Bildung, Innovationsdynamik und Produktivitätswachstum

Manfred Stadler[1]

1 Einleitung

Die Ergebnisse der kürzlich veröffentlichten PISA-Studie (OECD 2001) über den Bildungsstand der jüngeren Generation haben nicht nur zu einem Nachdenken über die Ursachen der für Deutschland sehr enttäuschenden Ergebnisse geführt, sondern auch die Diskussion über die Bedeutung von Bildung, Ausbildung und Qualifikation innerhalb und außerhalb der Profession neu belebt. Internationale empirische Querschnittsanalysen der letzten Jahre belegen den Zusammenhang zwischen der Qualifikation der Arbeitskräfte und dem Produktivitätswachstum in eindrucksvoller Weise. So haben etwa die ökonometrischen Studien von Hanushek/Kimko (2000) und Barro (2001) einen signifikant positiven Einfluss von Ausbildungszeiten und -qualitäten auf das Produktivitätswachstum nachgewiesen und damit die Diskussion über eine wachstumsfördernde Bildungspolitik auf eine solide empirische Grundlage gestellt (vgl. auch den Überblick in Krueger/Lindahl 2001).

In der Wachstumstheorie wurde die Notwendigkeit der Einbeziehung des Produktionsfaktors qualifizierte Arbeit spätestens bei der Kalibrierung der Konvergenzraten des Solow-Modells erkannt (vgl. Mankiw/Romer/Weil 1992 und Solow 1991). Aber erst im Rahmen der Neuen Wachstumstheorie wurde die Bedeutung des Humankapitals für dauerhaftes Produktivitätswachstum hervorgehoben. So zählt das Wachstumsmodell von Lucas (1988) nicht nur zu den Pionierbeiträgen der Neuen Wachstumstheorie, sondern es prägt die ökonomische Vorstellung von Ursachen und Folgen der Humankapitalakkumulation bis heute in grundlegender Weise.

[1] Ich danke den Teilnehmern des Wirtschaftswissenschaftlichen Seminars Ottobeuren, insbesondere meinem Korreferenten Alfred Maußner, für wertvolle Anregungen und Kritik.

Die Neue Wachstumstheorie hat allerdings neben dem Humankapital vor allem das technologische Wissenskapital als zentralen Wachstumsantrieb in den Mittelpunkt der Analysen gestellt. Die Modelle von Romer (1990), Grossman/Helpman (1991) und Aghion/Howitt (1992) führen das Produktivitätswachstum unmittelbar auf die gesamtwirtschaftliche Innovationsdynamik zurück, die ihrerseits auf zielgerichteten F&E-Aktivitäten privater Unternehmen beruht. Alternativ rekurrieren diese Ansätze entweder auf horizontale Erweiterungsinnovationen oder auf vertikale Qualitätsinnovationen. In modernen Lehrbüchern (vgl. exemplarisch Barro/Sala-i-Martin 2003) werden die bildungs- und innovationsgetriebenen Wachstumsmodelle typischerweise nebeneinander abgehandelt, obwohl an ihrem interdependenten Charakter eigentlich kein Zweifel bestehen kann. Läge der Grund für diese Vorgehensweise nur im Streben nach einer möglichst einsichtigen didaktischen Aufbereitung, bräuchte man die recht künstlich anmutende Trennung der Wachstumsmechanismen unter Bezugnahme auf Ockhams methodologisches Prinzip nicht weiter rechtzufertigen. Tatsächlich verbirgt sich hinter dieser isolierten Darstellung aber ein grundlegendes Problem der Neuen Wachstumstheorie: Die Kombination der beiden Standardmodelle vertikaler und horizontaler Innovationsprozesse lässt das langfristige Produktivitätswachstum auf null schrumpfen, die Kombination eines dieser beiden Standardmodelle mit dem Humankapitalmodell von Lucas (1988) führt dagegen unweigerlich zu einem sich ständig beschleunigenden Wachstum. Diese Modelleigenschaften sind nicht nur kontrafaktisch, sie führen je nach Modellkombination auch zu gänzlich unterschiedlichen Implikationen für die Bildungs- und Forschungspolitik.

Erste Versuche, horizontale und vertikale Innovationsmodelle zu kombinieren, entstanden vor dem Hintergrund der Diskussion über den Skaleneffekt. In den innovationstheoretisch motivierten Modellvarianten der Neuen Wachstumstheorie, in denen staatliche Forschungspolitik grundsätzlich wachstumsrelevant ist, bewirkt dieser Skaleneffekt in bevölkerungsstärkeren Volkswirtschaften höhere Produktivitätswachstumsraten und in Volkswirtschaften mit Bevölkerungswachstum sogar steigende Wachstumsraten der Produktivität. In seiner einflussreichen empirischen Studie hat Jones (1995a) den Skaleneffekt widerlegt. Als Reaktion auf diese „Jones-Kritik" wurden in der Folgezeit semi-endogene Wachstumsmodelle entwickelt (vgl. Jones 1995b, Kortum 1997, Segerstrom 1998). Auf subtile Weise gelingt es diesen Modellen zwar, durch die Annahme eines ständig steigenden Schwierigkeitsgrades von horizontal oder vertikal ausgerichteten Innovationsprojekten den Skaleneffekt zu eliminieren, gleichzeitig kommen sie jedoch zu dem empirisch gleichermaßen inakzeptablen Ergebnis, dass sich Bevölkerungs- und Produktivitätswachstum proportional entwickeln, dass ohne Bevölkerungswachstum also auch kein Produktivitätswachstum möglich ist. Unmittelbare Folge dieses Zusammenhangs ist die grundsätzliche Ineffektivität der staatlichen Forschungspolitik im Hinblick auf die Förderung des Wirtschaftswachstums.

