären kann.

In den empirischen Ergebnissen scheint sich aber auch der jeweils aktuelle Zeitgeist auszudrücken, denn es fällt ins Auge, daß der *vintage*-Ansatz in den frühen sechziger Jahren überwiegend bestätigt, danach jedoch häufig abgelehnt wurde. Das könnte mit dem bereits oben erwähnten Vordringen der Humankapitalansätze zusammenhängen,

Übersicht empirischer Messungen des kapitalgebundenen Fortschritts

Quelle	Ansatz	Untersuchungs- zeitraum	Ergebnis ^a
Solow, 1960	<i>putty-putty</i>	1919–1953	3 vH
Solow, 1962b	<i>putty-putty</i>	1929–1961	2–4 vH
Massell, 1962b	<i>putty-putty</i>	1919–1958	–
Solow, 1963	<i>putty-putty</i>	1929–1957	5 vH
Nelson, 1964	<i>putty-putty</i>	1929–1960	2 vH
Intriligator, 1965	<i>putty-putty</i>	1929–1958	4 vH
Berglas, 1965	<i>putty-putty</i>	1929–1960	–
Frisch, 1968	<i>putty-putty</i>	1929–1958	5 vH
Lydall, 1968	Branchen- querschnitt	1950–1960	–
Hesse, 1969	<i>putty-putty</i>	1950–1965	15 vH
Wickens, 1970	<i>putty-putty</i>	1900–1960	–
Isard, 1973	<i>putty-clay</i>	1948–1967	3 vH
Görzig, 1976b	<i>putty-clay</i>	1960–1971	–
You, 1976	<i>putty-putty</i>	1929–1968	–
Barger, 1976	<i>putty-putty</i>	1950–1971	+
Görzig, 1980	<i>clay-clay</i>	1960–1977	+
McHugh, Lane, 1983 ...	<i>putty-putty</i>	1960–1972	–
Mizon, Nickell, 1983 ...	<i>putty-clay</i>	1956–1976	6 vH

^a vH-Werte geben die jahresdurchschnittliche Effizienzsteigerung des Kapitals an. „+“ steht für statistisch gesicherte, aber nicht quantifizierte Ergebnisse. „–“ steht für nicht gesicherte Ergebnisse.

¹ Die numerischen Werte der Ergebnisse beziehen sich auf die Fortschrittsrate, nicht auf die Produktionssteigerung. Letztere errechnet sich aus dem Produkt der Fortschrittsrate und der Produktionselastizität des Kapitals. – Einige der in der Tabelle ausgewiesenen Untersuchungen werden bei Kennedy und Thirlwall [1973] eingehender erläutert.

die das Interesse der Forschung von der Sachkapitalbildung weglenkten. Da auch bei methodisch einwandfreien ökonometrischen Untersuchungen die Zielsetzung des Forschers nie ganz ohne Einfluß auf die Ergebnisse bleiben wird, könnte sich ein Verwerfen der *vintage*-Hypothese mangels empirischer Bestätigung als voreilig erweisen¹. Die positiven Ergebnisse einiger neuerer Untersuchungen deuten möglicherweise bereits ein Rückschwingen des Forschungsinteresses vom Human- zum Sachkapital als Träger wirtschaftlichen Wachstums an.

Dennoch weckt das heterogene Bild der empirischen Untersuchungen nachhaltige Zweifel, ob *vintage*-Modelle den sich in der realen Welt vollziehenden technischen Wandel angemessen abbilden können. Daher erscheint an dieser Stelle eine eingehende Erörterung der gegen das Konzept eines kapitalgebundenen Fortschritts vorgebrachten Kritik am Platze.

IV. Substitutive oder komplementäre Techniken – Zur Kritik von *vintage*-Ansätzen

Die Auseinandersetzungen in der neoklassischen Wachstumstheorie um das *vintage*-Konzept lassen sich grob in zwei Kategorien unterteilen, und zwar (i) in eine Kritik der Meßtechnik und (ii) eine Kritik der Prämissen:

(i) Von einigen Autoren wird das Konzept deshalb abgelehnt, weil es nicht operational sei. Dabei gehen sie von der nicht zu bezweifelnden Feststellung aus, daß die Auswirkungen eines kapitalgebundenen Fortschritts immer nur an vorübergehenden Abweichungen vom langfristigen Fortschrittstrend identifiziert und gemessen werden können. Zu derartigen Abweichungen kommt es aber auch dann, wenn entweder die Rate des ungebundenen Fortschritts im Zeitverlauf schwankt oder der Faktoreinsatz nicht präzise gemessen wird. Daher wird eine einwandfreie Isolierung der Effekte eines kapitalgebundenen technischen Fortschritts niemals möglich sein, solange es nicht gelingt, Meßfehler bei den sonstigen Quellen des Wachstums auszuschließen [Jorgenson, 1966; Griliches, Jorgenson 1967; Smallwood, 1970; Barger, 1976; Bailey, 1981a; 1981b].

