

Modelle ökologisch begrenzten Wachstums

Von Wolfgang Buchholz und Dieter Cansier

Es wird die Behandlung der Umweltschutzproblematik in der Theorie des gleichgewichtigen Wirtschaftswachstums analysiert.

Die Probleme der Umweltverschmutzung und der Knappheit natürlicher Ressourcen haben den Wachstumsoptimismus gebrochen, so daß vielen eine völlige ökonomische Umorientierung unumgänglich scheint. Demgegenüber hält die Mehrzahl der Wirtschaftswissenschaftler gewisse einschränkende Maßnahmen zwar für erforderlich, sieht darin aber keine prinzipielle Beeinträchtigung eines fortgesetzten Wirtschaftswachstums. Diese Vorstellung findet auf theoretischer Ebene ihren Niederschlag in neuen Wachstumsmodellen, die ökologische Restriktionen miteinbeziehen (*d'Arge* 1971, *Keeler* et al. 1971, *Smith* 1972, *Forster* 1972, *Strøm* 1973, *d'Arge* et al. 1973, *Mäler* 1974, *Cansier* 1975, S. 46 ff., *Bender* 1976, S. 178 ff., *Gruver* 1976, *Nijkamp* 1977, S. 103 ff.). Die Fragestellungen dieser Theorie begrenzten Wachstums sind im wesentlichen identisch mit denen der herkömmlichen Wachstumstheorie: Zum einen wird nach gleichgewichtigen und stabilen, zum anderen nach „optimalen“ Wachstumspfaden gesucht. Noch stärker als in der traditionellen Wachstumstheorie rückt dabei aber die Bestimmung von Optimalpfaden in den Vordergrund. Die Gleichgewichtsanalyse, die in der Literatur bislang eher am Rande steht (*d'Arge*, *Strøm*, *Bender*, *Cansier*), bildet daher das Thema der vorliegenden Arbeit.

Wir beginnen mit der Erörterung der ökologischen Randbedingungen und können zeigen, daß unter naheliegenden Annahmen über die Zielfunktion zwischen bestimmten Typen von Schadstoffen nicht unterschieden werden muß. Davon ausgehend wird ein Grundmodell des *Harrod-Domar*-Typs entwickelt, das sich ansatzweise bereits bei *Strøm* findet. Im Rahmen dieses Modells wurden bislang allerdings nur Fortschreibungen ökologisch bereits gleichgewichtiger Zustände untersucht. Hier hingegen sollen Übergangsprozesse, die bei anfänglichem Ungleichgewicht erst zu stabilen ökologischen Zuständen führen, besonders berücksichtigt werden. Wie sehr das Modellverhalten vom Charakter der Umweltschutzausgaben abhängt, macht der Vergleich mit dem *Harrod-Domar*-Modell von *d'Arge* deutlich, in dem

sich die Problematik des Übergangsprozesses von vornherein nicht stellt. Die neoklassische Version des Grundmodells wird von uns dann im Gegensatz zu den Arbeiten *Ströms* und *Benders* mit Hilfe einer verbal gehaltenen ökonomischen Interpretation entwickelt und dem postkeynesianischen Ansatz gegenübergestellt.

1. Die ökologischen Randbedingungen

Die Modelle ökologisch begrenzten Wachstums berücksichtigen die Schädigung der Umwelt durch Produktion und Konsum sowie die Verbesserung der Umweltqualität durch Umweltschutzmaßnahmen: Wieviel Schadstoffeinheiten durch ein Sozialprodukt in Höhe von Y entstehen, wird durch $g(Y)$ angegeben. Die Umweltschutzaufwendungen r_t messen die Intensität der Umweltschutzmaßnahmen zur Zeit t . Die Variable $h(r_s | s \leq t)$ steht für die Zahl der Schadstoffeinheiten, die aufgrund der bis t getätigten Umweltschutzaufwendungen r_s ($s \leq t$) entsorgt werden können. Damit wirkt nach Einsatz der Umweltpolitik zur Zeit t die Schadstoffmenge $w_t = g(Y_t) - h(r_s | s \leq t)$ neu auf die Umweltmedien ein. Diese Gleichung beschreibt für Umwelteinwirkungen mit Augenblickscharakter, bei denen sich wie bei Lärm oder Erschütterungen die Umweltbeeinträchtigung mit den laufenden Emissionen deckt, bereits die Verschmutzungsfunktion. Bei Schadstoffen hingegen, die sich in der Umwelt akkumulieren, ergibt sich die Umweltverschmutzung zur Zeit T als Summe der bis zum Zeitpunkt T insgesamt angesammelten Schadstoffbestände: $W_T = \int_0^T (g(Y_t) - h(r_s | s \leq t) - p(W_t)) dt$. Die Funktion $p(W_t)$ berücksichtigt den natürlichen Schadstoffabbau, dessen Ausmaß vom zum Zeitpunkt t erreichten Verschmutzungsniveau abhängt. Die Abbaumenge kann beispielsweise mit steigendem Schadstoffbestand zunehmen oder wie bei *d'Arge* in jeder Periode gleich sein. Als ökologisches Ziel wird nun in beiden Fällen ein zeitlich invariables Umweltqualitätsniveau postuliert. Mit dieser Annahme verschwinden die formalen Unterschiede bei der Behandlung der beiden Arten von Umweltbelastungen. Für Schadstoffe, die sich nicht akkumulieren, lautet die Zielfunktion $w_t = g(Y_t) - h(r_s | s \leq t) = \alpha_1 = \text{const.}$ Zu jedem Zeitpunkt t wird nur die Emission einer konstanten Schadstoffmenge zugelassen. Bei kumulativen Effekten bedeutet ein konstantes Verschmutzungsniveau $w_t = \dot{W}_t = 0$ oder $g(Y_t) - h(r_s | s \leq t) = p(W_0) = \alpha_2 = \text{const.}$ für alle t . Der Nettozufluß der Schadstoffe muß auf das Maß α_2 beschränkt werden, das sich auf natürliche Weise beim anfänglichen Verschmutzungsniveau abbaut. In beiden Fällen ist die ökologische Zielfunktion also gleich, und zwar

$$(1) \quad g(Y_t) - h(r_s \mid s \leq t) = \alpha = \text{const.}$$

Die Funktion h wird hauptsächlich durch die Annahme konkretisiert, daß der Reinigungseffekt zum Zeitpunkt t von der Gesamtheit $R_t = \int_0^t r_s ds$ der bis t getätigten Umweltschutzaufwendungen abhängt. Die Ausgaben r_t lassen sich dann als Investitionen \dot{R}_t in den Umweltkapitalstock R_t ansehen. Mit dieser Annahme arbeitet unser Grundmodell. Im anderen Extrem hängt der Effekt der Umweltpolitik zur Zeit t ausschließlich von den augenblicklichen Aufwendungen r_t ab, wie etwa beim Einsatz von Chemikalien zur Beseitigung von Ölverschmutzungen.

Die Einbeziehung der Umweltpolitik ändert die Verwendungsgleichung des Sozialprodukts; sie lautet für das Grundmodell jetzt $Y_t = C_t + \dot{K}_t + \dot{R}_t$, wobei C_t den Konsum und \dot{K}_t die produktiven Investitionen darstellen. Mit dieser Aufteilung wird von vorneherein davon ausgegangen, daß Umweltschutzausgaben unproduktiv sind. Diese Annahme ist nicht unbedingt realistisch, wird zur Vereinfachung hier aber gemacht. Gehen die Umweltschutzaufwendungen nicht zu Lasten des Konsums und bleibt die konstant gesetzte Sparquote s von der Umweltpolitik unbeeinflusst, so lautet die ökonomische Gleichgewichtsbedingung:

$$(2) \quad sY_t = \dot{K}_t + \dot{R}_t$$

2. Ein postkeynesianisches Grundmodell

Im postkeynesianischen Modell¹ hängt die Produktion vom eingesetzten Kapital und der Kapitalproduktivität ab: $Y = \sigma K$. Auch auf der ökologischen Seite des Modells werden lineare Beziehungen angenommen. Für die ökologische Gleichgewichtsbedingung gilt dann $\alpha = \tau(\sigma K_t) - \pi R_t$. Der Schadstoffkoeffizient τ gibt an, wieviel Schadstoffeinheiten durch Produktion und Verbrauch einer Einheit des Sozialproduktes entstehen. Er ist ein Indikator für die Schadstoffintensität der Wirtschaftsstruktur. π steht für die Effizienz des Entsorgungskapitalstocks und mißt, welche einmal entstandene Schadstoffmenge von einer Einheit des Entsorgungskapitals beseitigt werden kann².