In der nächsten Generation der innovationsgetriebenen Wachstumsmodelle wurde die Annahme des steigenden Schwierigkeitsgrades in der Forschung durch die einleuchtende Annahme simultan ablaufender horizontaler und vertikaler Innovationsprozesse ersetzt (vgl. Young 1998, Peretto 1998, Aghion/Howitt 1998, Kap. 12, Dinopoulos/Thompson (1998), Jones 1999, Li 2000, 2002). Auch in diesen Modellen tritt kein Skaleneffekt auf, einige ihrer Varianten sind aber dennoch in der Lage, Produktivitätswachstum auch ohne Bevölkerungswachstum zu erklären. Gleichzeitig wird der staatlichen Forschungspolitik wieder eine aktive Rolle im Wachstumsprozess zugebilligt.

Parallel zu diesen Bemühungen, horizontalen und vertikalen Innovationsprozessen in simultaner Weise Rechnung zu tragen, hat sich eine andere Entwicklungslinie endogener Wachstumsmodelle ohne Skaleneffekt herauskristallisiert, die sich eine Integration horizontaler oder vertikaler Innovationsprozesse mit der Humankapitalakkumulation zum Ziel gesetzt hat (vgl. Eicher 1996, Arnold 1998, 2002, Blackburn/Hung/Pozzolo 2000, Lloyd-Ellis/Roberts 2002, Stadler 2003). Im Wesentlichen fußen diese recht heterogenen Ansätze auf der attraktiven Idee, exogenes Wachstum der Arbeitsbevölkerung durch eine endogen erklärte Humankapitalakkumulation zu ersetzen. Damit liefern diese Modelle erstmals einen konsistenten Rahmen, der es zulässt, sowohl die Bildungspolitik als auch die Forschungs- und Technologiepolitik im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf das Produktivitätswachstum zu evaluieren.

Der vorliegende Beitrag reiht sich in die Klasse der endogenen Wachstumsmodelle ohne Skaleneffekt ein. In integrierender Weise verknüpft er die beiden jüngsten Entwicklungsstränge, indem er Qualifikationsprozesse sowie horizontale und vertikale Innovationsprozesse simultan als interdependente Antriebe für das Produktivitätswachstum identifiziert. Es wird gezeigt, dass mit der Qualifikation der Arbeitsbevölkerung deren Produktivität sowohl direkt als auch indirekt über eine erhöhte Innovationsdynamik zunimmt. Damit kommt letztlich der Bildungspolitik die Schlüsselrolle in der Wachstumspolitik zu. Im Gegensatz zu Forschungssubventionen erweisen sich

Bildungssubventionen sowie Ausgaben zur Erhöhung der Qualität des Bildungssystems als geeignet, über die diversen Kanäle das Produktivitätswachstum dauerhaft zu erhöhen.

2 Ein integratives Wachstumsmodell

Um die Bedeutung von Bildung und Ausbildung einerseits sowie von horizontalen und vertikalen Innovationen andererseits in stilisierter Weise hervorzuheben, wird von den Produktionsfaktoren unqualifizierte Arbeit und Sachkapital abstrahiert. Beide Faktoren würden zwar die Anpassungsdynamik an das langfristige Wachstumsgleichgewicht beeinflussen, nicht aber die hier interessierenden steady state-Wachstumsraten selbst. Die Humankapitalakkumulation wird in der Tradition von Uzawa (1965) und Lucas (1988) modelliert, die Akkumulation des technologischen Wissens in Anlehnung an das Innovationsmodell von Li (2000), das seinerseits eine Kombination der geeignet adaptierten Standardmodelle horizontaler und vertikaler Innovationsprozesse von Grossman/Helpman (1991) darstellt. Kontrastierend wird jedoch das dort exogen vorgegebene Wachstum der Arbeitsbevölkerung durch eine endogen bestimmte Akkumulation ihres Humankapitals in einem Bildungssektor ersetzt. Der Staat kann sowohl im Bildungs- als auch in den Forschungssektoren wirtschaftspolitisch aktiv werden. Um steuerbedingte Allokationsverzerrungen auszuschließen, wird von einer Finanzierung aller staatlichen Ausgaben über eine entsprechend dimensionierte Kopfsteuer ausgegangen.

2.1 Konsum- und Ausbildungsverhalten der Haushalte

Die Bevölkerung besteht aus einem Kontinuum repräsentativer Haushalte im Einheitsintervall, so dass Produktions- und (Arbeits-)Produktivitätswachstum als äquivalent betrachtet werden können. Die dynastisch planenden Haushalte maximieren ihren intertemporalen Nutzen durch den Konsum eines homogenen Gutes Y sowie durch die Investitionen in ihre Ausbildungszeiten. Die Nutzenfunktion

$$U(Y_t) = \int_0^\infty e^{-\rho t} \ln Y_t \, dt$$

ist charakterisiert durch eine intertemporale Substitutionselastizität von eins und eine konstante Zeitpräferenzrate $\rho > 0$. Jeder Haushalt ist zum Zeitpunkt t mit H_t Humankapitaleinheiten ausgestattet, die er im Produktions-, im Bildungs- oder in einem der beiden Forschungssektoren einsetzen kann. Indem er H_t^E Einheiten seines Humankapitals in seine Ausbildung investiert und damit auf den entsprechenden Teil seines Arbeitseinkommens verzichtet, kann jeder Haushalt sein Humankapital gemäß der Uzawa-Lucas-Akkumulationsfunktion

$$\dot{H}_t = \kappa H_t^E \tag{1}$$

erhöhen, wobei $\kappa(> \rho)$ die Qualität des Bildungssystems ausdrückt und die Vergessensrate als vernachlässigbar gering angesehen wird. Die dynamische Budgetrestriktion jedes Haushalts lautet

$$\dot{A}_t = r_t A_t + w_t(H_t - H_t^E) + s^E w_t H_t^E - p_t^Y Y_t - T_t,$$

wobei sich das Vermögen A_t durch Zinseinkommen $r_t A_t$ und Lohneinkommen $w_t(H_t - H_t^E)$ sowie durch die staatliche Ausbildungsförderung in Höhe von $s^E w_t H_t^E$ bei einem konstanten Subventionssatz s^E erhöht und durch die Konsumausgaben $E_t = p_t^Y Y_t$ und die Kopfsteuern T_t reduziert. Der Staat kann seine Bildungsausgaben neben der nachfrageseitigen Subventionierung von Bildung auch zugunsten einer angebotsseitigen Qualitätsverbesserung des Bildungssystems (Erhöhung von κ) einsetzen.