Als Kritik an der Quantifizierbarkeit eines gebundenen Fortschritts ist dieser Einwand sicher berechtigt; er kann jedoch die theoretische Konstruktion dieses Konzepts nicht treffen. Denn was nicht quantifizierbar ist, muß deshalb nicht unwichtig sein. Für die wachstumspolitische Relevanz der Kapitalakkumulation macht es durchaus einen Unterschied, ob etwa ein Wachstumseinbruch auf einem Rückgang der Innovationstätigkeit, einer (statistisch nicht erfaßten) Kapitalentwertung oder einer Behinderung der Diffusion technischer Neuerungen infolge zu niedriger Investitionsquoten beruht.

(ii) Gewichtiger erscheint die Prämissenkritik² von Denison [1964], der betont, daß in aller Regel nicht sämtliche Investitionsgüter eines Jahrganges den entsprechenden

¹ Oppenländer [1976] unterstellt sogar, daß einige Studien von vornherein unter dem Ziel angelegt waren, kapitalgebundenen Fortschritt als insignifikant auszuweisen.

² Ebenfalls als Prämissenkritik kann der Hinweis von Nelson [1964] auf Interdependenzen und Komplementaritäten im Wachstumsprozeß angesehen werden. Er hält es grundsätzlich für zweifelhaft, den Beitrag verschiedener Quellen des Wachstums isoliert nebeneinander analysieren zu wollen. Im Kern trifft dieses Argument die gesamte Wachstumstheorie, die von Nelson lediglich am kapitalgebundenen Fortschritt exemplifiziert wird. Später hat er diese Kritik auf sämtliche *growth-accounting*-Ansätze ausgeweitet [Nelson, 1973].

Gütern aus der Vorjahresproduktion technisch überlegen seien und daß darüber hinaus auch alte Anlagen häufig durch entsprechendes Nachrüsten auf den neuesten technischen Stand gebracht werden könnten. Es lohnt sich, auf dieses Argument näher einzugehen: Das Grundproblem sämtlicher *vintage*-Ansätze liegt vermutlich in der Annahme, daß technischer Fortschritt auf alle neuen Kapitalgüter mit der gleichen Rate wirke und daß alte Anlagen nicht zusammen mit neuen eingesetzt werden könnten. In der Realität dürfte es aber folgende Grundtypen von Investitionsgütern geben:

- Die Technik ist unverändert im Vergleich zu älteren Jahrgängen;
- die Technik ist verbessert, und das neue Kapitalgut kann mit bestehenden Produktionsanlagen kombiniert werden (komplementäre Technologie);
- die Technik ist verbessert, und das neue Kapitalgut kann mit einem Teil der alten Anlage kombiniert werden, ein anderer Teil ist dagegen zu verschrotten (teilweise komplementäre Technologie);
- die neue Technik kann nur durch Verschrotten der gesamten alten Anlagen eingeführt werden (substitutive Technologie).

In all diesen Fällen ist technischer Fortschritt – wo er auftritt – kapitalgebunden. *Vintage*-Konzepte liefern aber nur dann ein getreues Bild der Wirklichkeit, wenn Investitionen ausschließlich die letztgenannte Form aufweisen. Kommen alle vier Typen nebeneinander vor, so mag bereits ein gewisses Mindestniveau an Investitionen genügen, um zumindest die komplementären Neuerungen in allen Produktionsbereichen zu installieren.