¹ Das Modell Ströms ist komplizierter als unser Grundmodell, jedoch ist seine Unterscheidung zwischen Verschmutzung aus Produktion und Verbrauch überflüssig, da wegen der Linearität aller relevanten Zusammenhänge auch die Gesamtverschmutzung linear vom jeweiligen Sozialprodukt abhängt.

² Zurechnungsschwierigkeiten ergeben sich für umweltfreundliche Herstellungsverfahren, die von vornherein relativ wenig Schadstoffe entstehen lassen, dafür aber höhere Kosten verursachen. Die ökologische Wirkung dieser anteiligen Umweltschutzaufwendungen besteht darin, daß je Sozialprodukts-

Als Rate für das ökologisch begrenzte gleichgewichtige Wirtschaftswachstum erhält man

$$(3) \quad \hat{Y} = \frac{s \sigma}{1 + \frac{\tau}{\pi} \sigma}$$

Mit dieser Rate muß die Wirtschaft im ökonomischen Gleichgewicht wachsen, wenn die gegebenen ökologischen Ausgangsbedingungen erhalten bleiben sollen. Eine höhere (niedrigere) Wachstumsrate mag zwar ökonomisch gleichgewichtig sein, würde aber in jeder Periode zu weiteren Verschlechterungen (Verbesserungen) der Umweltqualität führen. Die Rate ist kleiner als im konventionellen Fall mit $\hat{Y} = s \sigma$. Hierin kommt der Zielkonflikt zwischen Umweltschutz und gleichgewichtigem Wirtschaftswachstum für die Politik einer konstanten Umweltqualität zum Ausdruck. Die Wachstumseinbußen hängen von den Parametern τ , π und σ ab. Je höher τ und je niedriger π ist, um so größer ist der Wachstumsverlust. Der Quotient τ/π gibt an, wieviel zusätzliche Einheiten Umweltkapital zur Entsorgung einer zusätzlichen Einheit Sozialprodukt erforderlich sind. Umgekehrt zeigt π/τ an, wieviel zusätzliche Einheiten des Sozialproduktes eine zusätzliche Einheit Umweltkapital entsorgen kann. Bei Vernachlässigung struktureller Faktoren (Änderungen der Produktions- und Konsumstruktur bei konstantem technischem Wissen) kann π/τ als Indikator für den Stand der Vermeidungstechnik angesehen werden. Umweltfreundliche technische Fortschritte erhöhen den Koeffizienten π/τ . Neue schadstoffärmere Herstellverfahren und Produkte reduzieren den Schadstoffkoeffizienten τ , während Fortschritte in der Entsorgung und im Recycling die Effizienz des Entsorgungskapitals π steigern. Die Teileffekte sind wie folgt zu interpretieren: Neue schadstoffärmere Produktionsverfahren sind an Produktivtechnologien gebunden. Sie führen dazu, daß mit Hilfe des anteiligen Umweltkapitals am Produktivkapital mehr Schadstoffe als bisher von vornherein verhindert werden können. Unter der Bedingung, daß diese Innovationen die Kapitalproduktivität nicht verschlechtern, kann mit Hilfe des gleichen Anteils der produktiven Investitionen am Sozialprodukt das gleiche Wirtschaftswachstum bei einer sinkenden

einheit weniger Schadstoffe anfallen. Das Modell läßt für diese Aufwendungen zwei Interpretationen zu. (1) Sie werden nicht explizit berücksichtigt. Man stellt sich vor, sie sind in den Produktivinvestitionen enthalten. In die Entsorgungsfunktion geht nur der Teil der gesamten Umweltschutzaufwendungen ein, der der nachträglichen Beseitigung einmal entstandener Schadstoffe durch Entsorgungs- und Recycling-Technologien dient. (2) Sie werden in die Entsorgungsfunktion einbezogen. Um eine Doppelzählung der ökologischen Effekte zu vermeiden, müßte die Schadstoffentstehungsfunktion um eventuelle umweltfreundliche Eigenschaften der Produktionsverfahren bereinigt werden.

Wachstumsrate der Schadstoffproduktion erreicht werden. Soll der Vorteil des technischen Fortschritts wachstumspolitisch genutzt und die Umweltqualität konstant gehalten werden, kann die gleichgewichtige Wachstumsrate des Sozialproduktes erhöht werden, indem die Entsorgungsinvestitionen zugunsten der produktiven Investitionen eingeschränkt werden. Die im Gleichgewicht notwendige Höhe des Anteils der Entsorgungsinvestitionen beträgt: $\dot{R}/Y = \frac{s \sigma \tau}{\pi + \tau \sigma}$. In ähnlicher Weise implizieren effizientere Entsorgungstechniken — soweit sie die Kapitalproduktivität nicht vermindern —, daß zur Bewahrung der Umweltqualität eine geringere Umweltschutzinvestitionsquote ausreicht und der Anteil der Produktivinvestitionen gesteigert werden kann. Daraus läßt sich folgern: Je entwickelter der Stand der Umwelttechnik *cet. par.* ist, desto geringer ist der Wachstumsverlust nach Übergang zu einem ökologischen Gleichgewichtspfad.

Ebenso wie im konventionellen *Harrod-Domar*-Modell besteht auch im restringierten Fall eine positive Beziehung zwischen Kapitalproduktivität und Wachstumsrate. Auch der kapitalsparende technische Fortschritt erhöht die Wachstumsrate, weil die höhere Kapitalproduktivität eine Verminderung des Anteils der produktiven Investitionen am Sozialprodukt und somit eine Erhöhung der Umweltschutzinvestitionsquote zuläßt. Die durch Steigerung der Kapitalproduktivität erreichbare Wachstumsrate ist durch $s(\pi/\tau)$ nach oben begrenzt, wenn nicht das umweltpolitische Ziel verletzt werden soll. Umweltfreundlicher und kapitalsparender technischer Fortschritt sind im Hinblick auf den Zielkonflikt zwischen Umweltschutz und Wirtschaftswachstum nicht beliebig substituierbar, d. h. entsprechende Erhöhungen der Wachstumsrate wie im unrestringierten Fall lassen sich unter Umständen nur durch eine gleichzeitige Vergrößerung von π/τ und σ erreichen. Überdies wird auch in dem Bereich, in dem sich eine Erhöhung der restringierten Wachstumsrate durch Vergrößerung von σ allein im Prinzip noch erreichen ließe, eine kombinierte Förderung beider Techniken nahegelegt. Es herrschen nämlich in gewisser Weise ertragsgesetzliche Bedingungen, da bei festem π/τ eine gleiche Erhöhung von σ mit wachsendem σ einen immer geringeren Einfluß auf die Wachstumsrate zeigt.