Die nicht diskontierte Hamilton-Funktion des dynamischen Optimierungsproblems lautet

$$\mathscr{H} = \ln Y_t + \psi_1[r_t A_t + w_t(H_t - H_t^E) + s^E w_t H_t^E - p_t^Y Y_t - T_t] + \psi_2[\kappa H_t^E],$$

wobei ψ_1 und ψ_2 die Kozustandsvariablen des Vermögens A_t und des Humankapitals H_t sind. Daraus ergeben sich die notwendigen Optimalitätsbedingungen

$$\mathscr{H}_Y = 1/Y_t - \psi_1 p_t^Y = 0, \tag{2}$$

$$\mathscr{H}_A = \psi_1 r_t = \psi_1 \rho - \dot{\psi}_1, \tag{3}$$

$$\mathscr{H}_{H^E} = -\psi_1(1 - s^E)w_t + \psi_2 \kappa = 0, \tag{4}$$

$$\mathscr{H}_H = \psi_1 w_t = \psi_2 \rho - \dot{\psi}_2. \tag{5}$$

Aus (2) und (3) folgt die Keynes-Ramsey-Regel für den Ausgabenpfad

$$\dot{E}_t / E_t = r_t - \rho, \tag{6}$$

der durch die Differenz zwischen Zinssatz und Zeitpräferenzrate festgelegt ist. Dieser Zeitpfad gilt nicht nur für einen einzelnen Haushalt, sondern auch im Aggregat, wobei E_t dann für die gesamtwirtschaftlichen Konsumausgaben steht. Durch die Normierung $E_t = p_t^Y Y_t := 1$ folgt aus (6) unmittelbar $r_t = \rho$, d.h. der Zinssatz entspricht der Zeitpräferenzrate und ist wie diese konstant. Aus (3), (4) und (5) folgt die Lohnänderungsrate

$$\dot{w}_t / w_t = -[\kappa/(1 - s^E) - \rho], \tag{7}$$

die durch die Qualität des Bildungssystems, die staatliche Ausbildungsförderung sowie die Zeitpräferenzrate festgelegt wird. Optimale Humankapitalakkumulation impliziert demnach, dass die Wachstumsrate des Lohnsatzes komparativ-statisch mit steigender Zeitpräferenzrate zunehmen, mit steigender Qualität der Ausbildung und steigender Ausbildungsförderung dagegen abnehmen muss.

2.2 Der Konsumgütermarkt

Das homogene Konsumgut wird von einer Vielzahl kompetitiv agierender Unternehmen hergestellt. Erforderlich sind dafür Zwischen- oder Vorleistungsgüter, deren Zahl und Qualität sich durch horizontale und vertikale Innovationsprozesse im Zeitablauf erhöhen. Jede horizontale Innovation erweitert die Palette an Zwischenprodukten und dient als Basisinnovation für nun mögliche Qualitätsinnovationen. Unterstellt wird die Produktionsfunktion

$$Y_t = \left[\int_0^{N_t} q_{mjt}^{1-\alpha} \, x_{mjt}^{\alpha} \, dj \right]^{1/\alpha}, \quad 0 < \alpha < 1, \tag{8}$$

mit der konstanten Substitutionselastizität $\varepsilon = 1/(1-\alpha)$, wobei N_t die horizontale Vielfalt, x_{mjt} die Inputmengen und q_{mjt} die Qualitäten der Zwischenprodukte $j \in$

$[0, N_t]$ nach m_j erfolgten Verbesserungsinnovationen angeben. Daraus berechnet sich die duale Durchschnittskostenfunktion, die aufgrund der vollkommenen Konkurrenz im Konsumgütermarkt dem Preis p_t^Y entspricht, als

$$p_t^Y = \left[\int_0^{N_t} q_{mjt} \, p_{mjt}^{-\frac{\alpha}{1-\alpha}} dj \right]^{-\frac{1-\alpha}{\alpha}} \tag{9}$$

mit p_{mjt} als Preis des Zwischenproduktes j. Durch Anwendung von Shephards Lemma erhält man für die Zwischenprodukte die Nachfragefunktionen

$$x_{mjt} = \frac{q_{mjt} \, p_{mjt}^{-\frac{1}{1-\alpha}} Y_t}{\left[\int_0^{N_t} q_{mjt} \, p_{mjt}^{-\frac{\alpha}{1-\alpha}} dj \right]^{\frac{1}{\alpha}}} \, .$$

Substituiert man Y_t schließlich durch E_t/p_t^Y mit $E_t = 1$ und p_t^Y aus (9), folgt

$$x_{mjt} = \frac{q_{mjt} \, p_{mjt}^{-\frac{1}{1-\alpha}}}{\int_0^{N_t} q_{mjt} \, p_{mjt}^{-\frac{\alpha}{1-\alpha}} dj} \, . \tag{10}$$

Die Nachfrage nach jedem Zwischenprodukt hängt demnach positiv von seiner Qualität und negativ von seinem Preis ab. Aufgrund des Kontinuums von Zwischenproduktmärkten ist die Preiselastizität der Nachfrage jeweils durch $-\varepsilon = -1/(1-\alpha)$ gegeben.