Veränderungen der Investitionstätigkeit hätten dann völlig andere Konsequenzen für den Modernitätsgrad der Produktion als im reinen *vintage*-Modell: Geht man davon aus, daß bei steigendem Vorrat an technischem Wissen auch der Investitionsbedarf für das Nachrüsten alter Anlagen mit komplementären neuen Technologien exponentiell mit konstanter Rate steigt, kann ein starker Rückgang der gesamten Investitionen die Effizienz der Produktion auf Dauer mindern, und zwar dann, wenn auch diese komplementären Investitionen betroffen sind. Das führt zu einer dauerhaften Verringerung der (kapitalgebundenen) Effizienzsteigerung der Produktion an alten Anlagen, die auch dann noch anhält, wenn das Durchschnittsalter des Kapitalstocks wieder sein altes Niveau erreicht hat. Die Folgen einer Investitionsschwäche sind bei kapitalgebundenem Fortschritt mit komplementärer Technologie also nicht auf die – vorübergehende – Veränderung der Relation zwischen alten und neuen Anlagen beschränkt, sondern umfassen darüber hinaus die verringerte Modernisierung alter Anlagen. Stark gesteigerte Investitionsausgaben würden dagegen – anders als in herkömmlichen *vintage*-Modellen – die technologische Effizienz nicht weiter erhöhen, da sie (wenn die Einsatzmöglichkeiten für komplementäre und substitutive neue Technologien ausgeschöpft sind) zu einem großen Teil in technologisch nicht verbesserte Produktionsanlagen fließen müßten.

Zur Beurteilung der Folgen einer veränderten Investitionstätigkeit für die Verbreitung neuer Technologien reicht es also nicht aus, zwischen gebundenem und ungebundenem Fortschritt zu unterscheiden; es kommt auch auf die Kombinationsmöglichkeiten zwischen alten und neuen Techniken an. Hinweise auf die praktische Relevanz dieser Frage könnten mikroökonomische Fallstudien liefern, in denen die Diffusion technischer Neuerungen analysiert wird. Denn dort, wo in der makroökonomischen Wachstumstheorie die Trennungslinie zwischen der Rate des technischen Fortschritts und der Effizienzsteigerung der Produktionsfaktoren verläuft, ist mikroökonomisch die

Unterscheidung zwischen Innovation und Diffusion neuer Technologien anzusiedeln. Die vorliegenden Untersuchungen stehen allerdings durchweg unter einer anderen als der hier diskutierten Fragestellung; dennoch können einige Schlüsse aus den Ergebnissen der mikroökonomischen Innovationsforschung gezogen werden, die im folgenden dargestellt werden sollen.

V. Kapitalgebundener Fortschritt im Lichte der mikroökonomischen Innovationsforschung

Aus der Fülle der Fallstudien lassen sich mehrere Indizien zusammentragen, die die Vermutung stützen, daß die Verbreitung neuer Technologien überwiegend an den Einsatz neuer Investitionsgüter geknüpft ist – der größere Teil des technischen Fortschritts also als kapitalgebunden anzusehen sein dürfte:

(i) Neue Produktionsstätten arbeiten in der Regel effizienter als ältere. Gregory und James [1973; 1975] zeigen in einer Untersuchung für die australische Wirtschaft, daß in Fabriken, die jünger sind als zwei Jahre¹, die Arbeitsproduktivität im Durchschnitt um zehn bis achtzehn Prozent höher ist als in allen Unternehmen des jeweiligen Wirtschaftszweiges². Zu vergleichbaren Ergebnissen kommen auch Gomulka [1976] für die polnische Industrie und Wohlin [1970; 1973] für die Forstwirtschaft und die Papierindustrie in Schweden. Bei ungebundenem technischen Fortschritt wären aber keine signifikanten Unterschiede zwischen den Produktivitätsniveaus in neuen und älteren Produktionsstätten zu erwarten.

(ii) Investitionskosten spielen eine wichtige Rolle bei der Entscheidung von Unternehmen, neuen Techniken einzuführen. Nach Mansfield hängt die Diffusionsgeschwindigkeit von Innovationen von mehreren Faktoren ab, unter denen auch die erforderlichen Investitionskosten zur Einführung einer neuen Technik erhebliches Gewicht besitzen. Er begann seine Untersuchungen am Beispiel von Diesellokomotiven [Mansfield, 1961; 1963], analysierte später zwölf Innovationen in vier Wirtschaftszweigen [1968] und befragte schließlich 300 Unternehmen nach den Bestimmungsgründen für die Einführung numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen [1973]. In allen Fällen erwiesen sich die Investitionskosten als wichtiger Parameter zur Erklärung des Imitationsverhaltens³. Eine neuere Untersuchung ergab, daß die gesamten Kosten der Imitation (Anpassung der neuen Technik an die eigenen Produktionsbedingungen, Sachinvestitionen, Marketing) im Durchschnitt immerhin etwa zwei Drittel der Kosten entsprechen, die vom Innovator für die Entwicklung und Einführung der neuen Technik aufgewandt werden

¹ Als neu wird von ihnen eine Fabrik angesehen, die auf einem bisher nicht gewerblich genutzten Grundstück errichtet wird. Erweiterungsbauten werden dabei nicht berücksichtigt.