Die Wachstumsrate im postkeynesianischen Grundmodell wird für keine Parameterkombination negativ. Überdies hängt sie nicht von Art und Niveau des Umweltziels ab. Auch die Annahme über das Selbstreinigungsvermögen spielt keine Rolle. Beides ist insofern nicht verwunderlich, als bei der Ableitung des Gleichgewichtspfades davon ausgegangen wurde, daß bereits im Ausgangszustand K_0 und R_0 im „richtigen“ Verhältnis stehen; und zwar muß $R_0 = (\tau \sigma K_0 - \alpha)/\pi$ gelten. Diese Anfangsbedingung läßt sich in zweifacher Weise deuten. Einmal

kann der anfängliche Umweltkapitalstock bereits ausreichen, um die Umweltbelastungen auf dem politisch angestrebten Niveau zu halten. Realistischer ist die Annahme, daß der vorhandene Entsorgungskapitalstock cet. par. zur Stabilisierung eines herrschenden ökologischen Minimalzustandes genügt. Das Modell beschreibt dann die Bedingungen für den Schutz vor weiteren Verschlechterungen im Wachstumsverlauf. α geht entscheidend nur in die Anfangsbedingungen ein. Bei Schadstoffen, die sich nicht akkumulieren, bedeutet α die bei gegebenem Umweltziel zulässigen Emissionen, so daß der notwendige Entsorgungskapitalstock cet. par. stets um so höher ist, je höher das Umweltziel festgesetzt ist. Bei Schadstoffen, die sich akkumulieren, ist dies anders. Wenn eine Ungleichgewichtigkeit zwischen Schadstoffzufluß und -abfluß besteht oder das stabilisierte Verschmutzungsniveau von dem angestrebten Reinheitsgrad der Umweltmedien abweicht, dann gibt α nicht mehr zugleich auch die zulässige Emissionsobergrenze an, sondern ist lediglich Indikator für das natürliche Selbstreinigungsvermögen.

3. Der Übergangsprozeß

Der Übergangsprozeß soll zunächst für den einfacheren Fall sich nicht akkumulierender Schadstoffe beschrieben werden. Ein anfängliches ökologisches Ungleichgewicht liegt dabei vor, wenn die ursprünglichen Nettoemissionen $\tilde{\alpha} := \tau Y_0 - \pi R_0$ das gewählte Umweltziel α übersteigen. Der dann erforderliche Übergang zu einem ökologisch ausbalancierten Zustand ist durch die Modellparameter nicht vollständig bestimmt. Das System hat noch einen Freiheitsgrad. Ist z. B. eine konstante Sparquote s vorgegeben, bedarf es noch einer Entscheidung über die „Verteilung“ der Ersparnis auf die beiden Kapitalstöcke. Von vornherein seien nur lineare Strategien zugelassen, d. h. der Anteil der produktiven Investitionen am Sozialprodukt (s_1) soll konstant sein. Während des gesamten Übergangsprozesses besteht dann ein ökonomisch gleichgewichtiges Wirtschaftswachstum mit der Rate $s_1 \sigma$.

Gefragt wird jetzt nach Bedingungen an s_1 , unter denen sich bei ungleichgewichtigem Anfangszustand zu irgendeinem Zeitpunkt T ein ökologisches Gleichgewicht einstellt, bei dem also $\tau Y_T - \pi R_T = \alpha$ gilt. An der Stelle T kann das Wachstum dann auf einen Gleichgewichtspfad mit der zuvor abgeleiteten ökologisch restringierten Rate einschwenken. Übersteigt s_1 die Quote $\frac{s}{1 + (\tau/\pi) \sigma}$, die unter den gegebenen Bedingungen gerade für die Bewahrung des ursprünglichen Umweltqualitätsniveaus erforderlich ist, so verschlechtert sich die Umweltqualität immer weiter und ein ökologischer Gleichgewichtszustand

wird niemals erreicht. Überschreitet hingegen $\frac{s}{1 + (\tau/\pi) \sigma}$ die produktive Investitionsquote s_1 , so sinkt der zur Stabilisierung des ökologischen Ausgangszustandes nötige Anteil am Sozialprodukt von $\frac{s(\tau/\pi)}{1 + (\tau/\pi) \sigma} Y_t$ auf $s_1 (\tau/\pi) \sigma Y_t$. Die verbleibende Ersparnis in Höhe von $s - s_1 (1 + (\tau/\pi) \sigma) Y_t$ fließt annahmegemäß ebenfalls dem Umweltkapitalstock zu. Mit dem dadurch entstehenden zusätzlichen Umweltkapital \tilde{R}_t kann die überschüssige Verschmutzung allmählich abgebaut werden. Es ist leicht zu sehen, daß sich \tilde{R}_t berechnet als

$$\tilde{R}_t = \frac{s - s_1 \left(1 + \frac{\tau}{\pi} \sigma\right)}{s_1 \sigma} Y_0 (\exp(s_1 \sigma t) - 1)$$

Der über das zur ökologischen Stabilisierung nötige Maß hinausreichende Umweltkapitalstock wird damit im Zeitablauf beliebig groß. Es existiert also ein Zeitpunkt T , für den die modifizierte ökologische Gleichgewichtsbedingung $\pi \tilde{R}_T = \tilde{\alpha} - \alpha$ erfüllt ist. Insgesamt erhalten wir:

Ein ökologisches Gleichgewicht wird genau auf den Wachstumspfaden schließlich erreicht, deren Wachstumsraten unter derjenigen liegen, die sich bei der Annahme gleichgewichtiger Ausgangsbedingungen als ökologisch restringierte Wachstumsrate ergibt, d. h. falls

$$(4) \quad s_1 \sigma < \frac{s \sigma}{1 + \frac{\tau}{\pi} \sigma}$$

Damit ist der ökologisch zulässige Spielraum für s_1 bestimmt, der von den Modellparametern s , σ , τ und π abhängt, und zwar gilt: Je größer die Sparquote s , je größer die Kapitalproduktivität σ und je höher der erreichte Stand der Umwelttechnik π/τ , desto größer ist der Anteil s_1 am Sozialprodukt, der in einer zum ökologischen Ziel führenden Übergangsphase für Produktivinvestitionen eingesetzt werden kann.

Diese Überlegungen lassen sich im Prinzip auch auf den Fall sich akkumulierender Schadstoffe übertragen, zumindest falls die natürliche Absorptionskapazität α bei allen erreichten Verschmutzungsniveaus konstant ist. Die Bedingung für die Reduzierung der laufenden Nettoemissionen auf ein beliebiges ökologisches Zielniveau ist dann nicht ausreichend, da die Veränderung des Schadstoffbestandes außerdem von α abhängt. Prinzipiell kann eine Situation, in welcher der anfängliche Schadstoffbestand W_0 den angestrebten Schadstoffbestand W_e übersteigt ($W_0 > W_e$), verbunden sein mit

$$\tau Y_0 - \pi R_0 \underset{\geq}{\leq} \alpha$$

Im ersten Fall ist der Entsorgungskapitalstock größer, als er es sein müßte, um die Umweltqualität lediglich konstant zu halten. Es werden durch die natürliche Selbstreinigung mehr Schadstoffe vernichtet, als neu an die Umweltmedien abgegeben werden. Bei der Wachstumsrate $\frac{s\sigma}{1 + (\tau/\pi)\sigma}$ bleibt die Differenz zwischen $\tilde{\alpha} = \tau Y_0 - \pi R_0$ und α in der Zeit bestehen³. Der „Überschuß“ an Umweltkapital führt zu einem Abbau des Schadstoffbestandes und wird ihn, wenn genügend Zeit zur Verfügung steht, schließlich eliminieren. Wenn der Schadstoffbestand zu einer Zeit T auf W_e reduziert ist, ist der dann noch zur Stabilisierung des Umweltqualitätsniveaus erforderliche Kapitalstock zu groß. Für eine Zwischenphase kann der Wachstumsprozeß auf einen unrestringierten Pfad einschwenken⁴, bevor er endgültig auf den restringierten Stabilitätspfad übergeht.

In den anderen beiden Fällen muß die Umweltpolitik darauf aus sein, zunächst eine Situation herzustellen, in der weniger Schadstoffe emittiert als durch die natürliche Selbstreinigung vernichtet werden ($\tilde{\alpha} < \alpha$). Das läßt sich bei konstantem s und s_1 dadurch erreichen, daß sich die Wirtschaft wie beim zuvor beschriebenen Übergangsprozeß entwickelt, d. h. mit einer Rate wächst, die unter der endgültigen Gleichgewichtsrates liegt. Hat der Umweltkapitalstock schließlich bei einem T einen Vorsprung erhalten, kann wie im ersten Fall verfahren werden. Bemerkenswert dürfte sein, daß im Fall, in dem die tatsächlichen Emissionen höher als das laufende Selbstreinigungsvermögen sind, der Schadstoffbestand bis T noch weiter wächst und sich erst dann die Umweltqualität zu verbessern beginnt. Schließt man sprunghafte Strategien aus, ist daran bei anfänglichem ökologischen Ungleichgewicht im Sinne von $W_0 < W_e$ im Modell prinzipiell nichts zu ändern, selbst wenn man die Möglichkeit von negativem Wachstum einschließt.