2.3 Die Zwischenproduktmärkte

Jeder Zwischenproduktmarkt wird durch eine horizontale Basisinnovation erschlossen. Das erfolgreiche Unternehmen erhält für seine Innovation (kostenlos) ein dauerhaftes Patent. Wie alle bereits existierenden Zwischenprodukte kann auch dieses neue Zwischenprodukt durch eine Abfolge vertikaler Verbesserungsinnovationen entlang einer Qualitätsleiter technologisch aufgewertet werden. Die Höhe der Innovationssprünge ist durch einen konstanten und in allen Märkten gleichen Sprossenabstand $\lambda > 1$ festgelegt. Nach m_j erfolgten Verbesserungsinnovationen ist der Qualitätsparameter durch

$$q_{mjt} = \lambda^{m_j} Q_\tau \tag{11}$$

gegeben, wobei Q_τ das durchschnittliche Qualitätsniveau

$$Q_t = (1/N_t) \int_0^{N_t} q_{mjt} \, dj \tag{12}$$

aller existierenden Zwischenprodukte zum Zeitpunkt $t = \tau$ der Markteinführung des neuen Produktes angibt. Durch diese Annahme ist sichergestellt, dass das durchschnittliche Qualitätsniveau durch die Einführung horizontaler Basisinnovationen nicht geändert wird. Die Durchführung von Verbesserungsinnovationen kann zu Patentkonflikten mit der originären Basisinnovation führen, die diese vertikale Produktlinie begründet hat. Um diesem Verteilungsaspekt Rechnung zu tragen, wird in Anlehnung an Li (2000) zugelassen, dass jeweils das Unternehmen, dem die ursprüngliche Basisinnovation gelungen ist, eine Lizenzvereinbarung mit allen Nachfolgeunternehmen in diesem Markt eingeht, die ihm einen konstanten Anteil $0 < \delta < 1$ an allen zukünftigen Gewinnen aus dem Verkauf der Zwischenprodukte gewährleistet. Damit belaufen sich die Gewinne aus einer Basisinnovation auf

$$\pi_{mjt}^N = \begin{cases} \pi_{mjt} & \text{für } m_j = 0 \\ \delta\pi_{mjt} & \text{für } m_j > 0 \end{cases} \tag{13}$$

und die Gewinne aus einer Verbesserungsinnovation auf

$$\pi_{mjt}^Q = \begin{cases} 0 & \text{für } m_j = 0 \\ (1-\delta)\pi_{mjt} & \text{für } m_j > 0 \; , \end{cases} \tag{14}$$

wobei $\pi_{mjt} = \pi_{mjt}^N + \pi_{mjt}^Q$ die insgesamt zu verteilenden laufenden Gewinne zum Zeitpunkt t aus dem Verkauf eines Zwischenproduktes j nach $m_j \geq 0$ erfolgten Verbesserungsinnovationen angibt.

Jedes Zwischenprodukt wird in einem nicht-kompetitiven Markt mittels der linearhomogen Produktionstechnologie $x_{mjt} = H_{jt}^X$ hergestellt, wobei für jede Gütereinheit der Einsatz einer Einheit Humankapital erforderlich ist. Die Durchschnittskosten der Herstellung einer Gütereinheit entsprechen folglich dem Lohnsatz w_t. Damit beläuft sich der insgesamt zu verteilende Gewinnstrom aus dem Verkauf eines Zwischenproduktes auf

$$\pi_{mjt} = (p_{mjt} - w_t) x_{mjt}. \tag{15}$$

Die Art der Preissetzung der Unternehmen hängt von der Marktstruktur in den Zwischenproduktmärkten und diese wiederum von den technologischen Marktbedingungen ab. Wie sich leicht zeigen lässt, lohnt es sich für einen technologischen Marktführer nicht, sich im eigenen Markt um eine weitere Verbesserungsinnovation zu bemühen. Der qualitative Abstand zum nächsten Verfolger beträgt daher genau eine Innovationsstufe. Im hier unterstellten Fall drastischer Innovationen wird der Preissetzungsspielraum nach oben nicht durch den nächsten Verfolger im eigenen Markt begrenzt, sondern durch das Angebot von substitutiven Zwischengütern der Konkurrenz. Die abgeleitete Preiselastizität der Nachfrage impliziert daher einen konstanten Aufschlagssatz $(1/\alpha)$ und damit einen Preis[2]

$$p_{mjt} = p_t = (1/\alpha)w_t. \tag{16}$$

Da der Preis für alle Zwischenprodukte ungeachtet ihrer unterschiedlichen Qualität gleich ist, vereinfachen sich die Nachfragefunktionen (10) unter Verwendung der Definition (12) für die Durchschnittsqualität zu

$$x_{mjt} = \frac{q_{mjt}}{N_t Q_t p_t}. \tag{17}$$

Die Nachfrage nach jedem Zwischenprodukt hängt demnach im Marktgleichgewicht positiv von der jeweiligen Qualität des Gutes im Verhältnis zur durchschnittlichen Qualität aller Güter ab, reduziert sich aber mit steigendem Preis und mit einer zunehmenden Gütervielfalt. Setzt man diese Nachfragefunktion zusammen mit der Preissetzungsfunktion (16) in die Gewinngleichung (15) ein, resultiert der laufende Gesamtgewinn

$$\pi_{mjt} = \frac{(1-\alpha)q_{mjt}}{N_t Q_t}. \tag{18}$$

Die Produktionsfunktion (8) für das Konsumgut vereinfacht sich unter Verwendung der Gleichungen (12), (16) und (17) zu

$$Y_t = \alpha[N_t Q_t]^{\frac{1-\alpha}{\alpha}}/w_t. \tag{19}$$

[2] Im Fall nicht-drastischer Verbesserungsinnovationen würde der technologische Marktführer den Limitpreis $p_t = \lambda^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} w_t$ setzen, der den nächsten Verfolger im Markt gerade noch von einem Markteintritt abhält. Erneut wäre der Aufschlagssatz konstant und marktunabhängig, so dass sich alle folgenden Überlegungen auf diesen Fall übertragen lassen.