² Sie halten diesen Unterschied zwar nicht für statistisch signifikant, doch Haig [1975] weist darauf hin, daß die von Gregory und James benutzten Signifikanztests nicht fehlerfrei sind. Er hält die überdurchschnittliche Effizienz neuer Anlagen durchaus für signifikant.

³ Mit einem ähnlichen Ansatz kommt Romeo [1975; 1977] zu entsprechenden Ergebnissen. Siehe auch Schwartz [1978].

müssen [Mansfield *et al.*, 1981]¹. Die empirisch belegte Bedeutung der Investitionskosten für die Imitationsaktivitäten der Unternehmen läßt somit den Schluß zu, daß zumindest die mit dem Mansfield-Modell untersuchten Innovationen einen kapitalgebundenen Fortschritt darstellen.

(iii) Der intersektorale Technologietransfer erfolgt vorrangig über die Lieferung von Investitionsgütern.

Die Anwendung neuer Technologien ist über die verschiedenen Branchen einer Wirtschaft erheblich breiter gestreut als ihre Erforschung und Entwicklung. Zwar gibt es auch beim Fortschritt der angewandten Technik merkliche sektorale Unterschiede, sie sind aber bei weitem nicht so ausgeprägt wie die unterschiedliche Spezialisierung der einzelnen Branchen auf Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Daraus kann geschlossen werden, daß ein erheblicher intersektoraler Technologietransfer von den Herstellern zu den Anwendern neuer Techniken stattfindet. Dieser Transfer dürfte hauptsächlich über die Lieferung technologisch hochwertiger Vorleistungen und Investitionsgüter erfolgen. Scherer [1982] ermittelte für die Wirtschaft der Vereinigten Staaten, daß drei Viertel aller industriellen Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen auf Produkte und Verfahren entfallen, die nicht zur Produktion in den forschenden Unternehmen selbst, sondern außerhalb genutzt werden. Bei dieser Untersuchung, in die Daten von mehreren hundert amerikanischen Großunternehmen einbezogen wurden, ergab sich ein enger Zusammenhang zwischen dem Produktivitätsanstieg in den einzelnen Unternehmen und ihren in Form von Investitionsgütern von anderen Unternehmen bezogenen neuen Technologien. Die Verknüpfung der Produktivitätsentwicklung mit den im eigenen Unternehmen durchgeführten Forschungsarbeiten oder mit den in Form von Vorleistungen bezogenen neuen Technologien erwies sich dagegen als deutlich schwächer. Scherer sieht dies als positive, wenn auch schwache Bestätigung der *vintage*-Hypothese an.

Mikroökonomisch angelegte Studien zum technischen Fortschritt stützen also durchweg die Vermutung, daß eher das Modell eines kapitalgebundenen Fortschritts als das Modell eines ungebundenen Fortschritts dem technischen Wandel, wie er sich in der realen Welt vollzieht, entspricht. Wesentlich schwieriger läßt sich anhand der vorliegenden empirischen Untersuchungen die Frage nach dem komplementären oder substitutiven Charakter neuer Techniken in bezug auf ältere Techniken beantworten. Uns ist bisher keine Arbeit bekannt, die sich explizit mit diesem Thema befaßt. Nähere Aufschlüsse könnte eine systematische Aufarbeitung von Fallstudien liefern, wobei zu prüfen wäre, ob und in welchem Ausmaß bei der Einführung einer neuen Technik ältere Produktionsanlagen stillgelegt werden mußten oder weiterverwendet werden konnten.

Eine detaillierte Analyse der Verbreitung ausgewählter Innovationen wurde in den späten sechziger und frühen siebziger Jahren von einer international zusammengesetzten Expertengruppe durchgeführt [Ray, 1969; Nabseth, Ray, 1974]². Danach waren bei

¹ Eine quantitative Aufspaltung der drei Arten von Imitationskosten ist in diesem Aufsatz nicht angegeben; es kann aber vermutet werden, daß die Sachinvestitionen, auf die es hier ankommt, einen wesentlichen Teil der Imitationskosten ausmachen.

