

“Anything as important in industrial life as power deserves more attention than it has yet received by economists ... a theory of production that really explains how wealth is produced must analyze the contribution of the element energy” (Tryon 1927).

“Der entscheidende Fehler der traditionellen Ökonomie ... ist die Außerachtlassung der Energie als Produktionsfaktor” (Binswanger und Ledergerber 1974).

In der herkömmlichen ökonomischen Theorie wird der Produktionsfaktor Energie entweder ganz außer Acht gelassen oder ist von nur marginaler Bedeutung. Gleichzeitig bleibt der empirisch wichtigste Beitrag zum Wirtschaftswachstum, der technische Fortschritt, weitgehend unerklärt. Die Analyse zeigt, dass sich durch Berücksichtigung des Produktionsfaktors Energie der mit wachsender Automation verbundene technische Fortschritt erfassen und das Wirtschaftswachstum in den USA, Japan und Deutschland während dreier Dekaden mit kleinen Residuen reproduzieren lässt. Energieeffizienzverbesserungen der Kapitalstöcke nach der ersten Ölpreisexlosion lassen sich identifizieren. Es zeigt sich, dass der Beitrag der Energie zur Wertschöpfung, d.h. die Produktionselastizität der Energie, den geringen Faktorkostenanteil der Energie deutlich übersteigt, während für die menschliche Arbeit Umgekehrtes gilt. Nur für das Kapital sind Elastizitäten und Kostenanteile etwa im Gleichgewicht. Die steuerpolitische Bedeutung der Ergebnisse wird diskutiert.

Einleitung

Die jüngsten Engpässe der Stromversorgung in Kalifornien und die damit verbundenen Produktionsausfälle haben die kritische Wichtigkeit der Energie für die Ökonomie einmal mehr deutlich gemacht. Folgenreicher noch als diese regionale Elektrizitätswirtschaftliche Kri-

Energie, Innovation und Wirtschaftswachstum

Dietmar Lindenberger
Wolfgang Eichhorn
Reiner Kümmel

se war die Energiekrise der 70er Jahre: Im Gefolge der vom Jom Kippur-Krieg ausgelösten ersten Ölkrise hatte sich der Rohölpreis zwischen 1973 und 1975 verdreifacht. In einer Schockreaktion reduzierten viele Industrienationen den Energieeinsatz drastisch. Die zweite Ölkrise während des irakisch-iranischen Krieges 1979-1981 verdoppelte den Ölpreis dann nochmals. In Ländern wie den USA, Japan oder Deutschland verliefen der Rückgang von Energieeinsatz und Industrieproduktion nahezu parallel, und es kam zu einer globalen Rezession sowie längerfristigen Abschwächungen des Wirtschaftswachstums in vielen Ländern. Trotz dieser Erfahrungen wird in der herkömmlichen Wirtschaftstheorie der Produktionsfaktor Energie entweder ganz außer Acht gelassen oder ist von nur marginaler Bedeutung.

Die traditionelle Wirtschaftstheorie befasst sich primär mit Wertentscheidungen und dem Verhalten der ökonomischen Akteure sowie dem Funktionieren von Märkten. Diese wichtigen Fragen betreffen die sozialwissenschaftliche Sphäre. Nicht

minder wichtig für die Ökonomie ist jedoch, dass die über Märkte verteilten Güter zunächst in der “harten” Sphäre der materiellen Welt produziert werden müssen. Während die Verteilung und Verwendung von Einkommen ausschließlich durch menschliche Entscheidungen bestimmt werden, unterliegt ihre Entstehung auch naturwissenschaftlichen Randbedingungen.¹ Insbesondere dürfen Produktionsmodelle nicht den ersten beiden Hauptsätzen der Thermodynamik zuwiderlaufen. Diese besagen, dass nichts in der Welt geschieht ohne Energieumwandlung und Entropieproduktion. Die Konsequenzen sind:

- Jeder Produktionsprozess erfordert den Einsatz von Energie;
- Entropieproduktion entwertet die Energie (“Energieverbrauch”) und führt zu Wärme- und Stoffemissionen in die Umwelt;
- Die menschliche Routinearbeit wurde und wird im Zuge des Automationsfortschritts zunehmend durch energiegetriebene Maschinen ersetzt.

Offenkundig ist Energie ein fundamentaler Produktionsfaktor.²

Dr. Dietmar Lindenberger
Energiewirtschaftliches Institut an der
Universität Köln
Albertus-Magnus-Platz, 50923 Köln
Email: Lindenberger@wiso.uni-koeln.de
Prof. Dr. Dr. h.c. Wolfgang Eichhorn
Institut für Wirtschaftstheorie und Operations
Research, Universität Karlsruhe
Kollegium am Schloß, 76128 Karlsruhe
Prof. Dr. Reiner Kümmel
Institut für Theoretische Physik, Universität
Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg

¹ Die Implikationen für die ökonomische Theorie werden ausführlicher diskutiert in Hall et al. (2001): The Need to Reintegrate the Natural Sciences with Economics.

² Während der Entstehungszeit der begrifflichen Grundlagen der Nationalökonomie war Energie als technisch-naturwissenschaftliche Fundamentalgröße noch nicht erkannt. Adam Smith’s “Wealth of Nations” erschien 1776, bevor der Energiebegriff von Thomas Young (1773-1829) eingeführt wurde.

Sofern in der heute dominierenden Wirtschaftstheorie Energie als Produktionsfaktor berücksichtigt wird, wird ihr eine nur marginale Bedeutung beigemessen: Als die neoklassische Theorie Mitte des 19. Jahrhunderts ihre ersten Schritte machte, hatte man die Frage nach der physischen Entstehung der Wertschöpfung nicht vorrangig im Blick. Zum einen bestand ein starkes Interesse, die Verteilung des Volkseinkommens zu erklären, zum anderen stand die Frage nach der Effizienz von Märkten im Vordergrund. Dementsprechend begann man mit dem Modell einer reinen Tauschwirtschaft. Das wesentliche Verdienst des Modells liegt in dem Nachweis, dass sich (unter einer Reihe wohldefinierter Annahmen) vermöge eines Preissystems durch Tauschhandel auf Märkten ein Gleichgewicht einstellt, in dem es ist nicht möglich ist, irgendeinen der Akteure besser zu stellen, ohne dass mindestens ein anderer dadurch schlechter gestellt wird (Pareto-Optimum). Diese die koordinierende Funktion von Märkten erklärende Aussage wird gemeinhin als die normative Begründung für das System der Marktwirtschaft betrachtet. Als später jedoch in das Modell Gleichungen zur Beschreibung von Produktion eingefügt wurden, musste die Frage nach der physischen Entstehung der Wertschöpfung, bedingt durch die Modellstruktur, untrennbar mit der Frage nach ihrer Verteilung verkoppelt werden: Da das neoklassische Gleichgewicht durch ein (gewinnmaximierendes) Optimum im Inneren – und nicht auf dem Rand – des technologisch zugänglichen Bereichs im Faktorraum charakterisiert ist, müssen Grenzproduktivitäten und Preise der Produktionsfaktoren übereinstimmen. Im resultierenden Produktionsmodell müssen deshalb die Gewichte, mit denen die Faktoren zur physischen Entstehung der Wertschöpfung beitragen, d.h. die Produktionselastizitäten der Faktoren, gleich ihren Kostenanteilen sein. Diese Kostenanteile sind in den entwickelten Volkswirtschaften etwa wie folgt ver-

teilt: Arbeit rd. 0,7, Kapital rd. 0,25, Energie rd. 0,05.