Die Rate des langfristigen Produktivitätswachstums hängt folglich neben der Lohnänderungsrate, die in (7) bereits durch institutionelle Faktoren des Bildungssystems endogenisiert wurde, in entscheidender Weise von der Dynamik horizontaler und vertikaler Produktinnovationen ab. Dem Ansatz von Li (2000, 2002) folgend wird dabei der Tatsache Rechnung getragen, dass beide Arten von Innovationsprozessen simultan ablaufen. Da im Hinblick auf ihren stochastischen Charakter eine unterschiedliche Modellierung kaum plausibel begründet werden kann, werden hier aber nicht nur die vertikalen sondern auch die horizontalen Produktinnovationen durch F&E-gesteuerte Poisson-Prozesse beschrieben.

2.4 Qualitätsinnovationen

Die Qualität aller Zwischenprodukte kann durch Verbesserungsinnovationen beliebig oft erhöht werden. Die Entwicklung dieser Innovationen findet in einem separaten Forschungssektor statt. Modelliert wird der Innovationswettbewerb als eine Abfolge von Patentrennen, wobei der jeweilige Sieger mit seiner Innovation das bis dahin führende Unternehmen in seiner Spitzenstellung im Markt ablöst. Die Zahl m_j der realisierten Qualitätsinnovationen im Markt j folgt jeweils einem Poisson-Prozess mit der vertikalen Innovationsrate

$$h^Q_{mjt} = \frac{H^Q_{jt} Q_t}{\mu^Q q_{mjt}}, \tag{20}$$

die linear von dem in die marktspezifische Forschung nach Verbesserungsinnovationen investierten Humankapital H^Q_{jt} abhängt. Der Parameter $\mu^Q > 0$ gibt den (durchschnittlichen) Schwierigkeitsgrad von Verbesserungsinnovationen an, der Quotient q_{mjt}/Q_t spiegelt eine negative Externalität überdurchschnittlich vieler marktspezifischer Innovationserfolge wider, indem unterstellt wird, dass die Durchführung weiterer Verbesserungsinnovationen gerade in den Märkten besonders schwierig ist, die bereits durch ein besonders weit fortgeschrittenes Technologieniveau ausgezeichnet sind. Jedes Unternehmen, das sich im Wettlauf um die m-te Folgeinnovation im Markt j mit der Rate h^Q_{mjt} im infinitesimalen Zeitintervall dt engagiert, wird mit der Wahrscheinlichkeit $h^Q_{mjt}dt$ einen Innovationserfolg erzielen und sich den Patentwert V^Q_{mjt} in Höhe der erwarteten Gegenwartsgewinne als Technologieführer im

Markt aneignen können. Analog zum Bildungssektor kann der Staat auch im Forschungssektor durch Subventionen unterstützend eingreifen. Bei einem konstanten Subventionssatz $s^Q \geq 0$ für die F&E-Ausgaben impliziert freie Teilnahme an jedem Patentrennen

$$V_{mjt}^Q = \mu^Q(1 - s^Q)w_t q_{mjt}/Q_t \quad \forall \quad m_j > 0. \tag{21}$$

Der Kurswert eines innovativen Unternehmens ergibt sich aus der Gleichgewichtsbedingung

$$r_t = \pi_{mjt}^Q/V_{mjt}^Q + \dot{V}_{mjt}^Q/V_{mjt}^Q - h_{m+1,jt}^Q \tag{22}$$

auf dem Kapitalmarkt, nach der die erwartete Aktienrendite gerade dem sicheren Zinssatz entsprechen muss. Die erwartete Rendite setzt sich zusammen aus der Dividendenrate, der Kursänderungsrate sowie dem ständigen Risiko eines Wertverlustes infolge der Marktverdrängung durch einen Konkurrenten, dem die nächste Qualitätsinnovation gelingt. Das auf allen Märkten gleichermaßen bestehende Risiko schalten die risikoaversen Haushalte durch eine perfekte Diversifizierung ihrer Finanzanlagen gänzlich aus. Da der Zinssatz der Zeitpäferenzrate entspricht, folgt unter Verwendung von (14), (18) und (21) in (22)

$$\rho = (1 - \delta)(1 - \alpha)/[\mu^Q(1 - s^Q)w_t N_t] + \dot{w}_t/w_t - \dot{Q}_t/Q_t - h_t^Q. \tag{23}$$

Da außer der Innovationsrate keine marktspezifischen Variablen in dieser Arbitrage-Gleichung vorkommen, muss diese in allen Märkten unabhängig vom erreichten Technologieniveau gleich sein, d.h. $h_{mjt}^Q = h_t^Q \; \forall \; m_j$.

Damit resultiert aufgrund des Gesetzes der großen Zahlen aus (11) und (12) eine deterministische Wachstumsrate für das durchschnittliche Qualitätsniveau, die durch

$$\dot{Q}_t/Q_t = (\lambda - 1)h_t^Q \tag{24}$$

approximiert werden kann und die positiv von der vertikalen Innovationsrate und der Höhe der Qualitätssprünge abhängt.