4. Eine Variation des Grundmodells

Der Reinigungseffekt der Umweltausgaben soll jetzt wie bei *d'Arge* lediglich eine Funktion der laufenden Umweltschutzaufwendungen (r_t) sein. Das Modell besteht aus den beiden Gleichungen

³ Für die alternativen konstanten Werte von $\tilde{\alpha} \geq \alpha$ ermittelt sich die gleiche Gleichgewichtsrates. Sie beschreibt jedoch nun eine ökonomisch gleichgewichtige Entwicklung mit ständig zunehmender/abnehmender Umweltqualität.

⁴ Wenn von Anfang an eine höhere Rate entsprechend dem unrestringierten Wachstum angestrebt wird, nimmt $\tilde{\alpha}$ ständig zu und die Differenz zu α ab, so daß nicht sichergestellt ist, daß der angestrebte Schadstoffbestand auch erreicht werden kann.

$$\alpha = \tau (\sigma K_t) - \pi r_t$$

$$s \sigma K_t = \dot{K}_t + r_t$$

Der Wachstumspfad des Sozialproduktes wird dann beschrieben durch

$$(5) \quad Y_t = \sigma \left(K_0 + \frac{\alpha}{\sigma (\pi s - \tau)} \left(\exp \left(\left(s - \frac{\tau}{\pi} \right) \sigma t \right) \right) - \frac{\alpha}{\pi s - \tau} \right)$$

Im Gegensatz zum Grundmodell gilt die Verlaufsformel (5) unabhängig von der speziellen Lage der Anfangswerte. Zwar hängt auch jetzt der Gleichgewichtswert für r_0 bei gegebenen Parametern σ , τ und π von α und K_0 ab; jedoch kann r im Gegensatz zu R , dessen Größe Resultat vorangegangener Entscheidungen ist, zu jedem Zeitpunkt immer neu gewählt werden. Die Variabilität der Ausgangssituationen kompliziert die Verlaufsgleichung. Nur wenn die zulässigen Nettoemissionen Null sind ($\alpha = 0$), weil entweder bestimmte Schadstoffe natürlichen Selbstreinigungsprozessen nicht unterworfen sind oder hinsichtlich nicht akkumulierender Schadstoffe völlige Reinheit als Umweltziel gesetzt ist, ergibt sich eine ebenso einfache Modellstruktur wie zuvor. Unter dieser wenig realistischen Bedingung ist die Wachstumsrate konstant und gleich $(s - (\tau/\pi)) \sigma$, wobei τ/π die notwendige Ausgabenquote für den Umweltschutz bedeutet. Das Wachstum ist positiv, falls die Sparquote s den Koeffizienten τ/π übersteigt. Andernfalls muß die Wirtschaft immer weiterschrumpfen. Im Gegensatz zum ursprünglichen Modell kann jetzt ein zu hoher anfänglicher Konsum spätere Konsummöglichkeiten nicht nur behindern, sondern sogar untergraben. Der Sparquote kommt — zumindest bei gegebener Umwelttechnik — erhöhte strategische Bedeutung zu.

Im realistischeren Fall $\alpha > 0$ gelten analoge Aussagen. Dort ist die Wachstumsrate allerdings nicht konstant. Sie nähert sich bei $s > \tau/\pi$, d. h. bei positivem Wachstum dem Wert $(s - (\tau/\pi)) \sigma$ und bei $s < \tau/\pi$ dem Wert Null asymptotisch an. Bei $s > \tau/\pi$ sind die Veränderungen gegenüber der Situation $\alpha = 0$ eher quantitativer als qualitativer Art. Der Wachstumsprozeß kommt gewissermaßen nur schneller in Gang. — Streng genommen gelten die Aussagen für positives unbegrenztes Wachstum bei $\alpha > 0$ nur für den — allerdings realistischen — Fall $\tau Y_0 \geq \alpha$. Ansonsten ergäben sich in der Anfangszeit des Wachstums negative Werte für r_t . Der zunächst nicht ausgenutzte Spielraum für die Verschmutzung würde dann einen zusätzlichen Wachstumsbeitrag liefern. Unter diesen Umständen ist der Wachstumsprozeß in zwei Phasen zu zerlegen: Während der ersten kann die Wirtschaft mit der normalen unrestringierten Rate wachsen, bis das erlaubte Verschmutzungsniveau α erreicht ist; in der zweiten Phase kommt die Restriktionsbedingung

ins Spiel und mindert die Wachstumsrate. Falls $s < \tau/\pi$, d. h. falls unbegrenztes exponentielles Wachstum nicht möglich ist, können recht unterschiedliche Verlaufsformen für das Gleichgewichtswachstum resultieren⁵. Sie lassen sich tabellarisch klassifizieren:

	$\sigma(\tau - \pi s) K_0 < \alpha$	$\sigma(\tau - \pi s) K_0 > \alpha$
$\tau \sigma K_0 > \alpha$	1	2
$\tau \sigma K_0 < \alpha$	3	(4)

Die Konstellation 4 in diesem Schema scheidet von vornherein aus. Am realistischsten sind die beiden Fälle 1 und 2. Gleichung (5) beschreibt hier den Wachstumspfad vollständig. Der zweite Fall entspricht am ehesten den intuitiven Erwartungen. Das Sozialprodukt fällt im gesamten Zeitverlauf. Ein Teil des produktiven Kapitalstocks wird dabei von Umweltschutzaufwendungen aufgezehrt. Im ersten Fall ergibt sich stattdessen eine durchgehend positive Rate, da anfangs die Selbstreinigungskapazität noch nicht voll ausgenutzt wird. Beidesmal nähert sich das Sozialprodukt asymptotisch dem Wert $\frac{\alpha}{\tau - \pi s}$. Im dritten Fall wird wiederum eine Zerlegung des Wachstumsprozesses erforderlich.

In der Tabelle nicht berücksichtigt wurde der Fall $(\tau - \pi s) Y_0 = \alpha$. Hier verharrt die Volkswirtschaft die ganze Zeit hindurch in dem stationären Zustand $Y^* = \frac{\alpha}{\tau - \pi s}$. Die Lage solcher stationärer Zustände läßt sich auch direkt ermitteln: In diesem Zustand wachsen definitionsgemäß weder Kapitalstock noch Produktion. Bei konstanter positiver Sparquote s findet dann die gesamte Ersparnis für Umweltschutzzwecke Verwendung. Für die Modellgrößen im stationären Zustand, die durch einen Stern gekennzeichnet seien, muß gelten $\tau^* = s \sigma K^*$ und zusätzlich die ökologische Bedingung $\alpha = \tau \sigma K^* - \pi \tau^*$, insgesamt also $K^* = \frac{\alpha}{\sigma(\tau - \pi s)} > 0$. Der stationäre Kapitalbestand K^* bei ansonsten invarianten Modelldaten hängt ab von der Sparquote s . Die Frage liegt nahe, für welche Sparquote \tilde{s} der Konsum unter allen stationären Zuständen maximiert wird. Dabei ist nur der Fall $\pi < \tau$ von Interesse. Sonst kann nämlich s zwischen Null und Eins so groß gewählt werden, daß $s\pi$ noch τ übertrifft, also unbegrenztes exponentielles Wachstum möglich ist. Für $\pi < \tau$ fällt die von s abhängige stationäre Konsum-

⁵ Zu diesen alternativen Verlaufsformen macht d'Arge (1971, S. 33) nur eine recht knappe und wenig aufschlußreiche Bemerkung in einer Fußnote.

funktion $C^*(s) = \frac{1-s}{\tau - \pi s} \alpha$ im ganzen Bereich zwischen Null und Eins jedoch monoton. Eine Art „Goldener Regel“ für diesen stationären Fall empfiehlt, die Wirtschaft auf einen Stand zu bringen und dort zu halten ($Y^* = \alpha/\tau$), in dem ohne jegliche Umweltschutzaufwendungen das tolerierte Umweltqualitätsniveau gerade eingehalten wird.