Dann hätten in einem neoklassischen Gleichgewicht die Produktionselastizitäten der Faktoren, die – grob gesprochen – die prozentuale Änderung der Wertschöpfung bei einprozentiger Faktoränderung angeben, eben diese Werte zu haben: die der Arbeit etwa 0,7, die des Kapitals 0,25 und die der Energie 0,05. Damit könnte ein Rückgang des Energieeinsatzes um bis zu 7%, wie nach der ersten Ölkrise zwischen 1973 und 1975 in den Industrieländern beobachtet, nur einen Rückgang der Wertschöpfung in Höhe von 0,05 mal 7%, also 0,35% erklären.³ Die tatsächlich beobachteten konjunkturellen Einbrüche sind jedoch rund 10 mal größer.⁴

Auch das längerfristige Wirtschaftswachstum ist nicht durch die Entwicklung der Faktorinputs erklärbar, sofern diese mit ihren Kostenanteilen gewichtet werden. Es bleibt immer ein großer, unverstandener Rest, der als „technischer Fortschritt“ bezeichnet wird. Dem Fortschrittsresiduum müssen bis über 80% des Wachstums in den Industrieländern zugeschrieben werden.⁵ Damit wird der unerklärte Restbeitrag zum

³ Dementsprechend argumentiert der Ökonometiker E.F. Denison, dass der amerikanische Konjunktureinbruch 1973-1975 nicht mit der in dieselbe Zeit fallenden Ölpreisexplosion zusammenhängen könnte: „...the value of primary energy used by non-residential business can be put at \$ 42 billion in 1975, which was 4.6 percent of a \$ 916 billion non-residential business national income ... if the weight of energy is 5 percent, a 1-percent reduction in energy consumption with no change in labor and capital would reduce output by 0.05 percent“ (Denison (1979)), während etwa D.W. Jorgenson zum gegenteiligen Ergebnis kommt: „My overall conclusion is that there was a dramatic impact of energy prices on economic growth during the energy crisis“ (Jorgenson (1984)).

⁴ Bilder 1-4 zeigen diese Einbrüche, wie sie die volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen der USA, Japans und Deutschlands empirisch ausweisen und wie sie von den im folgenden Abschnitt berechneten Produktionsfunktionen theoretisch nachvollzogen werden.

⁵ Die erste solche residuale Fortschrittsmessung stammt von Solow (1957), der für die USA zwischen 1909-1949 den Beitrag des Restterms zu 87,5 % bestimmte. Eine Übersicht neuerer Analysen für verschiedene Industrienationen geben Boskin/Lau (1992).

Wachstum wichtiger als die erklärenden Faktoren, was nach Auffassung Gahlen die neoklassische Wachstumstheorie tautologisch macht.⁶ Der Begründer der neoklassischen Wachstumstheorie, R.M. Solow, räumt ein: „this ... has led to a criticism of the neoclassical model: it is a theory of growth that leaves the main factor in economic growth unexplained“.⁷

Tatsächlich beobachten wir, dass der wirtschaftstheoretisch ungeklärte technische Fortschritt seit jeher mit einer Ausweitung des Energieeinsatzes einhergegangen ist. Der mittlere Energiebedarf pro Kopf und Tag stieg von 2 kWh vor einer Million Jahren beim Sammler ohne Feuerbeherrschung auf 14 kWh einfacher Ackerbauer vor 7000 Jahren. Keramikbrennen, Metallverarbeitung, Haus- und Schiffsbau etc. steigerten den Energiebedarf weiter. 30 kWh pro Kopf und Tag wurden um 1400 n.Chr. in Westeuropa gebraucht.⁸ Im 18. und 19. Jahrhundert erschlossen die Wärmekraftmaschinen die gewaltigen Kohlevorkommen Westeuropas, entfachten die industrielle Revolution und stellen heute jedem Einwohner der industrialisierten Länder Energiedienstleistungen zur Verfügung, die rein rechnerisch der schweren körperlichen Arbeit von 10-30 Menschen („Energiesklaven“) entsprechen. Bei Miteinbeziehung der Energie zur Raum- und Prozesswärmeerzeugung würden sich diese Zahlen mehr als verdreifachen. Insgesamt lag 1995 der deutsche Primärenergiebedarf pro Kopf und Tag bei 133 kWh, was 44 „Energiesklaven“ entspräche. Technischer Fortschritt wurde und wird offenbar getragen von der Entwicklung

⁶ Gahlen (1972).

⁷ Solow (1994). Neuere Versuche, den Ursachen des Residuums „technischer Fortschritt“ auf den Grund zu gehen, werden seit der Mitte der 80er Jahre im Rahmen der sog. Neuen Wachstumstheorie (Romer (1986), Lucas (1988)) gemacht. Dazu jedoch der amerikanische Ökonom Howard Pack: „But have the recent theoretical insights succeeded in providing a better guide to explaining the actual growth experience than the neoclassical model? This is doubtful.“ (Pack (1994)).