2.5 Erweiterungsinnovationen

Aus schwer rechtzufertigenden Gründen werden horizontale Basisinnovationen im Gegensatz zu den vertikalen Verbesserungsinnovationen in der einschlägigen Literatur regelmäßig deterministisch modelliert. Da Basisinnovationen aber wohl kaum mit geringerem Risiko behaftet sind als die darauf fußenden Verbesserungsinnovationen, wird im Folgenden angenommen, dass auch die Zahl horizontaler Erweiterungsinnovationen einem Poisson-Prozess folgt. Um eine geglättete Entwicklung im Aggregat sicherzustellen, muss lediglich unterstellt werden, dass das Kontinuum von Zwischenproduktmärkten in Segmente (z.B. Industriebranchen) unterteilt werden kann, in denen jeweils F&E-gesteuerte horizontale Innovationsprozesse ablaufen. Über das Gesetz der großen Zahlen ergibt sich dann eine stetige Erweiterung der Palette an Zwischenprodukten. Die horizontale Innovationsrate

$$h_t^N = H_t^N / \mu^N \tag{25}$$

hängt auch hier linear vom eingesetzten Humankapital H_t^N ab, $\mu^N > 0$ gibt in Analogie zu den vertikalen Innovationsprozessen den Schwierigkeitsgrad der Durchführung horizontaler Erweiterungsinnovationen an.[3] Die Zahl horizontal differenzierter Zwischengüter berechnet sich dann als

$$N_t = \int_0^t h_{t'}^N \, dt',$$

deren Wachstumsrate unter Beachtung von (25) als

$$\dot{N}_t / N_t = \frac{H_t^N}{\mu^N N_t}. \tag{26}$$

Jedes Unternehmen i, das mit der Rate h_{it}^N im infinitesimalen Zeitintervall dt eine horizontale Innovation anstrebt, wird mit der Wahrscheinlichkeit $h_{it}^N dt$ einen Innovationserfolg erzielen und sich den Patentwert V_t^N in Höhe der erwarteten Gegenwartsgewinne im neu erschlossenen Markt aneignen können. Bezüglich der staatlichen Subventionspolitik wird aus Gründen der Transparenz der entscheidenden

[3] In ihren rudimentären Modellvarianten nehmen Aghion/Howitt (1998, S. 408), Dinopoulos/Thompson (1999) und Stadler (2003) an, dass Erweiterungsinnovationen bloße Folge kostenloser Imitationen sind.

Wirkungsmechanismen zunächst ein von s^Q unabhängiger Subventionssatz $s^N \geq 0$ unterstellt. Freie Teilnahme an jedem Patentrennen impliziert

$$V_t^N = \mu^N(1 - s^N)w_t. \tag{27}$$

Der Kurswert eines etablierten Unternehmens, dem durch eine horizontale Basisinnovation die Erschließung eines neuen Marktes gelungen ist, bestimmt sich aus der Gleichgewichtsbedingung

$$r_t = \pi_{mjt}/V_t^N + \dot{V}_t^N/V_t^N - (\tilde{V}_{mjt}/V_t^N)h_t^Q, \tag{28}$$

wobei $\tilde{V}_{mjt}$ den erwarteten Gegenwartswert der Gewinne $(1 - \delta)\pi_{mjt}$ angibt, die ein etabliertes Unternehmen mit einem Patent auf die Basisinnovation verliert, sobald einem herausfordernden Unternehmen die erste Verbesserungsinnovation gelingt. Der Wert dieser Verbesserungsinnovation aus der Sicht eines Herausforderers ergibt sich unter Beachtung von (18) als $V_{mjt}^Q = (q_{mjt}/Q_t)\tilde{V}_{mjt}$, da die Gewinne aus einer Verbesserungsinnovation immer vom erreichten Qualitätsniveau im Verhältnis zum durchschnittlichen Qualitätsniveau in allen Märkten abhängen, das Qualitätsniveau einer Basisinnovation aber annahmegemäß immer dem durchschnittlichen Qualitätsniveau entspricht. Aus den Bedingungen (21) und (27) folgt unmittelbar $V_{mjt}^Q/V_t^N = \mu q_{mjt}/Q_t$ mit $\mu := [\mu^Q(1 - s^Q)/\mu^N(1 - s^N)]$, so dass sich der relative Wertverlust als $\tilde{V}_{mjt}/V_t^N = \mu$ bestimmen lässt (vgl. die ausführliche Herleitung in Li 2000). Zusammen mit (17) und (27) in (28) eingesetzt folgt

$$\rho = (1 - \alpha)/[\mu^N(1 - s^N)w_t N_t] + \dot{w}_t/w_t - \mu h_t^Q. \tag{29}$$

Mit der Markträumungsbedingung für Humankapital,

$$H_t = H_t^X + H_t^E + H_t^Q + H_t^N, \tag{30}$$

das im Produktionssektor, im Bildungssektor und in den beiden F&E-Sektoren Verwendung findet, wird das Modell geschlossen.

3 Das langfristige Wachstumsgleichgewicht

Im steady state-Wachstumsgleichgewicht bleiben die Einsatzverhältnisse des Humankapitals in den vier Sektoren über die Zeit konstant. Die Nachfrage nach Humankapital im Produktionssektor beträgt unter Beachtung von (12) und (16)

$$H_t^X = \int_0^{N_t} x_{jt} dj = 1/p_t = \alpha/w_t.$$

Daraus folgt unmittelbar, dass die Wachstumsraten des Humankapitals in allen Verwendungsbereichen der negativen Änderungsrate des Lohnsatzes aus (7) entspricht, d.h.

$$\dot{H}_t/H_t = \dot{H}_t^X/H_t^X = \dot{H}_t^E/H_t^E = \dot{H}_t^Q/H_t^Q = \dot{H}_t^N/H_t^N = -\dot{w}_t/w_t = \kappa/(1-s^E) - \rho. \tag{31}$$

Damit ergibt sich aus (19) die steady state-Wachstumsrate

$$\dot{Y}_t/Y_t = \frac{1-\alpha}{\alpha}(\dot{N}_t/N_t + \dot{Q}_t/Q_t) + \dot{H}_t/H_t. \tag{32}$$

Antriebskräfte des Wachstums sind demnach die Humankapitalakkumulation im Bildungssektor sowie horizontale und vertikale Innovationen in den Forschungssektoren. Diese Wachstumskräfte wirken jedoch nicht unabhängig voneinander. Vielmehr lässt sich zeigen, dass sowohl die horizontale als auch die vertikale Innovationsdynamik direkt auf die Humankapitalakkumulation zurückzuführen ist. Die Wachstumsrate der Zahl horizontal differenzierter Zwischenprodukte muss im steady state-Gleichwicht aufgrund (26) und (31) gerade der Wachstumsrate des Humankapitals entsprechen, d.h.