² Ray [1969] stellt den Zwischenbericht und Nabseth, Ray [1974] den Abschlußbericht dieses Projekts dar. Da im Abschlußbericht nur noch acht der ursprünglich zehn Innovationen behandelt werden, beziehen sich die folgenden Ausführungen vorrangig auf den Zwischenbericht.

vier¹ der insgesamt zehn untersuchten Innovationen erhebliche Umstellungen der vorhandenen Produktionsanlagen nötig, bevor die neuen Techniken eingesetzt werden konnten. Diese Innovationen sind also als substitutiv zu älteren Techniken anzusehen. Fünf² dieser Innovationen konnten dagegen weitgehend reibungslos in bestehende Produktionsabläufe integriert werden, so daß sie als komplementär bezeichnet werden können. Eine³ der Innovationen schließlich war gar nicht an den Einsatz von Kapitalgütern gebunden. Eine weitere Untersuchung liefert Davies [1979], der 22 Innovationen in vier Kategorien⁴ einteilt, von denen die beiden ersten weitgehend mit dem hier verwendeten Begriff der komplementären Technik, die beiden letzten mit dem Begriff der substitutiven Technik in Übereinstimmung gebracht werden können. Nach dieser Untergliederung sind 12 der von Davies analysierten Innovationen als komplementär, 10 dagegen als substitutiv zu älteren Techniken anzusehen.

Eine eindeutige Trennungslinie zwischen substitutiven und komplementären Techniken ist kaum zu ziehen; die Übergänge sind fließend. Vermutlich sind die bei der Einführung einer neuen Technik erforderlichen Umstellungen oder Verschrottungen vorhandener Produktionsanlagen auch nicht bei allen Unternehmen gleich⁵. Es kommt schließlich nicht nur auf die Flexibilität der neuen, sondern ebenfalls auf die der alten Technik an. Möglicherweise sind die Schwierigkeiten dort am höchsten, wo standardisierte Produkte in großen Stückzahlen hergestellt werden; denn in jenen Branchen zwingt der Wettbewerbsdruck zu einer starken Spezialisierung der Produktionsanlagen, so daß die Anpassungsfähigkeit an neue Techniken stark beeinträchtigt wird [Gold, 1978].

Abschließend kann festgestellt werden, daß die *vintage*-Ansätze in der gegenwärtigen wirtschaftswissenschaftlichen Forschung zu Unrecht vernachlässigt werden, denn es gibt starke Indizien für die Kapitalgebundenheit des technischen Fortschritts. Zugleich bedürfen die vorhandenen Modelle jedoch der Weiterentwicklung, da sie nur substitutive, nicht dagegen komplementäre Beziehungen zwischen neuen und alten Techniken abbilden können. Die Effizienzsteigerungen der Modernisierung älterer Produktionsanlagen durch das Nachrüsten mit neuen Investitionsgütern werden in herkömmlichen *vintage*-Modellen nicht erfaßt, obwohl sie – wie die Ergebnisse der mikroökonomischen Investitionsforschung zeigen – von erheblicher praktischer Relevanz sein dürften. Das unterstreicht die zentrale Rolle, die der Investitionstätigkeit im Prozeß des wirtschaftlichen Wachstums zukommt.

¹ Oxygenstahlverfahren, Stranggießen von Stahl, Tunnelöfen in der Ziegelindustrie, Floatglasprozeß.

² Spezialpressen in Papiermaschinen, NC-Werkzeugmaschinen, Anreiß- und Schneidverfahren im Schiffbau, schützenlose Webmaschinen, automatische Transferstraße im Motorenbau.

³ Verwendung von Gibberellinsäure in der Mälzerei.

⁴ „Supplementary“, „Involving automation“, „Replacing capital-embodied old technology“, „Involving a new function“ [Davies, 1979, S. 38 f.].

⁵ Ray [1969] stellt beispielsweise deutliche Unterschiede in der Anpassungsfähigkeit einzelner Unternehmen des Textilgewerbes an die neue Technik der schützenlosen Webmaschinen fest.