⁸ Heinloth (1993).

immer neuerer Maschinen und Geräte, die Arbeit leisten, Prozesswärme bereitstellen und Information verarbeiten. Sie erzeugen völlig neue Produkte und geben dem Energieeinsatz immer weiteren Raum. In den industrialisierten Volkswirtschaften schreitet die Automation schnell voran, d.h. Kapital und Energie substituieren die teure menschliche Arbeit, auf die noch immer rund 70% der Faktorkosten entfallen.⁹

Diese Beobachtungen legen die Frage nahe, ob die Gleichgewichtsannahme des neoklassischen Produktions- und Wachstumsmodells, die mit der Gewichtung der Faktoren gemäß ihren Kostenanteilen verbunden ist, gerechtfertigt ist. Denn dadurch wird die Bedeutung der Energie für das Wirtschaftswachstum sehr gering und gleichzeitig ein unerklärtes Fortschrittsresiduum sehr wichtig. Die folgende Analyse verzichtet auf die Annahme, dass produktive Beiträge und Kostenanteile der Faktoren übereinstimmen. Stattdessen werden die Produktionselastizitäten von Kapital, Arbeit und Energie technologisch-empirisch bestimmt. Damit lassen sich die beobachteten Wertschöpfungsentwicklungen verschieden strukturierter Wirtschaftssektoren der USA, Japans und Deutschlands über drei Dekaden, einschließlich der Energiekrisen der 70er Jahre, in guter Übereinstimmung mit der empirischen Entwicklung reproduzieren. Der folgende Abschnitt führt zunächst energieabhängige Produktionsfunktionen für Industrie- und Dienstleistungssektoren ein. In den weiteren Abschnitten werden diese ökonometrisch geschätzt und die Ergebnisse diskutiert.¹⁰

Wachstumsmodell

In den industriellen Volkswirtschaften besteht der **Kapitalstock** aus allen Maschinen und sonstigen Energieumwandlungsanlagen samt allen zu ihrem

⁹ Zwischen 1960 und 1995 investierte die bundesdeutsche Wirtschaft im Mittel etwa so viel in arbeitssparende Rationalisierungsmaßnahmen wie in Kapazitätserweiterung (IDW 1996).

¹⁰ Der Artikel beruht auf Arbeiten von Kümmel et al. (1997, 2000), Lindenberg (2000) und Lindenberg et al. (2000).

Betrieb und Schutz benötigten Installationen. Seine Schlüsselemente sind Wärmekraftmaschinen und Transistoren¹¹. Im Zuge des technischen Fortschritts werden sie in zunehmend komplexeren Strukturen vernetzt und ermöglichen so die Ausweitung des Automationsfortschritts. Idealerweise wäre der Kapitalstock (physisch) zu messen anhand seiner Fähigkeit zu Arbeitsleistung und Informationsverarbeitung bei Vollauslastung durch **Arbeit** und **Energie**. Analog kann die **Wertschöpfung** auf der technischen Ebene definiert und gemessen werden durch die Arbeitsleistung und Informationsverarbeitung, die zu ihrer Erzeugung aufgebracht werden muss. Da die entsprechenden technischen Informationen jedoch praktisch nicht ermittelbar sind, wird Proportionalität zwischen den technischen und den monetären Größen vorausgesetzt, die von den volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen ausgewiesen werden.¹² Kapitalstöcke und Wertschöpfungen werden in monetären, inflationsbereinigten Größen K bzw. Q gemessen. Arbeit und Energie werden in Quantitäten L bzw. E von Arbeitsstunden bzw. Petajoule pro Jahr gemessen, die den jährlichen Arbeitsmarktstatistiken und Energiebilanzen entnommen werden.¹³

Die zeitveränderlichen Faktoreinsatzmengen von Kapital, Arbeit und Energie werden durch die (marktbeeinflussten) unternehmerischen Entscheidungen über Kapazitätserweiterung, Automation und Auslastung festgelegt. Im Rahmen der thermodynamischen und technisch-ökonomischen Grenzen sind sie also unabhängige, von außen vorzuziehende

¹¹ Früher Relais und Röhren.

¹² Zur genauen Definition der technischen Einheiten, die primär von konzeptioneller Bedeutung sind, siehe Kümmel (1982), Kümmel et al. (2000).

¹³ Materialien sind die passiven Partner im Produktionsprozess, die im Zusammenwirken von Kapital, Arbeit und Energie zu den Produkten geformt werden. Sie tragen nicht selbst aktiv zur Erzeugung der Wertschöpfung bei, können diese aber durchaus beschränken. (Bei Mangel produktionsnotwendiger Materialien sinkt die Kapazitätsauslastung, d.h. bei gegebenem Kapitalstock wird weniger Arbeit und Energie eingesetzt).

Variable. Daher verwenden wir für die quantitative Analyse im weiteren das Konzept der Produktionsfunktion: Die zeitliche Entwicklung der (normierten) Wertschöpfung q wird beschrieben durch eine Funktion der (normierten) Inputs von Kapital k , Arbeit l , Energie e und der Zeit t : $q=q[k(t),l(t),e(t);t]$.

Dabei werden zweckmäßigerweise Output und Inputs in Vielfachen der Mengen Q_0, K_0, L_0, E_0 eines Basisjahres gemessen: $q=Q/Q_0, k=K/K_0, l=L/L_0, e=E/E_0$. Die explizite Zeitabhängigkeit der Produktionsfunktion berücksichtigt Innovationen, die letztlich auf menschliche Kreativität zurückgehen. Wir berechnen Produktionsfunktionen ausgehend von der folgenden Wachstumsgleichung, die die (infinitesimalen) relativen Änderungen des normierten Outputs in Beziehung setzt zu den relativen Änderungen der normierten Inputs und dem Kreativitätsterm Cr :¹⁴

$$\frac{dq}{q} = \alpha \frac{dk}{k} + \beta \frac{dl}{l} + \gamma \frac{de}{e} + Cr \quad (1)$$

Die Koeffizienten α, β und γ sind die bereits angesprochenen Produktionselastizitäten (PE), die die produktiven Beiträge von Kapital, Arbeit und Energie messen, indem sie die prozentuale Änderung der Wertschöpfung bei einprozentiger Änderung eines Faktors angeben. Wie gesagt, werden die PE nun nicht, wie sonst üblich, den Kostenanteilen der Faktoren gleichgesetzt, sondern technologisch-empirisch bestimmt.

Solange der Einfluss der menschlichen Kreativität vernachlässigbar ist, gilt $Cr=0$ und die Produktionsfunktion ist nicht explizit zeitabhängig: q ist dann eindeutig durch das technisch-kausal bestimmte Zusammenwirken von k, l und e bestimmt. Hiervon gehen wir in einem ersten Schritt aus und leiten nachfolgend funktionale Formen

¹⁴ Gleichung (1) folgt aus dem totalen Differential der Produktionsfunktion. Der ihre explizite Zeitabhängigkeit bedingende Kreativitätsterm ist $Cr \equiv (t/q)(\partial q/\partial t)(dt/t)$, und es gilt $\alpha(k,l,e) \equiv (k/q)(\partial q/\partial k)$, $\beta(k,l,e) \equiv (l/q)(\partial q/\partial l)$, $\gamma(k,l,e) \equiv (e/q)(\partial q/\partial e)$.

der Produktionsfunktion aufgrund technologischer Überlegungen her. Der Innovationen und Strukturveränderungen bewirkende Einfluss der menschlichen Kreativität wird dann in einem zweiten Schritt durch zeitabhängige Strukturparameter in der Produktionsfunktion modelliert.¹⁵

Zunächst folgt aus der Forderung, dass die Produktionsfunktion zweimal stetig differenzierbar sein soll, dass also ihre gemischten zweiten Ableitungen nach den Faktoren gleich sein sollen, ein System partieller Differentialgleichungen für die PE. Es muss gelten:

- $k(\partial\beta/\partial k)=l(\partial\alpha/\partial l)$,
- $k(\partial\gamma/\partial k)=e(\partial\alpha/\partial e)$ und
- $l(\partial\gamma/\partial l)=e(\partial\beta/\partial e)$.