$$\dot{N}_t/N_t = \dot{H}_t/H_t = \kappa/(1-s^E) - \rho. \tag{33}$$

Die Wachstumsrate des durchschnittlichen Qualitätsniveaus erhält man aus (23) und (29) unter Verwendung von (24) und (31) als

$$\dot{Q}_t/Q_t = \frac{(\lambda-1)(1-\delta-\mu)}{(\lambda-1+\delta)\mu}\left[\dot{H}_t/H_t + \rho\right] = \frac{(\lambda-1)(1-\delta-\mu)\kappa}{(\lambda-1+\delta)\mu(1-s^E)}. \tag{34}$$

Um sicherzustellen, dass sich die Unternehmen nicht nur in horizontalen, sondern auch in vertikalen Innovationsprojekten engagieren, muss $\mu < 1-\delta$ unterstellt werden. Die Dynamik horizontaler wie vertikaler Produktinnovationen hängt dann indirekt über die Humankapitalakkumulation wie diese von den institutionellen Rahmenbedingungen im Bildungsbereich ab, die vertikale Innovationsdynamik zusätzlich von den Rahmenbedingungen im Forschungsbereich. Hohe vertikale Innovationssprünge λ und hohe relative Subventionssätze s^Q/s^N fördern das Qualitätswachstum, hohe Lizenzgebühren δ und hohe relative Schwierigkeitsgrade μ^Q/μ^N reduzieren es.

Mit den Bestimmungsgleichungen (31), (33) und (34) für die einzelnen Wachstumsraten ist das Modell gelöst.[4] Die Produktivitätswachstumsrate in (32) ergibt sich schließlich durch die Aggregation der gewichteten Einzeleffekte als

$$\dot{Y}_t/Y_t = \left[1 + \frac{(1-\alpha)(\lambda-1)(1-\delta-\mu)}{(\lambda-1+\delta)\mu}\,\frac{\kappa}{1-s^E} \;-\; \rho\right]/\alpha.$$

Wie in den semi-endogenen Wachstumsmodellen resultiert kein Skaleneffekt. Es ist jedoch nicht das exogen vorgegebene Wachstum der Beschäftigtenzahl, das die Produktivitätsentwicklung bestimmt, sondern die Humankapitalakkumulation, die ihrerseits endogen von den angebots- und nachfrageseitigen Bedingungen im Bildungssektor abhängt. Die stetig zunehmende Qualifikation der Arbeitsbevölkerung ist wiederum Voraussetzung dafür, dass horizontale und vertikale Innovationsprozesse ohne nachlassende Dynamik ablaufen können. Bildung, Ausbildung und Qualifikation erhalten damit auch in den innovationsgetriebenen Wachstumsmodellen die Bedeutung, die ihnen im Grundmodell von Lucas (1988) bereits zugeschrieben wurde. Aus der aufgezeigten Interdependenz von Bildung und Innovation ergeben sich zwangsläufig neue wirtschaftspolitische Einsichten, die sich insbesondere auf die Bildungspolitik beziehen.

4 Implikationen für die staatliche Bildungs- und Forschungspolitik

Im Vergleich zu den Qualitätsleitermodellen der ersten Generation, die sich auf die isolierte Betrachtung vertikaler Innovationen beschränken, führt die gleichzeitige Berücksichtigung horizontaler Basis- bzw. Erweiterungsinnovationen dazu, dass sich die

[4] Mit den Einsätzen $H_t^X = \alpha/w_t$, $H_t^E = (\dot{H}_t/H_t)H_t/\kappa$, $H_t^Q = (\dot{Q}_t/Q_t)N_t/(\lambda-1)$ und $H_t^N = (\dot{H}_t/H_t)\mu^N N_t$ in den vier Sektoren können mittels der Markträumungsbedingung (30) sowie einer der beiden Anreizbedingungen (23) oder (29) schließlich noch die Variablen w_t und N_t bestimmt werden.

Forscher und mit ihnen das Humankapital auf immer mehr Zwischenproduktmärkte verteilen. Eine einmalige Erhöhung des Humankapitals würde über eine stärkere Diversifizierung der Forschungsanstrengungen in immer mehr Märkten zwar einen positiven Niveaueffekt in Produktion bzw. Produktivität bewirken, aber erst ein konstantes Humankapitalwachstum ist in der Lage, dauerhaft positive Wachstumsraten der Produktivität zu generieren. Folglich ist es die simultane Berücksichtigung von horizontalen und vertikalen Innovationsprozessen, die auf plausible Weise den Skaleneffekt eliminiert. Von der fortschrittspessimistischen Annahme eines dauerhaft ansteigenden Schwierigkeitsgrades bei der Durchführung von Innovationsprojekten muss dabei kein Gebrauch gemacht werden.

Akzeptiert man den Diversifizierungsmechanismus zur Elimierung des Skaleneffektes, liegen die Folgen einer staatlichen Subventionspolitik im F&E-Bereich auf der Hand. Nur ein unterschiedlicher Subventionssatz für horizontale und vertikale Innovationsanstrengungen wäre geeignet, über eine Änderung der Forschungsanreize Humankapital vom horizontalen Forschungssektor in den vertikalen umzulenken und dadurch das Wachstum zu stimulieren. Da für staatliche Institutionen eine derart subtile Differenzierung der unternehmerischen Forschungsvorhaben kaum möglich sein dürfte, wird von einem einheitlichen Subventionssatz $s^Q = s^N$ ausgegangen, der dann in den Bestimmungsgleichungen für die einzelnen Wachstumsraten nicht mehr auftaucht. Unter diesen Umständen kann eine Variation des Subventionssatzes für Forschungsausgaben nur einen Niveaueffekt, aber keinen Wachstumseffekt auslösen.