Literatur

- Arrow, Kenneth J.**, „The Economic Implications of Learning by Doing“. *The Review of Economic Studies*, Vol. 29, 1962, S. 155–173.
- Atkinson, Anthony B.**, „On Embodiment and Savings“. *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 84, 1970, S. 127–133.
- Baily, Martin N.** [1981a], „Productivity and the Services of Capital and Labor“. *Brookings Papers on Economic Activity*, 1981, S. 1–50.
- [1981b], „The Productivity Growth Slowdown and Capital Accumulation“. *The American Economic Review. Papers and Proceedings*, Vol. 71, 1981, S. 326–331.
- Barger Harold**, „Embodied versus Disembodied Improvements“. *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 58, 1976, S. 372–375.
- Berglas, Eitan**, „Investment and Technological Change“. *The Journal of Political Economy*, Vol. 73, 1965, S. 173–180.
- Bosworth, Barry P.**, „Capital Formation and Economic Policy“. *Brookings Papers on Economic Activity*, 1982, S. 283–317.
- Davies, Stephen**, *The Diffusion of Process Innovations*. Cambridge 1979.
- Denison, Edward F.**, *The Sources of Economic Growth in the United States and the Alternatives Before us Committee on Economic Development*. Supplementary Paper No. 13, New York 1962.
- , „The Unimportance of the Embodied Question“. *The American Economic Review*, Vol. 54, 1964, S. 90–94.
- , *Accounting for Slower Economic Growth: The United States in the 1970's*. Washington, D.C., 1979.
- , „The Puzzling Setback to Productivity Growth“. *Challenge*, Vol. 23, 1980, S. 3–8.
- Eltis, Walter A.**, „Investment, Technical Progress and Economic Growth“. *Oxford Economic Papers*, N.S., Vol. 15, 1963, S. 32–52.
- Fisher, Franklin M.**, „Embodied Technical Change and the Existence of an Aggregate Capital Stock“. *The Review of Economic Studies*, Vol. 32, 1965, S. 263–288.
- Frisch, Helmut**, *Gebundener technischer Fortschritt und wirtschaftliches Wachstum*. Berlin 1968.
- Görzig, Bernd** [1976a], *Die Altersstruktur des Anlagevermögens in der Bundesrepublik Deutschland*. Berlin 1976.
- [1976b], „Results of a Vintage-Capital Model for the Federal Republic of Germany“. *Empirical Economics*, Vol. 1, 1976, S. 153–166.
- , „Der Einfluß des investitionsgebundenen technischen Wandels auf die Arbeitsproduktivität“. In: Gottfried Bombach, Bernhard Gahlen, Alfred E. Ott (Hrsg.), *Neuere Entwicklungen in der Investitionstheorie und -politik*. Tübingen 1980, S. 453–475.
- Gold, Bela**, „On the Role of Capital in Production: A Revision of Some Basic Concepts“. In: Centre National de la Recherche Scientifique (Ed.), *Le Capital dans la Fonction de Production*. Paris 1978, S. 17–61.
- Gomulka, Stanislaw**, „Do New Factories Embody Best Practice Technology? – New Evidence“. *The Economic Journal*, Vol. 86, 1976, S. 859–863.