Unter der Annahme konstanter Skalenerträge, d.h. $\alpha+\beta+\gamma=1$,¹⁶ lässt sich im System der drei Gleichungen eine der PE eliminieren. Eliminiert man z.B. γ , so erhält man eine erste Gleichung für α : $k(\partial\alpha/\partial k)+l(\partial\alpha/\partial l)+e(\partial\alpha/\partial e)=0$, eine zweite derselben Struktur für β , und eine dritte, α und β koppelnde Gleichung: $l(\partial\alpha/\partial l)=k(\partial\beta/\partial k)$. Die allgemeinsten Lösungen der ersten beiden Gleichungen lauten: $\alpha=f(l/k, e/k)$ und $\beta=g(l/k, e/k)$ mit beliebigen, differenzierbaren Funktion f und g . Die Randbedingungen, die die Lösung dieses Differentialgleichungssystems eindeutig determinieren, erfordern die Kenntnis der Werte einer der PE auf einer Fläche und der anderen PE auf einer Kurve im k, l, e -Faktorraum.¹⁷ Da diese technisch-ökonomische Informationen praktisch nicht ermittelbar sind, müssen die unbekannt Randbedingungen durch technologisch sinnvolle asymptotische Randbedingungen und entsprechende

Ansätze für die PE approximiert werden.¹⁸

Produktionsfunktion für den Industriesektor

Besonders einfache, nicht-konstante Lösungen des Systems von Differentialgleichungen für die PE mit technologisch sinnvollen Randbedingungen für industrielle Produktionssysteme sind $\alpha=a_0(l+e)/k$, $\beta=a_0(c_l/e-l/k)$, $\gamma=1-\alpha-\beta$. Die PE des Kapitals, α , berücksichtigt das Gesetz des abnehmenden Ertragszuwachses, demzufolge Kapitalwachstum bei unverändertem Wert des Kapitaleffizienzparameters a_0 nur in dem Maße zum Outputwachstum beitragen kann, wie Arbeit und Energie, die das Kapital ja betreiben, entsprechend mitwachsen. Der Ansatz für β berücksichtigt in einfachster Weise die Möglichkeit einer vollautomatisierten Industrieproduktion, d.h. bei Vollautomation und Vollauslastung mit $e=e_t$ und $k=k_t$, muss die PE der menschlichen Arbeit verschwinden. Dabei steht t für total automation, und c_t ist ein Maß für den Energiebedarf $e_t=c_t k_t$, des vollautomatisierten und vollausgelasteten Kapitalstocks $k_t(q)$.¹⁹ Setzt man diese α und β mit $\gamma=1-\alpha-\beta$ in die Wachstumsgleichung (1) ein, approximiert zunächst $Cr=0$ und integriert, so erhält man die (erste) LINEX-Produktionsfunktion:²⁰

¹⁸ Die einfachste Lösung des Differentialgleichungssystems, konstante Produktionselastizitäten, $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0=1-\alpha_0-\beta_0$, führt auf die energieabhängige Cobb Douglas-Produktionsfunktion $q_{CDE}=q_0 k^{\alpha_0} l^{\beta_0} e^{1-\alpha_0-\beta_0}$, die durchaus ähnliche Ergebnisse liefern wird wie die im weiteren diskutierten Produktionsfunktionen. Da sie jedoch die thermodynamisch/technisch nicht mögliche (asymptotisch) vollständige Substituierbarkeit von Energie durch Kapital zulässt, sollte q_{CDE} für die Berechnung von Zukunftsszenarien vermieden werden.

¹⁹ Die (asymptotische) Randbedingung für α lautet: $\alpha \rightarrow 0$, wenn $l/k \rightarrow 0$, $e/k \rightarrow 0$, die für β : $\beta \rightarrow 0$, wenn $e \rightarrow e_t$, $k \rightarrow k_t$.

²⁰ Verfeinerte Ansätze für die Produktionselastizitäten und entsprechende "höhere" LINEX-Produktionsfunktionen werden in Kümmel et al. (1985) und Lindenberger (2000) hergeleitet, führen jedoch in der empirischen Analyse nicht zu wesentlich anderen Ergebnissen.

$$q_{LI} = q_0 \cdot e \cdot \exp \left[a_0 \left(2 - \frac{l+e}{k} \right) + a_0 c_t \left(\frac{l}{e} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

die linear von der Energie und exponentiell von den Quotienten aus Kapital, Arbeit und Energie abhängt. Ein sich änderndes q_0 zeigt Änderungen der monetären Bewertung der Outputseinheit Q_0 an. Wenn Kreativität wirkt, d.h. wenn die explizite Zeitabhängigkeit der Produktionsfunktion nicht mehr vernachlässigbar ist, werden die Technologieparameter a_0, c_t und q_0 zeitabhängig.

Produktionsfunktion für den Dienstleistungssektor

Naturgemäß ist die Bedeutung der menschlichen Arbeit für die Wertschöpfung im Dienstleistungssektor größer als im Bereich industrieller Produktion. Kurzfristig kann das Arbeitsvolumen als Proxy-Variable der Kapazitätsauslastung im Dienstleistungssektor betrachtet werden. Dennoch kann auch hier Routine-Arbeit durch energiegetriebenes und zunehmend informationsverarbeitendes Kapital ersetzt werden. Dies betrifft insbesondere die traditionellen Dienstleistungssparten des Handels, der Banken und Versicherungen sowie der öffentlichen Verwaltung infolge zunehmenden Computereinsatzes.²¹

Es ist plausibel anzunehmen, dass im Dienstleistungssektor ein Zustand maximaler Automation erreicht werden kann. Dies wird nun durch Anwendung des Gesetzes der abnehmenden Ertragszuwächse analytisch gefasst: Es wird davon ausgegangen, dass die Annäherung an den Grenzzustand maximaler Automation im Dienstleistungssektor mit abnehmenden Wertschöpfungszuwächsen durch (zusätzlichen) Energieeinsatz verbunden ist: die PE der Energie nimmt mit steigendem Automationsgrad ab, bis sie schließlich im Grenzzustand maximaler Automati-

²¹ Thome (1997) kommt zu dem Ergebnis, dass durch den Einsatz heute verfügbarer Informationstechnik im deutschen Dienstleistungssektor bis zu 6,7 Millionen Arbeitsplätze wegfallen können.