Die langfristigen Produktivitätswachstumsraten hängen vielmehr entscheidend von der Bildungspolitik ab, der somit eine Schlüsselrolle in der Wachstumspolitik zukommt. Staatliche Ausgaben zur nachfrageseitigen Unterstützung der Ausbildung sowie zur Erhöhung der Ausbildungsqualität sind im präsentierten Modell gleichermaßen geeignet, sowohl direkt über die Humankapitalakkumulation als auch indirekt über die horizontale und vertikale Innovationsdynamik das Produktivitätswachstum zu erhöhen.

Der Vorrang der Bildungspolitik, der anhand eines Modells abgeleitet wurde, das in seinen wesentlichen Elementen im Einklang mit den stilisierten empirischen Fakten steht, lässt das enttäuschende Abschneiden der deutschen Jugendlichen in der PISA-Studie in einem besonders düsteren Licht erscheinen. Die Qualifikationsdefizite der jüngeren Generation im internationalen Vergleich zeigen akuten Handlungsbedarf aller involvierten Institutionen an. Die Qualität der Ausbildung muss dringend verbessert werden. Dies schließt finanzwirksame Maßnahmen einer aktiven staatlichen Bildungspolitik ausdrücklich ein. Die Einsicht sollte reifen, dass Einsparungen im Bildungswesen mittel- und langfristig ein Nachlassen der Innovations- und Wachstumsdynamik zur Folge haben.

Literaturverzeichnis

Aghion, Ph., Howitt, P. (1992), A Model of Growth through Creative Destruction. *Econometrica* 60 323-351.

Aghion, Ph., Howitt, P. (1998), *Endogenous Growth Theory.* MIT Press, Cambridge, MA.

Arnold, L.G. (1998), Growth, Welfare, and Trade in an Integrated Model of Human-Capital Accumulation and Research. *Journal of Macroeconomics* 20, 81-105.

Arnold, L.G. (2002), On the Effectiveness of Growth-Enhancing Policies in a Model of Growth without Scale Effects. *German Economic Review* 3, 339-346.

Barro, R.J. (2001), Human Capital and Growth. *American Economic Review, P&P,* 91, 12-17.

Barro, R.J., Sala-i-Martin, X. (2003), *Economic Growth.* 2. Aufl., MIT Press, Cambridge, MA.

Blackburn, K.B., Hung, V.T.Y., Pozzolo, A.F. (2000), Research, Development and Human Capital Accumulation. *Journal of Macroeconomics* 22, 189-206.

Dinopoulos, E., Thompson, P. (1998), Schumpeterian Growth without Scale Effects. *Journal of Economic Growth* 3, 313-335.

Dinopoulos, E., Thompson, P. (1999), Scale Effects in Schumpeterian Models of Economic Growth. *Journal of Evolutionary Economics* 9, 157-185.

Eicher, T.S. (1996), Interaction Between Endogenous Human Capital and Technological Change. *Review of Economic Studies* 63, 127-144.

Grossman, G.M., Helpman, E. (1991), *Innovation and Growth in the Global Economy.* MIT Press, Cambridge, MA.

Hanushek, E., Kimko, D.D. (2000), Schooling, Labor-Force Quality, and the Growth of Nations. *American Economic Review* 90, 1184-1208.

Jones, C.I. (1995a), Time Series Tests of Endogenous Growth Models. *Quarterly Journal of Economics* 110, 495-525.

Jones, C.I. (1995b), R&D-Based Models of Economic Growth. *Journal of Political Economy* 103, 759-784.

Jones, C.I. (1999), Growth: With or without Scale Effects? *American Economic Review, P&P*, 89, 139-144.

Jones, C.I. (2002), Sources of U.S. Economic Growth in a World of Ideas. *American Economic Review* 92, 220-239.

Kortum, S. (1997), Research, Patenting, and Technological Change. *Econometrica* 65, 1389-1419.

Krueger, A.B., Lindahl, M. (2001), Education for Growth: Why and For Whom? *Journal of Economic Literature* 39, 1101-1136.

Li, C.-W. (2000), Endogenous vs. Semi-Endogenous Growth in a Two-R&D-Sector Model. *Economic Journal* 110, C109-C122.

Li, C.-W. (2002), Growth and Scale Effects: The Role of Knowledge Spillovers. *Economics Letters* 74, 177-185.

Lloyd-Ellis, H., Roberts, J. (2002), Twin Engines of Growth: Skills and Technology as Equal Partners in Balanced Growth. *Journal of Economic Growth* 7, 87-115.

Lucas, R.E. (1988), On the Mechanics of Economic Development. *Journal of Monetary Economics* 22, 3-42.

Mankiw, N.G., Romer, D., Weil, D.N. (1992), A Contribution to the Empirics of Economic Growth. *Quarterly Journal of Economics* 107, 407-437.

OECD (2001), Knowledge and Skills for Life. Results from PISA 2000. Paris.

Peretto, P. (1998), Technological Change and Population Growth. *Journal of Economic Growth* 3, 283-311.

Romer, P.M. (1990), Endogenous Technological Change. *Journal of Political Economy* 98, 71-102.

Segerstrom, P.S. (1998), Endogenous Growth without Scale Effects. *American Economic Review* 88, 1290-1310.

Solow, R.M. (1991), New Directions in Growth Theory. In: B. Gahlen u.a. (Hrsg.), *Wachstumstheorie und Wachstumspolitik. Ein neuer Anlauf*, 3-17.

Stadler, M. (2003), Innovation and Growth: The Role of Labor-Force Qualification. In: L. Bellmann, R. Hujer (Hrsg.), *Beiträge zur Arbeitsmarkt- und Berufsforschung* 277, 1-12.

Uzawa, H. (1965), Optimum Technical Change in an Aggregative Model of Economic Growth. *International Economic Review* 6, 18-31.

Young, A. (1998), Growth without Scale Effects. *Journal of Political Economy* 106, 41-63.