- Gregory, Robert G., Denis W. James**, „Do New Factories Embody Best Practice Technology?“ *The Economic Journal*, Vol. 83, 1973, S. 1133–1155.
- , –, „Do New Factories Embody Best Practice Technology? – A Reply“. *The Economic Journal*, Vol. 85, 1975, S. 383–388.
- Griliches, Zvi, Dale W. Jorgenson**, „The Explanation of Productivity Change“. *The Review of Economic Studies*, Vol. 34, 1967, S. 249–283
- Hahn, Frank H., Robert C. O. Matthews**, „The Theory of Economic Growth: A Survey“. In: The Royal Economic Society (Ed.), *Surveys of Economic Theory, Vol. II, Growth and Development*. New York 1965, S. 1–124.
- Haig, Bryan D.**, „Do New Factories Embody Best Practice Technology? A Comment“. *The Economic Journal*, Vol. 85, 1975, S. 378–382.
- Hamberg, Daniel**, „Investment and Economic Growth“. *Metroeconomica*, Vol. 15, 1963, S. 8–10.
- , *Models of Economic Growth*. New York 1971.
- Hesse, Helmut**, „Die Meßbarkeit des technischen Fortschritts, dargestellt am Beispiel der Textilindustrie“. *Zeitschrift für Allgemeine und Textile Marktwirtschaft*, Sonderheft, 1969, S. 7–37.
- Hu, Sheng Cheng**, „On Embodiment and Disembodiment“. *Australian Economic Papers*, Vol. 11, 1972, S. 210–219.
- Intriligator, Michael D.**, „Embodied Technical Change and Productivity in the United States 1929–1958“. *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 47, 1965, S. 65–70.
- Isard, Peter**, „Employment Impacts of Textile Imports and Investment: A Vintage Capital Model“. *The American Economic Review*, Vol. 63, 1973, S. 402–416.
- Johansen, Leif**, „Substitution versus Fixed Production Coefficients in the Theory of Economic Growth: A Synthesis“. *Econometrica*, Vol. 27, 1959, S. 157–176.
- Jorgenson, Dale W.**, „The Embodiment Hypothesis“. *The Journal of Political Economy*, Vol. 74, 1966, S. 1–17.
- Kaldor, Nicholas**, „Capital Accumulation and Economic Growth“. In: Friedrich Lutz (Ed.), *The Theory of Capital*. London 1961, S. 177–222.
- , **James A. Mirrlees**, „A New Model of Economic Growth“. *The Review of Economic Studies*, Vol. 29, 1962, S. 174–190.
- Kendrick, John W.**, „International Comparisons of Recent Productivity Trends“. In: American Enterprise Institute, *Essays on Contemporary Economic Problems. Demand, Productivity, and Population*. Washington, D. C., 1981, S. 125–170.
- Kennedy, Charles, Anthony P. Thirlwall**, „Technical Progress“. In: The Royal Economic Society, The Social Science Research Council (Ed.), *Surveys of Applied Economics*. Vol. I. London 1973, S. 115–176.
- Kmenta, Jan**, *Elements of Econometrics*. New York 1971.
- Koyck, Leendert Marinus, Maria J. t’Hooft-Welvaars**, „Economic Growth, Marginal Productivity of Capital and the Rate of Interest“. In: Frank H. Hahn, F. P. R. Brechling (Eds.), *The Theory of Interest Rates*. London 1965, S. 242–266.
- Levhari, Davied, Eytan Sheshinski**, „On the Sensitivity of the Level of Output to Savings: Embodiment and Disembodiment“. *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 81, 1967, S. 524–528.

- Lydall, Harold F.**, „Technical Progress in Australian Manufacturing“. *The Economic Journal*, Vol. 78, 1968, S. 807–826.
- Mansfield, Edwin**, „Technical Change and the Rate of Imitation“. *Econometrica*, Vol. 29, 1961, S. 741–766.
- , „Intrafirm Rates of Diffusion of an Innovation“. *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 45, 1963, S. 348–359.
- , *Industrial Research and Technological Innovation: An Econometric Analysis*. New York 1968.
- , „Determinants of the Speed of Application of New Technology“. In: Bruce Rodda Williams (Ed.), *Science and Technology in Economic Growth*. London 1973, S.190–216.
- , **Mark Schwartz, Samuel Wagner**, „Imitation Costs and Patents: An Empirical Study“. *The Economic Journal*, Vol. 91, 1981, S. 907–918.
- Massell, Benton F.** [1962a], „Investment, Innovation and Growth“. *Econometrica*, Vol. 30, 1962, S. 239–252.
- [1962b], „Is Investment Really Unimportant?“ *Metroeconomica*, Vol. 14, 1962, S. 65–85.
- Matthews, Robert C. O.**, „The New View of Investment: A Comment“. *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 78, 1964, S. 164–172.
- McCarthy, Michael D.**, „Embodied and Disembodied Technical Progress in the Constant Elasticity of Substitution Production Function“. *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 47, 1967, S. 71–75.
- McHugh, Richard, Julia Lane**, „The Embodiment Hypothesis: An Interregional Test“. *Review of Economics and Statistics*, Vol. 65, 1983, S. 323–327.
- Mincer, Jacob**, „Investment in Human Capital and Personal Income Distribution“. *The Journal of Political Economy*, Vol. 66, 1958, S. 281–302.
- Mizon, Grayham, Stephen Nickell**, „Vintage Production Models of U.K. Manufacturing Industry“. *Scandinavian Journal of Economics*, Vol. 85, 1983, S. 295–310.
- Nabseth, Lars, George F. Ray (Eds.)**, *The Diffusion of New Industrial Processes. An International Study*. London 1974.
- Nelson, Richard R.**, „Aggregate Production Functions and Medium-Range Growth Projections“. *The American Economic Review*, Vol. 54, 1964, S. 575–606.
- , „Recent Exercises in Growth Accounting: New Understanding or Dead End?“ *The American Economic Review*, Vol. 63, 1973, S. 462–468.
- Oppenländer, Karl Heinrich**, *Investitionsinduzierter technischer Fortschritt*. Berlin 1976.
- Park, Seong Yawng**, „Substitution, Fixed Proportions, and Growth“. *International Economic Review*, Vol. 9, 1968, S. 307–314.
- Phelps, Edmund S.**, „The New View of Investment: A Neoclassical Analysis“. *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 76, 1962, S. 548–567.
- , „Substitution, Fixed Proportions, Growth and Distribution“. *International Economic Review*, Vol. 4, 1963, S. 265–288.
- , **Menahem E. Yaari**, „The New View of Investment: Reply“. *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 78, 1964, S. 172–176.
- Ray, George F.**, „The Diffusion of New Technology: A Study of Ten Processes in Nine Industries“. *National Institute Economic Review*, Vol. 48, 1969, S. 40–83.