¹⁵ Tatsächlich wird die empirische Analyse zeigen, dass der Einfluss der menschlichen Kreativität in der Regel über Zeiträume von mehr als einer Dekade in guter Näherung vernachlässigbar ist.

¹⁶ Diese Annahme spiegelt wieder, dass sich, unter unveränderten strukturellen Bedingungen bzw. zeitlich konstanten Technologieparametern in der Produktionsfunktion, bei Verdopplung aller Inputs auch der Output verdoppeln muss.

¹⁷ Kümmel (1980).

on verschwindet. Es muss also gelten: $\gamma \rightarrow 0$ für $e \rightarrow e_m$ und $k \rightarrow k_m$, wobei e_m und k_m Energieeinsatz und Kapitalstock im Grenzzustand maximaler Automation sind. Ein einfacher entsprechender Ansatz für die PE der Energie ist $\gamma = a_0(c_m - e/k)$ mit $c_m = e_m/k_m$. Er erfüllt die γ und α koppelnde Differentialgleichung, wobei für die PE des Kapitals weiterhin $\alpha = a_0(l+e)/k$ verwendet wird. Einsetzen in die Wachstumsgleichung (1), zusammen mit $\beta = l - \alpha \cdot \gamma$ und wiederum $Cr = 0$, führt für den Dienstleistungssektor nach Integration zur Produktionsfunktion:

$$q_{DI} = q_0 \cdot l \cdot \left(\frac{e}{l}\right)^{a_0 c_m} \cdot \exp\left[a_0 \left(2 - \frac{l+e}{k}\right)\right] \quad (3)$$

Wiederum werden bei Innovationsschüben und strukturellen Veränderungen die Technologieparameter a_0 , c_m und q_0 zeitabhängig.

USA, Japan, Deutschland

Die Technologieparameter der Produktionsfunktionen werden durch Anpassung der Theorie an die Daten beobachteter Wirtschaftsentwicklungen der USA, Japans und Deutschlands bestimmt.²² Da Energiebilanzen, volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen und Arbeitsmarktstatistiken unterschiedlich gegliedert sind, konnten nur solche Sektoren betrachtet werden, für die sich ein konsistentes Datengerüst für Faktormengen und Wertschöpfungen zusammenstellen ließ. Relativ einfach war das für den industriellen Sektor "Warenproduzierendes Gewerbe" der alten Bundesrepublik Deutschland, der im Zeitmittel rd. 50% des Bruttoinlandsprodukts (BIP) erwirtschaftet. Für die USA und Japan hingegen konnten

selbst mit der Unterstützung amerikanischer und japanischer Energiewissenschaftler "vor Ort" konsistente Datensätze nur für die Sektoren "Industries" gewonnen werden, die in den USA rd. 80% und in Japan 90% des BIP erwirtschaften. Diese Sektoren enthalten auch Teile des Dienstleistungssektors, der besonders in den USA in den letzten 15 Jahren stark expandierte. Für Deutschland gelang die separate Erfassung des Sektors "Marktbestimmte Dienstleistungen", der neben Kreditinstituten und Versicherungsunternehmen, dem Handel und den "Übrigen Dienstleistungsunternehmen" der VGR auch das arbeitsintensive Baugewerbe enthält und

im Mittel rd. 30 % zum BIP beträgt. Für diesen Sektor wird nachfolgend die Produktionsfunktion q_{DI} der Gl. (3), für die primär industriellen Sektoren die Produktionsfunktion q_{LI} der Gl. (2) verwendet.

Die Entwicklung der Faktoreinsatzmengen sowie der empirischen und theoretischen Wertschöpfungen sind in den Bildern 1-4 dargestellt. Die theoretischen Kurven in diesen Bildern können als die ersten Näherungen bezüglich des Kreativitätsterms Cr in der Wachstumsgleichung (1) aufgefasst werden, weil in ihnen eine einmalige Veränderung der Technologieparameter q_0 , a_0 und c_t bzw. c_m zwischen 1977 und 1978 zugelassen ist.

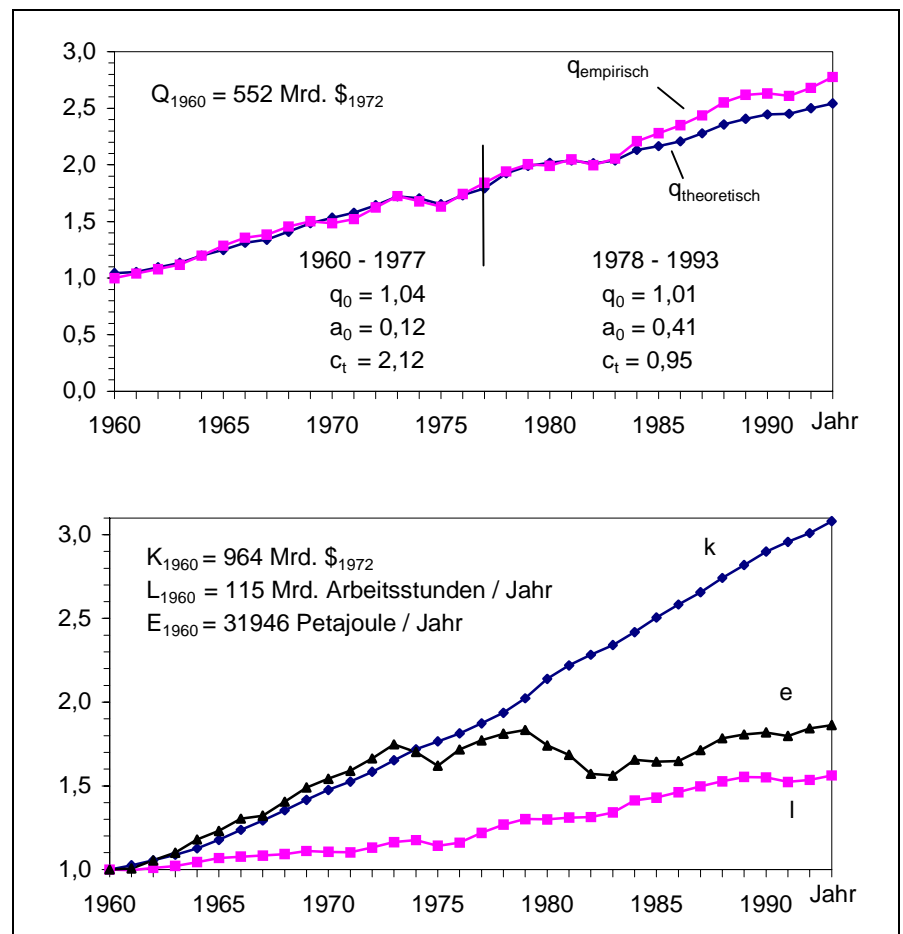


Bild 1: USA, "Industries"
 Oben: Empirisches Wachstum (Quadrate) und mit q_{LI} berechnetes theoretisches Wachstum (Rauten) der normierten Wertschöpfung $q = Q/Q_{1960}$ 1960-1993.
 Unten: Empirische Zeitreihen der normierten Faktoreinsatz von Kapital $k = K/K_{1960}$, Arbeit $l = L/L_{1960}$ und Energie $e = E/E_{1960}$. Weitere Erläuterungen im Text.