5. Der neoklassische Ansatz

In der neoklassischen Fassung des Grundmodells beeinflusst der Umweltschutz die Gleichgewichtswachstumsrate nicht. Sie ist gleich hoch wie im unrestringierten Fall und stimmt unter einfachsten Annahmen mit der Wachstumsrate der Bevölkerung überein. Die Umweltpolitik reduziert lediglich die produktive Investitionsquote. Diese Änderung hat — soweit eine genügend lange Zeit seit der Änderung der Investitionsquote vergangen ist — keinen Einfluß auf die Gleichgewichtsrates, da sich die Kapitalproduktivität entsprechend erhöht. Es vermindert sich nur das Niveau des Wachstumspfad.

Die Produktionsfunktion hängt jetzt zusätzlich vom eingesetzten Arbeitspotential ab und genügt den üblichen neoklassischen Annahmen. Die Grundgleichungen (1) und (2) erhalten die Form:

$$(6) \quad sY(K_t, L_t) = \dot{K}_t + \dot{R}_t$$

$$(7) \quad \tau Y(K_t, L_t) = \alpha + \pi R_t$$

Die Anfangswerte K_0 , L_0 und R_0 sollen so beschaffen sein, daß im Ausgangszustand ein ökologisches Gleichgewicht besteht. Ein Wachstum soll gleichgewichtig genannt werden, wenn sich in seinem Verlauf der produktive Kapitalstock (und somit auch das Sozialprodukt) mit der Wachstumsrate $\lambda > 0$ entwickelt, die für die Erwerbsbevölkerung exogen vorgegeben ist. Bei gleichgewichtigem Wachstum ist also die Kapitalintensität zeitlich invariant. Die Höhe der Kapitalintensität wird zum entscheidenden Charakteristikum für die verschiedenen Gleichgewichtspfade. Im konventionellen Fall hängt das Niveau der gleichgewichtigen Kapitalintensität ($k = K/L$) allein von der Sparquote ab. Falls $y(k) := \frac{Y(K, L)}{L}$ für die Pro-Kopf-Produktionsfunktion steht, entspricht jeder Sparquote s eine gleichgewichtige Kapitalintensität $k(s)$, die positiv mit s korreliert ist⁶. Bei gegebener Wachstums-

⁶ Notwendig und hinreichend dafür, daß für jede Sparquote eine gleichgewichtige Kapitalintensität existiert, ist die Gültigkeit der Inada-Bedingungen für Y , d. h.

$$\lim_{k \rightarrow 0} y'(k) = \infty \quad \text{und} \quad \lim_{k \rightarrow \infty} y'(k) = 0.$$

rate $\lambda > 0$ wird $k(s)$ definiert durch $sy(k(s)) = \lambda k(s)$, denn im Gleichgewicht muß die Pro-Kopf-Ersparnis $sy(k(s))$ gerade der zur Stabilisierung der Kapitalintensität nötigen Pro-Kopf-Investition — den „Kosten“ des Bevölkerungswachstums (v. Weizsäcker (1962, S. 39 ff.)) — entsprechen. Der Pro-Kopf-Konsum ist auf dem Gleichgewichtspfad maximal, der zu dem (eindeutig bestimmten) $\tilde{k}(s)$ mit $y'(\tilde{k}(s)) = \lambda$ gehört. Diese Optimalitätsaussage ist der wichtigste Teil der Goldenen Regel der Akkumulation. Schließlich bedeutet Stabilität des Gleichgewichts, daß sich bei fixierter Sparquote s die Kapitalintensität im Wachstumsverlauf unabhängig von den Anfangswerten dem Gleichgewichtswert $k(s)$ beliebig gut nähert.

Alle diese Feststellungen aus der konventionellen Theorie finden ihre mehr oder weniger engen Analogien in der Theorie des ökologisch begrenzten Wachstums. Nach Gleichung (7) betragen die Pro-Kopf-Umweltinvestitionen:

$$\frac{\dot{R}_t}{L_t} = \frac{\tau}{\pi} \frac{[L_t y(k_t)]}{L_t} = \frac{\tau}{\pi} [\lambda y(k_t) + y'(k_t) \dot{k}_t]$$

Im Gleichgewichtswachstum mit $\dot{k}_t = 0$ hat man daher

$$\frac{\dot{R}_t}{L_t} = \frac{\tau}{\pi} \lambda y(k_t)$$

Zur Stabilisierung der Kapitalintensität steht also nur ein Betrag von $(s - \frac{\tau}{\pi} \lambda) y(k)$ zur Verfügung. Bei gegebenem $\lambda > 0$ lautet die Bedingung für die gleichgewichtige Kapitalintensität $k^*(s, \frac{\tau}{\pi})$

$$\left(s - \frac{\tau}{\pi} \lambda\right) y\left(k^*\left(s, \frac{\tau}{\pi}\right)\right) = \lambda k^*\left(s, \frac{\tau}{\pi}\right)$$

Für $s - \frac{\tau}{\pi} \lambda > 0$ gilt offensichtlich

$$k^*\left(s, \frac{\tau}{\pi}\right) = k\left(s - \frac{\tau}{\pi} \lambda\right)$$

Die gleichgewichtige Kapitalintensität im restringierten Fall ist bei gegebenem $\lambda > 0$ so hoch, wie sie im unrestringierten Fall mit einer Sparquote $s - (\tau/\pi) \lambda$ wäre. Wenn $s - (\tau/\pi) \lambda$ negativ ist, existiert bei positivem λ kein Gleichgewichtswert. Die Ersparnis pro Kopf würde nicht einmal ausreichen, die zur ökologischen Stabilisierung nötigen Umweltschutzausgaben zu finanzieren. Bei $s = (\tau/\pi) \lambda$ sind die Anforderungen an die Umweltschutzinvestitionen zwar erfüllt, die Nettoinvestitionen in den produktiven Kapitalstock wären jedoch Null, so daß

die Kapitalintensität ständig abnehmen würde. Die Existenzbedingung für ein ökologisch-ökonomisches Wachstumsgleichgewicht lautet also

$$s - \frac{\tau}{\pi} \lambda > 0$$

Je größer s und π und je kleiner λ und τ , desto eher existiert ein ökologisch-ökonomisches steady-state-Gleichgewicht bzw. um so höher ist die gleichgewichtige Kapitalintensität und das Pro-Kopf-Sozialprodukt und um so geringer sind die Pro-Kopf-Einkommensverluste gegenüber dem unrestringierten Fall. Hohe Werte für π und niedrige für τ und λ implizieren geringere notwendige Umweltschutzinvestitionen pro Kopf; ein niedriges λ erfordert außerdem relativ niedrige produktive Investitionen zur Stabilisierung der Kapitalintensität, während eine hohe Sparquote relativ hohe produktive Investitionen zuläßt.

Die Optimalitätsüberlegung wird für den restringierten Fall so geführt: Zu maximieren ist im Gleichgewicht der von der Kapitalintensität abhängige Pro-Kopf-Konsum:

$$c(k) = y(k) - \lambda k - \frac{\tau}{\pi} \lambda y(k)$$

Aus der Bedingung $c'(k) = 0$ folgt für die Grenzproduktivität des optimalen Kapitaleinsatzes \tilde{k} pro Kopf:

$$y'(\tilde{k}) = \frac{\lambda}{1 - \frac{\tau}{\pi} \lambda}$$

Im unrestringierten Fall müßte dieser Grenzwert im Optimum den kleineren Wert λ annehmen. Weil y konkav verläuft, ergibt sich hieraus, daß durch Einbeziehung ökologischer Restriktionen die optimale Kapitalintensität sinkt.