- Romeo, Anthony A.**, „Interindustry and Interfirm Differences in the Rate of Diffusion of an Innovation“. *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 57, 1975, S. 311–319.
- , „The Rate of Imitation of a Capital-Embodied Process Innovation“. *Economica*, Vol. 44, 1977, S. 63–69.
- Salter, W. E. G.**, *Productivity and Technical Change*. Cambridge 1960.
- , „Productivity Growth and Accumulation as Historical Processes“. In: Edward A. G. Robinson (Ed.), *Problems in Economic Development*. London 1965, S. 266–291.
- Scherer, Frederic M.**, „Inter-Industry Technology Flows and Productivity Growth“. *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 64, 1982, S. 627–643.
- Schultz, Theodore W.**, „Capital Formation by Education“. *The Journal of Political Economy*, Vol. 68, 1960, S. 571–583.
- Schwartz, Mark**, *The Imitation and Diffusion of Industrial Innovations*. University of Pennsylvania, Philadelphia 1978.
- Sheshinski, Eytan**, „Balanced Growth and Stability in the Johansen Vintage Model“. *The Review of Economic Studies*, Vol. 34, 1967, S. 239–248.
- Smallwood, Dennis E.**, „Problems of Indeterminacy with the Fixed Coefficients Vintage Model“. *Yale Economic Essays*, Vol. 10, 1970, S. 45–76.
- Smith, Adam**, *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*. (1. Aufl. London 1776). Wiederabgedr. in: R. H. Campbell, A. S. Skinner (Eds.). Oxford 1976.
- Solow, Robert M.**, „Investment and Technical Progress“. In: Kenneth Arrow, Samuel Karlin, Patrick Suppes (Eds.), *Mathematical Methods in the Social Sciences*. Stanford 1960, S. 89–104.
- [1962a], „Substitution and Fixed Proportions in the Theory of Capital“. *The Review of Economic Studies*, Vol. 29, 1962, S. 207–218.
- [1962b], „Technical Progress, Capital Formation, and Economic Growth“. *The American Economic Review*, Vol. 52, 1962, S. 76–86.
- , *Capital Theory and the Rate of Return*. Amsterdam 1963.
- , *Growth Theory. An Exposition*. Oxford 1970.
- , **James Tobin, Carl Christian von Weizsäcker, Menahem E. Yaari**, „Neoclassical Growth with Fixed Factor Proportions“. *The Review of Economic Studies*, Vol. 33, 1966, S. 79–115.
- von Weizsäcker, Carl Christian**, *Zur ökonomischen Theorie des technischen Fortschritts*. Göttingen 1966.
- Wickens, Michael R.**, „Estimation of the Vintage Cobb-Douglas Production Function for the United States, 1900–1960“. *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 52, 1970, S. 187–193.
- Wohlin, Lars**, „Structural Change in the Forest Industries“. *Skandinaviska Banken Quarterly Review*, Vol. 51, 1970, S. 123–129.
- , *The Use of a Capital-Vintage Model in Long-Term Forecasting of Technical Progress and Structural Change*. Stockholm 1973.
- You, Jong Keun**, „Embodied and Disembodied Technical Progress in the United States, 1929–1968“. *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 58, 1976, S. 123–127.