²² Dabei handelt es sich um nichtlineare Anpassungen unter der Nebenbedingung nichtnegativer Produktionselastizitäten. Diese Nebenbedingungen begrenzen die zulässigen Faktorquotienten in den Produktionsfunktionen der Gleichungen (2) und (3). Sie tragen auch der Tatsache Rechnung, dass der Energie-Kapital-Substitution (thermodynamische) Grenzen gesetzt sind und die Kapazitätsauslastung nicht über Eins gesteigert werden kann.

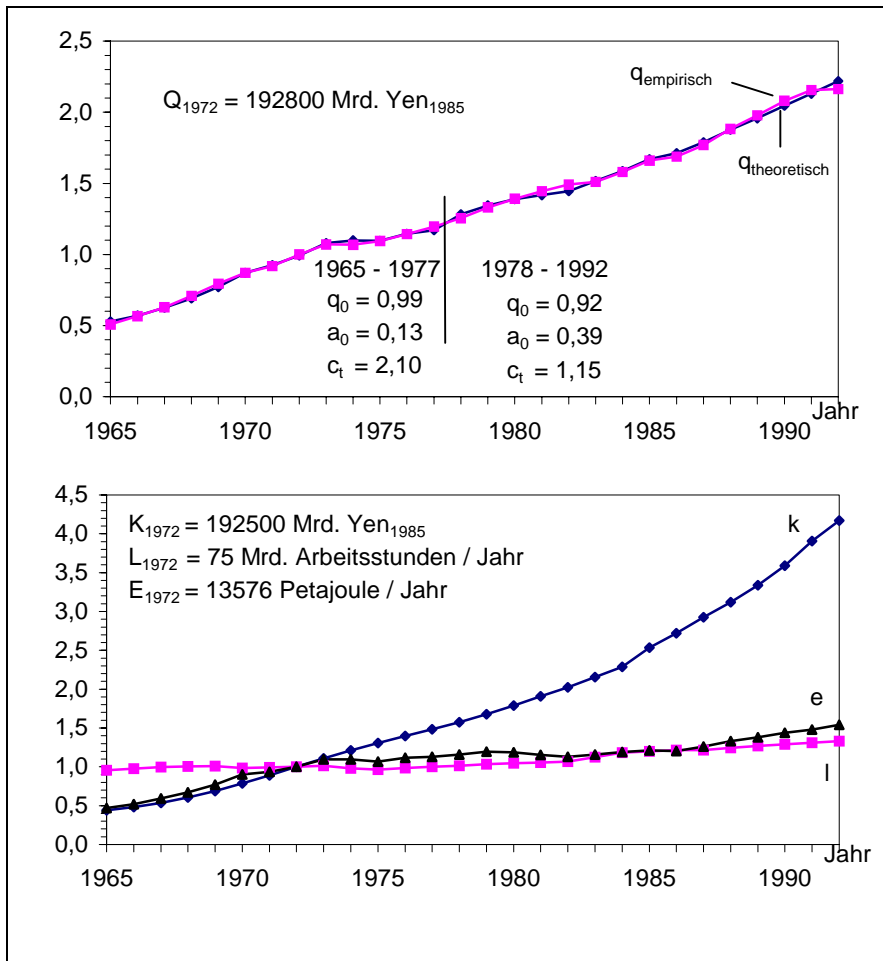


Bild 2: Japan, „Industries“.

Oben: Empirisches Wachstum (Quadrate) und mit q_{L1} berechnetes theoretisches Wachstum (Rauten) der normierten Wertschöpfung $q=Q/Q_{1972}$ 1965-1992.

Unten: Empirische Zeitreihen der normierten Faktoreinsätze von Kapital $k=K/K_{1972}$, Arbeit $l=L/L_{1972}$ und Energie $e=E/E_{1972}$.

Das modelliert auf die einfachst mögliche Weise die technologischen Anpassungsreaktionen nach der ersten Ölpreisexplosion.

Die Wirtschaftsentwicklung aller betrachteten Systeme wird durch die energieabhängigen Produktionsfunktionen mit in der Regel kleinen Residuen reproduziert. Für den deutschen industriellen Sektor „Warenproduzierendes Gewerbe“ mit seinen ausgeprägten Konjunkturschwankungen zeigt Bild 3 nur geringfügige Unterschiede zwischen Theorie und Empirie.²³ In Bild 3a wird in der Produk-

tionsfunktion die Energie um den Elektrizitätsanteil El von e auf $e_{El}=(1+El)e$ aufgewertet und die Anpassung mit lediglich drei Parametern über den Gesamtzeitraum von drei Dekaden 1960-1989 durchgeführt. Die Aufwertung der eingespeisten Primärenergie durch den Elektrizitätsanteil modelliert den Einfluss des Kreativitätsterms Cr mit quantitativ nahezu gleichen Ergebnissen wie die Parameterneuanpassung. Das ist insofern plausibel, als der Strukturwandel und

was (nach willkürlicher Setzung von $q_0=1$) $a_0=0,35$ und $c_t=1,00$ ergibt, erhält man noch eine durchaus befriedigende Übereinstimmung (Lindenberger (2000)).

Innovationen in Form der Einführung von Techniken der rationellen Energieverwendung mit gestiegenem Elektrizitätsbedarf einhergegangen sind und bestätigt die Auffassung, dass Elektrifizierung und technischer Fortschritt eng miteinander verzahnt sind.²⁴ Formal kann man $(I+El)\equiv\varepsilon(t)$ setzen und so die auf dem Kreativitätsterm beruhende explizite Zeitabhängigkeit der Produktionsfunktion modellieren. Diese Alternative zur kurzzeitigen Zeitabhängigkeit des Parametersatzes konnte aus Datengründen nur für den deutschen Industriesektor durchgeführt werden. Das relativ gleichförmige Wachstum der japanischen Industrie (Bild 2) wird von der Theorie so gut beschrieben, dass die theoretische von der empirischen Kurve kaum zu unterscheiden ist. Auch ohne Parameterneuanpassung erhält man noch eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Theorie und Empirie.²⁵

Interessant sind die gute Übereinstimmung zwischen theoretischer und empirischer Entwicklung in den USA zwischen 1960 und 1984 und die ab 1985 auftretenden wachsenden Abweichungen, die man erhält, wenn man, wie in Bild 1 geschehen, die Technologieparameter ab 1978 so wählt, dass die konjunkturellen Schwankungen nachvollzogen werden. Hier macht sich der durch informationstechnologische Innovationen geprägte Strukturwandel in den USA während der letzten 15 Jahre bemerkbar. Geht man in der Modellierung des Strukturwandels einen Schritt weiter und verwendet kontinuierlich zeitabhängige Strukturparameter, dann verschwinden auch hier die Diskrepanzen zwischen Theorie und Empirie, während die Ergebnisse für Japan und Deutschland im Wesentlichen unverändert bleiben.²⁶ Die separate Modellierung des Dienstleistungssektors für Deutschland zeigt Bild 4: Durch Berücksichtigung der Energie als Produktionsfaktor lässt sich durch die Produktionsfunktion q_{DI} der mit wachsender Automation und EDV-Durchdringung verbundene technische Fortschritt er-

²⁴ Jorgenson (1984).