Allein zur Begründung der Stabilitätsaussage werden komplizierte Berechnungen erforderlich: Schreibt man (6) in der Form

$$(6a) \quad sL_t y(k_t) = (\overbrace{L_t k_t}^{\dot{k}_t}) + \dot{R}_t$$

und setzt $\dot{R}_t = \frac{\tau}{\pi} (\lambda y(k_t) + y'(k_t) L_t)$ ein, so erhält man für die Veränderung der Kapitalintensität nach Einführung des Umweltschutzes bei konstanter Umweltverschmutzung:

$$(8) \quad \dot{k}_t = \frac{\left(s - \frac{\tau}{\pi} \lambda\right) y(k_t) - \lambda k_t}{1 + \frac{\tau}{\pi} y'(k_t)}$$

Die Differentialgleichung⁷ (vgl. auch *Bender* (1976, S. 228)) präzisiert zum einen die zuvor schon formulierte Gleichgewichtsbedingung. Zum anderen läßt sich daran unmittelbar ablesen, wie wenig sich an der Stabilitätsaussage im Vergleich zum unrestringierten Fall ändert. Es hängt offenbar nur vom Zähler in (8) ab, ob k_t wächst oder fällt. Dieser Zähler entspricht gerade dem Ausdruck, der für die Frage nach Stabilität auch im nicht restringierten Fall, allerdings mit einer um $(\tau/\pi)\lambda$ verminderten Sparquote, interessiert.

Die Stabilitätsaussagen des unrestringierten Falles lassen sich völlig übertragen. Der Nenner, der immer positiv ist, beeinflußt nicht das Ziel des Wachstums, sondern lediglich dessen Geschwindigkeit. Der Betrag von k_t ist der Indikator dafür, wie schnell sich die Kapitalintensität dem Gleichgewichtswert annähert. Da der Nenner immer Eins überschreitet, nimmt diese Geschwindigkeit gegenüber dem unrestringierten Fall mit der reduzierten Sparquote $\tilde{s} = s - (\tau/\pi)\lambda$ ab. Im Falle $s - (\tau/\pi)\lambda < 0$ ist k_t immer kleiner als Null. k_t selbst nähert sich der Null beliebig gut an, denn ansonsten müßte eine positive gleichgewichtige Kapitalintensität existieren, was bei $s - (\tau/\pi)\lambda < 0$ unmöglich ist.

Erst diese Stabilitätsaussage ist das im Vergleich zum postkeynesianischen Modell eigentlich Neue. Die Aussagen zur Existenz eines Wachstumsgleichgewichts lassen sich nämlich bereits mit dem einfacheren Instrumentarium des Ein-Faktoren-Modells ableiten. Der Übergang zur neoklassischen Wachstumstheorie ist für dieses Thema nicht unbedingt erforderlich. Im neoklassischen Gleichgewicht muß $\hat{Y} = \hat{K} = \lambda$ gelten. Das postkeynesianische Gleichgewicht $\hat{Y} = \hat{K}$ ist zugleich ein steady-state-Gleichgewicht, falls

$$\frac{s\sigma}{1 + \frac{\tau}{\pi}\sigma} = \lambda$$

Hierin ist σ als Funktion der Kapitalintensität anzusehen. Die Bedingung ist nach Umrechnung identisch mit der früher formulierten Bedingung für ein neoklassisches Gleichgewicht. Diese Gleichung liefert bei gegebener Wachstumsrate und gegebenen ökologischen Parametern eine Gleichgewichtsbeziehung zwischen s und $\sigma(k)$, also auch zwischen s und k . Die Lösung nach s ergibt die Sparquote, die zur gleichzeitigen

⁷ Die entsprechende Gleichung bei *Strøm* ist wesentlich komplizierter. Das liegt daran, daß *Strøm* zwischen produktions- und konsumbedingter Umweltverschmutzung unterscheidet und zudem die Möglichkeit eines Verschleißes für Umwelt- und Produktivkapitalstock mit einbezieht. Die erste Zusatzannahme bedeutet, wie man sich leicht überlegt, keine Verallgemeinerung. Die zweite Zusatzannahme erscheint im Hinblick auf die behandelte Thematik eher irrelevant.

Kompensation der kapitalabsorbierenden Effekte von Umweltschäden und Bevölkerungswachstum erforderlich ist. Die notwendige Sparquote $s = \frac{\lambda}{\sigma} (1 + \frac{\tau}{\pi} \sigma)$ ist immer positiv und eindeutig bestimmt. Nach $\sigma(k)$ aufgelöst, erhält man die Kapitalproduktivität, die eine gegebene Sparquote gegen Bevölkerungswachstum und Umweltschutzinvestitionen behaupten kann. (Bei dieser Betrachtung dürfen natürlich die Anfangswerte für K_0 und L_0 nicht als fixiert angenommen werden.) Man erhält für $\sigma(k)$:

$$\sigma(k) = \frac{\lambda}{s - \frac{\tau}{\pi} \lambda}$$

Wenn dieser Ausdruck negativ ist, kann bei gegebenen Parametern λ , π , τ und s auf Dauer keine konstante positive Kapitalproduktivität und somit auch keine konstante Kapitalintensität aufrecht erhalten werden. Notwendig und hinreichend dafür, daß dies nicht eintritt, ist $s - (\tau/\pi) \lambda > 0$. Damit erhält man dieselbe Gleichgewichtsbedingung wie zuvor⁸.

6. Kritische Anmerkungen

Der Erkenntniswert von Wachstumsmodellen ist umstritten. Vielen ihrer Kritiker erscheinen sie als zwar logisch wahre, empirisch jedoch gehaltlose mathematische Spielereien, die zur Erklärung tatsächlicher Wachstumsprozesse wenig beitragen. Die Forderung, wachstumstheoretische Modelle müßten die Realität im strengen Sinne erklären, ist überhöht. Angesichts der Unzulänglichkeiten der empirischen Forschung muß sich das Erkenntnisziel der Modellbildung hauptsächlich darauf beschränken, Beziehungen zwischen Aggregaten zu formalisieren und die logische Struktur des entstehenden Systems aufzudecken. Formale Modelle sind so nichts weiter als Fortsetzungen traditioneller Plausibilitätserwägungen. Logische Präzision tritt bei einem solchen „modellplatonistischen“ Verfahren als eine Art second-best-Lösung an die Stelle empirischer Wahrheit. Die wachstumstheoretischen Modelle liefern zwar kaum falsifizierbare Hypothesen und erfüllen aus der Perspektive des kritischen Rationalismus lediglich eine heuristische Funktion; deren Wert darf aber keinesfalls zu gering veranschlagt werden. Die eher „didaktischen“ Anforderungen an ein Modell gewinnen dann an Bedeutung: Die Struktur eines Modells sollte im Verhältnis zu sei-

⁸ Der Zusammenhang zwischen k und σ wird geliefert durch $\sigma(k) = y(k)/k$. Die Inada-Bedingungen, die bei der Ableitung der Gleichgewichtsbedingung auf die neue Weise zunächst keine Rolle zu spielen scheinen, werden nun dazu benötigt, um die Umkehrbarkeit der Funktion $\sigma(k)$ zu garantieren.

nen Aussagen so einfach und übersichtlich wie möglich, die Annahmen sollten unmittelbar plausibel und die Resultate ohne weiteres interpretationsfähig sein. Zudem dürfte es nicht ausschließlich triviale Aussagen liefern; d. h. der Formalismus ist so einzusetzen, daß mit seiner Hilfe die verbalen Plausibilitätserwägungen gesetzten Grenzen tatsächlich überschritten werden. Das postkeynesianische Grundmodell genügt diesen Kriterien recht gut. Wichtige ökologisch-ökonomische Zusammenhänge werden mit einfachen mathematischen Mitteln präzisiert und offengelegt. Hingegen führt die Komplizierung im neoklassischen Modell unserer Ansicht nach zu einem Verlust an Anschaulichkeit bei zweifelhaftem Erkenntnisgewinn.