²⁵ Lindenberger (2000).

²⁶ Henn (2000), Kümmel et al. (2001).

bundene technische Fortschritt erfassen und die Wertschöpfungsentwicklung bei nur einem Wechsel des Parametersatzes zwischen 1977 und 1978 über drei Dekaden passabel reproduzieren. Die zu den Anpassungen der Bilder 1-4 gehörenden standardmäßigen statistischen Gütemaße sind in Tabelle 1 ausgewiesen.²⁷

In den USA und Deutschland führte die erste "Ölpreisexplosion" 1973 bis 1975 zu einem Rückgang, in Japan zu einem Abflachen von Energieeinsatz und Wirtschaftswachstum. Die psychologischen Auswirkungen der unerwarteten, politisch bedingten Verteuerung des unverzichtbaren Produktionsfaktors Energie auf die unternehmerischen Investitionsentscheidungen ("Ölpreisschock") können hier nicht diskutiert werden – wichtig, und allen vier betrachteten Systemen gemeinsam, ist jedoch die Reduktion des Energiebedarfs der Kapitalstöcke, angezeigt durch die Verschiebungen der Parameter c , bzw. c_m hin zu kleineren Werten und die gleichzeitigen Erhöhungen der Kapitaleffizienzparameter a_0 . In diesen Parameterverschiebungen spiegeln sich die Entscheidungen von Unternehmen und Regierungen, nach der ersten Ölpreisexplosion in energieeffizientere Technologien zu investieren, sowie der Strukturwandel hin zu weniger energieintensiven Produkten. Die zweite Ölpreisexplosion 1979 bis 1981 hatte dann auch in allen betrachteten Systemen weniger heftige konjunkturelle Reaktionen zur Folge.

²⁷ Zur Berechnung des Wachstums mit Hilfe der Produktionsfunktionen q_{L1} und q_D der Gl. (2) und (3) benötigt man die exogen gegebenen Zeitreihen von k, l, e . Lindberger (2000) hat den ökonometrischen Apparat um das Optimierungsmodell PRISE der PREis-Induzierten Sektoralen Entwicklung erweitert. Dies Modell erlaubt es, die Inputs von Kapital, Arbeit und Energie aus den Faktorpreisen zu berechnen. Nach einer ersten, erfolgreichen Überprüfung für Deutschland kann das Modell nunmehr dazu verwendet werden, die Auswirkungen von Faktorpreisänderungen auf die sektorale und gesamtwirtschaftliche Entwicklung zu untersuchen.

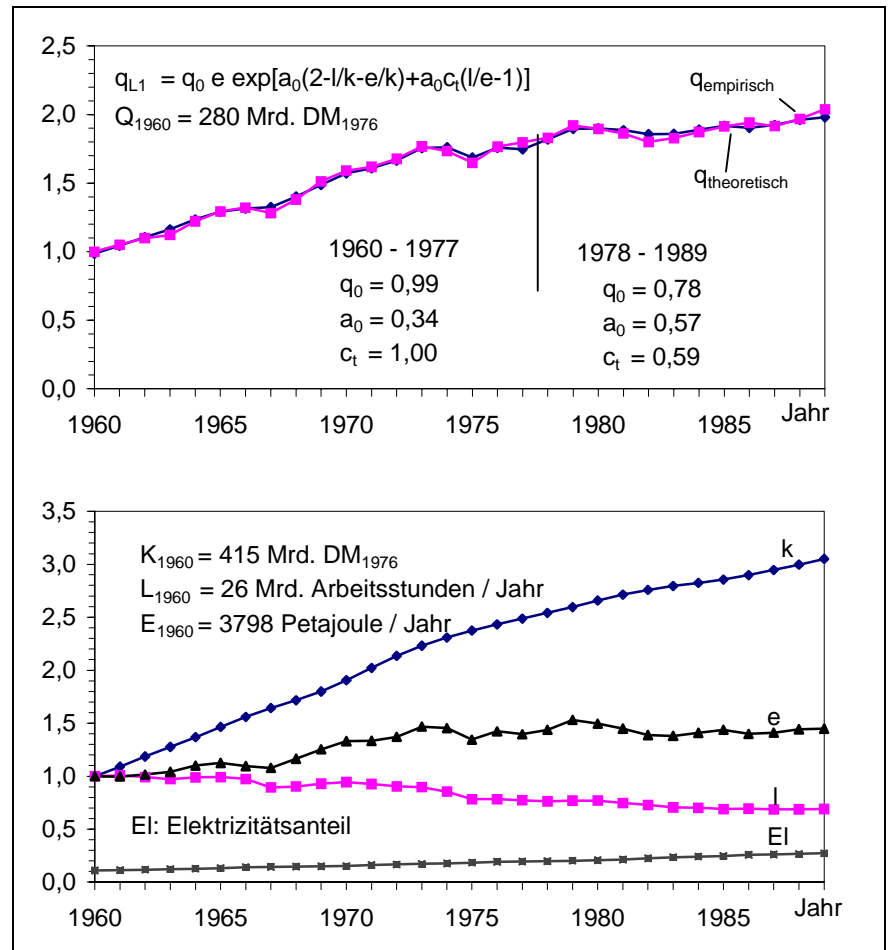


Bild 3: (alte) BRD, "Warenproduzierendes Gewerbe"
 Oben: Empirisches Wachstum (Quadrate) und mit q_{L1} berechnetes theoretisches Wachstum (Rauten) der normierten Wertschöpfung $q=Q/Q_{1960}$.
 Unten: Empirische Zeitreihen der normierten Faktoreinsätze $k=K/K_{1960}$, $l=L/L_{1960}$, $e=E/E_{1960}$ und des Elektrizitätsanteils EI am Endenergieverbrauch 1960-1989.