Das Ergebnis des neoklassischen Modells hebt sich von dem des postkeynesianischen sichtlich dadurch ab, daß die Einführung des Umweltschutzes die gleichgewichtige Wachstumsrate nicht beeinflusst. Danach besteht auf lange Sicht kein Zielkonflikt zwischen Umweltschutz und Wachstumsrate, sondern zwischen Umweltschutz und dem Niveau des Wachstumspfades. Der umweltpolitisch bedingte Rückgang der produktiven Investitionsquote wird dann kompensiert durch eine allmähliche Erhöhung der Kapitalproduktivität, so daß die Wachstumsrate des produktiven Kapitalstocks langfristig konstant bleibt. Das neoklassische Modell betont als neuen Einflußfaktor die wachstumserhaltende Wirkung von Substitutionsprozessen durch den Marktmechanismus. Wegen des Zeitbedarfs vermag das Modell nur langfristige Aussagen zu machen, die jedoch fragwürdig sind: Die Parameter ändern sich im Zeitablauf und die Wahrscheinlichkeit von Änderungen erhöht sich mit der Anzahl der Parameter.

Eine andere Kritik richtet sich gegen die Art und Weise, wie die Ausgleichskräfte in der Übergangsphase beschrieben werden. Beim begrenzten Wachstum verliert die Idee der automatischen Stabilisierung des Wachstums (Solow 1956) an Schlagkräftigkeit: Auf dem neoklassischen Wachstumspfad muß für jeden Zeitpunkt der Umweltkapitalstock proportional zum Sozialprodukt sein. Damit werden Umweltschutzinvestitionen erforderlich, die in einem über die Zeit hinweg konstanten Verhältnis zum Sozialproduktzuwachs stehen. Für die „richtige“ Aufstockung des Umweltkapitals gibt es jedoch keinen mit dem auf der Produktionsseite vergleichbaren Marktautomatismus. Nötig werden Maßnahmen, die von außen in das Marktgeschehen eingreifen. Das Modell ist deshalb ohne Annahmen über umweltpolitische Verhaltensweisen kaum hinreichend formuliert. Eine Umweltpolitik, die sowohl die notwendigen Umweltschutzinvestitionen sichert als auch die Ausgleichswirkungen des Marktmechanismus nicht speziell beeinträchtigt, läßt sich im Modell als zweckgebundene proportionale Einkommenszuwachssteuer denken. Die Informationsanforderungen dieser Po-

litik wären zumindest nicht sonderlich hoch⁹, so daß die auf diese Weise vorgenommene Einbeziehung des Staates durchaus angebracht sein kann.

Eingeschränkt wird die Aussagefähigkeit aber vor allem durch Unstimmigkeiten zwischen den neoklassischen Grundannahmen und der Art der Berücksichtigung der ökologischen Parameter τ und π . Wie im postkeynesianischen Modell impliziert die Annahme eines konstanten τ gleichzeitig eine lineare Abhängigkeit des Schadstoffanfalls vom produktiven Kapitalstock. Diese plausible Annahme könnte auch direkt gesetzt werden; die Aussagen blieben erhalten. Im neoklassischen Konzept müßte konsequenterweise ein Bezug zu beiden Produktionsfaktoren hergestellt werden. Die Schadstoffmenge ist bei gegebenem Y offenbar auch eine Funktion der Art der Faktorkombination. Kapitalintensive Prozesse verursachen bei gleichem Sozialprodukt mehr Schadstoffe als arbeitsintensive, so daß τ je nach der angewandten Technik variiert. Diese Beziehung sollte in einem langfristig orientierten Mehrfaktorenmodell enthalten sein. Der Strukturfaktor hat keinen Einfluß auf die Wachstumsrate mehr, sobald sich die Wirtschaft auf dem ökologisch-ökonomischen Gleichgewichtspfad mit konstanter Kapitalintensität befindet. Da sich in der Übergangsphase zum steady-state die Kapitalintensität der Produktion laufend ändert, variiert auch der Schadstoffkoeffizient. Die früheren Stabilitätsaussagen verlieren damit ihre Gültigkeit.

Die Produktionsfunktion für die Entsorgung hat eine aus neoklassischer Sicht ungewöhnliche Form. Zum einen werden im Gegensatz zum Produktionssektor keine ertragsgesetzlichen Bedingungen zugelassen. Zum anderen wird vorausgesetzt, daß der Umweltkapitalstock ohne Arbeit funktioniert, das gesamte Arbeitspotential also im produktiven Sektor eingesetzt wird. Durch die Berücksichtigung der Bindung von Arbeitskräften im Umweltsektor würde sich der neoklassische Ansatz erheblich verändern und komplizieren, und es wird fraglich, ob überhaupt ein steady-state sinnvoll ableitbar ist. Für eine Vernachlässigung des Arbeitsfaktors spricht zwar, daß Umweltschutzmaßnahmen in der Wirklichkeit recht kapitalintensiv sind. Dagegen ist aber kritisch zu vermerken, daß dadurch Substitutionsmöglichkeiten jeder Art für den Umweltsektor von vorneherein ausgeschlossen werden, obwohl die Annahme von Substitutionalitäten im Kern des neoklassischen Denkens steht (v. Weizsäcker 1976). Das Modell von Strøm und Bender paßt das

⁹ Ein wesentliches Charakteristikum der neoklassischen Theorie ist, daß sie bei ihrer Erklärung des Wirtschaftsprozesses nur dezentralisierte Information und nicht etwa eine an einer Stelle konzentrierte Einsicht in das Geschehen voraussetzt. Darauf weist Arrow (1974) hin. Die Berücksichtigung des Staates im neoklassischen Wachstumsmodell wirft daher grundsätzliche Fragen auf.

neoklassische Instrumentarium nur unvollkommen der neuen Situation an. Die konventionelle Theorie wird lediglich durch einen Zusatz ergänzt, der in seiner Struktur dem postkeynesianischen Einfaktoren-Modell entspricht.

Denkbar ist schließlich, daß auch unter neoklassischen Annahmen die Gleichgewichtsrates nach Einführung des Umweltschutzes abnimmt, wie ein Modell von *Stephens* (1976) zeigt. Im Gegensatz zum Grundmodell werden dort Umweltschädigungen nicht als zweiter Output, sondern als Input der Produktion mit positivem Grenzprodukt aufgefaßt. Dieses Modell entspricht dem Wachstumsmodell von *Meade* (1961), das den Boden als dritten Produktionsfaktor enthält. Aus der linear homogenen Produktionsfunktion mit den drei Faktoren Arbeitsbevölkerung (L), Kapitalstock (K) und laufenden Schadstoffemissionen (W) ergibt sich bei Vernachlässigung des technischen Fortschritts als relative Wachstumsrate des Sozialproduktes

$$\hat{Y} = \varepsilon_L \hat{L} + \varepsilon_K \hat{K} + \varepsilon_W \hat{W}.$$

ε_L , ε_K und ε_W stellen die Produktionselastizitäten für die drei Produktionsfaktoren dar. Je mehr Schadstoffemissionen zugelassen werden, um so weniger Ressourcen K und L sind für die Reinhaltung der Umwelt erforderlich und so für produktive Zwecke verwendbar. Bei konstanter Wachstumsrate λ für die Arbeitsbevölkerung, $\hat{K} = sY$, $\hat{K} = \hat{Y}$ und $\hat{W} = 0$ beträgt die Wachstumsrate für das Sozialprodukt

$$\hat{Y} = \frac{\varepsilon_L}{1 - \varepsilon_K} \lambda$$

Wegen $1 - \varepsilon_K = \varepsilon_L + \varepsilon_W$ wächst die Produktion mit einer geringeren Rate als die Bevölkerung; das Pro-Kopf-Sozialprodukt sinkt. Die Variablen haben eine andere Bedeutung als bisher. In die Produktionsfunktion gehen für L und K sowohl die produktiv als auch die ökologisch genutzten Kapital- und Arbeitsmengen ein. Die Produktionselastizität von L und K sind bei konstantem W definiert. Sie geben die jeweils zusätzlich mögliche Produktion ohne zusätzliche Schadstoffemissionen an. Am Grundmodell ist aus dieser Sicht zu bemängeln, daß es qualitative Einflüsse des Umweltschutzes, die sich auf die Produktionskoeffizienten auswirken, nicht berücksichtigt. Die unterschiedlichen Ergebnisse beider neoklassischen Modelle beruhen darauf, daß im ökologischen Gleichgewicht die Summe der Elastizitäten einmal gleich 1, das andere Mal geringer als 1 ist. Beim Inputansatz wird mit dem Übergang zum ökologischen Gleichgewicht ($\hat{W} = 0$) davon ausgegangen, daß die dann nur noch von K und L abhängige Produktionsfunktion „decreasing returns to scale“ aufweist. Im Grundmodell wird — auch

im postkeynesianischen Fall — unterstellt, daß die Produktionselastizitäten sich nach Einführung des Umweltschutzes nicht verändern und sich zu Eins addieren. Im Outputansatz wirkt der Umweltschutz durch Reduzierung der produktiv eingesetzten Faktormenge *cet. par.* auf das Wirtschaftswachstum ein; im Inputansatz von *Stephens* läßt sich der gleiche Wirkungszusammenhang nur in einer Verminderung der Produktionselastizitäten ausdrücken. Bei diesem Vorgehen kann der mengenmäßige Entzugseffekt nicht von möglichen Effizienzbeeinträchtigungen der Produktionstechnik getrennt werden (Anwendung relativ emissionsarmer, aber relativ teurer Produktionsverfahren).

Der Inputansatz führt so zu einem Informationsverlust. Nicht spezifiziert werden die Beziehungen zwischen zusätzlicher Verschmutzung, freigesetzten Umweltressourcen und höherem Sozialprodukt. Die früheren Modelle differenzierten hier zwischen den Einflüssen des Schadstoffkoeffizienten und der Effizienz des Entsorgungskapitals. Ebenso wird die ökologische Gleichgewichtsbedingung nicht näher bestimmt.

Stephens verwendet diesen Ansatz, um die Rolle des umwelttechnischen Fortschritts zu veranschaulichen. Im Grundmodell müßte der umwelttechnische Fortschritt in einer Verminderung des Schadstoffkoeffizienten und einer Erhöhung der Reinigungseffizienz des Entsorgungskapitals zum Ausdruck gebracht werden, was die Ergebnisse stark komplizieren würde. Die Produktionsfunktion mit technischem Fortschritt hat die Gestalt

$$Y(t) = Y[b(t)K, a(t)L, v(t)W]$$

mit a , b und v als den in der Zeit variierenden Indikatoren für den Stand der kapital- und arbeitsvermehrenden bzw. emissionsvermindernden Technik. Für das Pro-Kopf-Sozialprodukt ergibt sich hieraus bei $\hat{W} = 0$ und $\hat{Y} = \hat{K}$

$$\hat{Y} - \lambda = \frac{\varepsilon_K \hat{b} + \varepsilon_L \hat{a} + \varepsilon_W \hat{v} - \varepsilon_W \hat{\lambda}}{1 - \varepsilon_K}$$

Um das Pro-Kopf-Sozialprodukt konstant zu halten, ist also ein minimaler technischer Fortschritt erforderlich. Der emissionsvermindernde technische Fortschritt hat in diesem Modell prinzipiell die gleiche Wirkung wie der kapital- und arbeitsvermehrende technische Fortschritt. Nur spezielle Arten des technischen Fortschritts werden erfaßt; zum einen emissionsvermindernde technische Fortschritte, die zugleich die Produktivität von Arbeit und Kapital unverändert lassen, und zum anderen produktivitätserhöhende und zugleich emissionsneutrale technische Fortschritte. Umweltfreundliche technische Fortschritte, welche die Faktorproduktivität beeinflussen, als auch produktivitätssteigernde

technische Fortschritte, die mit einer Veränderung der ökologischen Eigenschaften der Produktionstechnik verbunden sind, werden nicht berücksichtigt. Wachstumsmodelle, die von der realistischen Annahme gekoppelter technischer Fortschritte ausgehen, gibt es bisher nicht.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Einbeziehung ökologischer Parameter in Modelle gleichgewichtigen Wirtschaftswachstums untersucht. Ausgegangen wird dabei von einem einheitlichen Grundmodell, das den postkeynesianischen und neoklassischen Fall besser vergleichbar macht und trotz unterschiedlicher ökologischer Annahmen bestehende wachstumstheoretische Gemeinsamkeiten zu verdeutlichen hilft. Völlig vernachlässigt wird in der Literatur die Analyse von Übergangsprozessen zu einem ökologisch-ökonomischen Gleichgewicht, so daß dieser Frage im Rahmen des postkeynesianischen Modells besondere Aufmerksamkeit gewidmet wird. Die Komplizierungen in der neoklassischen Version des Grundmodells führen unserer Ansicht nach zu einem Verlust an Anschaulichkeit bei zweifelhaftem Erkenntnisgewinn. Ein alternativer neoklassischer Ansatz, der im Ausblick skizziert wird, bringt zwar partielle Verbesserungen, die jedoch durch Informationsverluste aufgewogen werden.

Summary

This paper considers the integration of ecological parameters into models of balanced economic growth. We depart from a common basic model, which makes the postkeynesian and neoclassical case more comparable and which helps to clarify the common theoretical features existing despite different ecological assumptions. The literature completely neglects the analysis of transition processes leading to an ecological-economic equilibrium. So in the framework of a postkeynesian model particular attention is paid to this question. In our view the complications of the neoclassical version of the basic model lead to a loss of plausibility and only yield a small gain in insight. An alternative neoclassical approach which is finally outlined contributes to partial improvements compensated by losses of information.

Literatur

- d'Arge, R. C.* (1971), Essay on Economic Growth and Environmental Quality. Swedish Journal of Economics 73, S. 25 - 41.
- Arrow, K. J.* (1974), Limited Knowledge and Economic Analysis. American Economic Review 64, S. 1 - 10.
- Bender, D.* (1976), Makroökonomik des Umweltschutzes, Göttingen.
- Cansier, D.* (1975), Ökonomische Grundprobleme der Umweltpolitik, Berlin.
- Forster, B. A.* (1972), A Note on Economic Growth and Environmental Quality. Swedish Journal of Economics 74, S. 281 - 285.
- Gruver, G. W.* (1976), Optimal Investment in Pollution Control Capital in a Neoclassical Growth Context. Journal of Environmental Economics and Management 3, S. 165 - 177.

- Keeler, E., M. Spence and R. Zeckhauser (1971), The Optimal Control of Pollution. *Journal of Economic Theory* 4, S. 19 - 34.
- Mäler, K.-G. (1974), *Environmental Economics: A Theoretical Inquiry*, Baltimore.
- Meade, J. E. (1961), *A Neo-Classical Theory of Economic Growth*, London.
- Nijkamp, P. (1977), *Theory and Application of Environmental Economics*, Amsterdam.
- Smith, V. L. (1972), Dynamics of Waste Accumulations. Disposals versus Recycling. *Quarterly Journal of Economics* 86, S. 600 - 616.
- Solow, R. M. (1956), A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics* 70, S. 65 - 94.
- Stephens, J. K. (1976), A Relatively Optimistic Analysis of Growth and Pollution in a Neoclassical Framework. *Journal of Environmental Economics and Management* 3, S. 85 - 96.
- Ström, S. (1973), Economic Growth and Biological Equilibrium. *Swedish Journal of Economics* 75, S. 164 - 175.
- v. Weizsäcker, C. C. (1962), *Wachstum, Zins und optimale Investitionsquote*, Tübingen und Basel.
- (1976), Die Welt aus der Sicht des Ökonomen, in: H. Körner u. a. (Hrsg.), *Wirtschaftspolitik — Wissenschaft und politische Aufgabe*, Festschrift zum 65. Geburtstag von Karl Schiller, Bern und Stuttgart, S. 67 - 83.