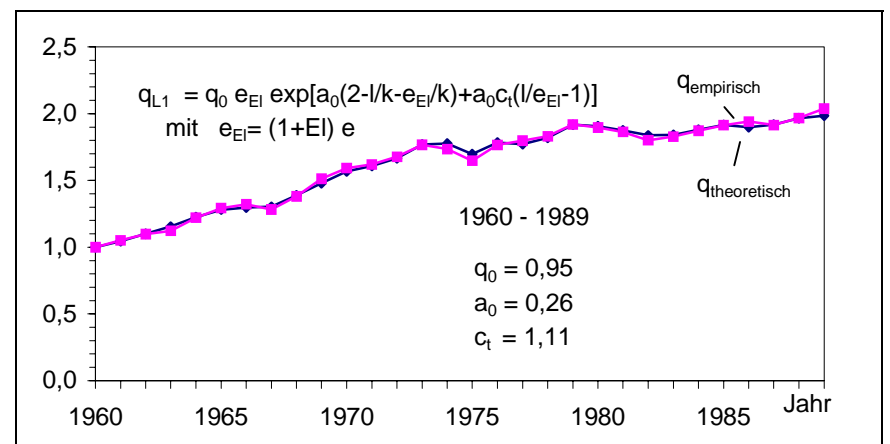


Bild 3a: (alte) BRD, "Warenproduzierendes Gewerbe"
 Empirisches Wachstum (Quadrate) und mit q_{L1} berechnetes theoretisches Wachstum (Rauten) der normierten Wertschöpfung $q=Q/Q_{1960}$ mit Modellierung von Innovation und Strukturwandel über den Elektrizitätseinsatz; Erläuterungen im Text.

Tabelle 1: Bestimmtheitsmaße R^2 und Autokorrelationskoeffizienten dw der Anpassungen¹

WIRTSCHAFTSSEKTOR (Zeitraum; Bild)	R^2	dw
USA, „Industries“ (1960-1977; Bild 1)	0,983	0,65
Japan, „Industries“ (1965-1977; Bild 2) (1978-1992; Bild 2)	0,995 0,992	1,22 1,15
(alte) BRD, „Warenproduzierendes Gewerbe“ (1960-1977; Bild 3) (1978-1989; Bild 3) (1960-1989; Bild 3a)	0,991 0,782 0,994	1,23 0,96 1,11
(alte) BRD, „Marktbestimmte Dienstleistungen“ (1960-1977; Bild 4) (1978-1989; Bild 4)	0,989 0,871	0,89 0,46

¹ Der "beste" Wert ist für R^2 1,0, für dw 2,0. Für die USA ergeben sich 1978-1993 für R^2 und dw sehr kleine Werte. In Hennis (2000) Innovationsdiffusionsmodell mit kontinuierlich fallenden $c_i(t)$ und steigenden $a_0(t)$ ergeben sich für die USA 1960-1993 $R^2=0,997$ und $dw=0,95$, für Japan und Deutschland sind R^2 und dw besser als 0,993 und 1,57 über die gesamte Beobachtungsdauer. Die positiven Autokorrelationen sind Folge der im Abschnitt „Wachstumsmodell“ angesprochenen, unvermeidbaren Näherungen für die Randbedingungen der Produktionselastizitäten und des notwendigerweise nur approximativen Charakters der Produktionsfunktionen. In ihren Schätzungen des BIP der USA, Japans und Deutschlands für den Zeitraum 1974-1995 mittels einer CD-Funktion mit kostengewichteten Faktoren Kapital und Arbeit und exponentieller Zeitabhängigkeit erhalten die Ökonometrier der Deutschen Bundesbank (1996: 47) 0,997, 0,995, und 0,97 für R^2 , und 0,42, 0,32 und 0,24 für dw .

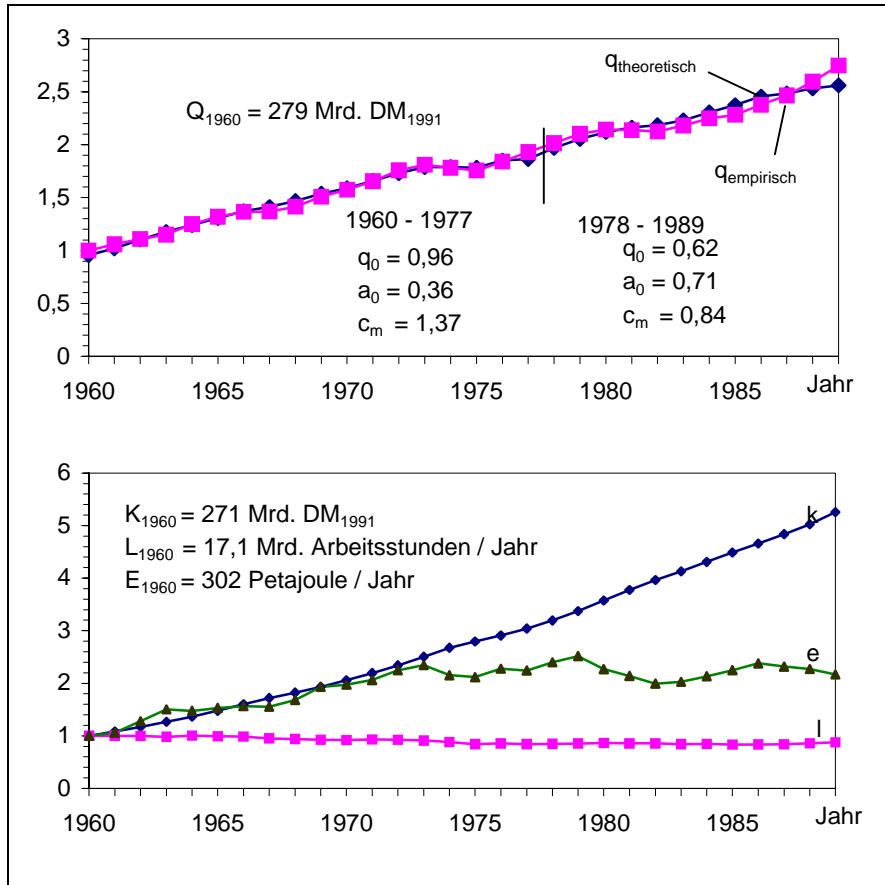


Bild 4: (alte) BRD, „Marktbestimmte Dienstleistungen“
 Oben: Empirisches Wachstum (Quadrate) und mit q_{D1} berechnetes theoretisches Wachstum (Rauten) der normierten Wertschöpfung $q=Q/Q_{1960}$ 1960-1989.
 Unten: Empirische Zeitreihen der normierten Faktoreinsätze von Kapital $k=K/K_{1960}$, Arbeit $l=L/L_{1960}$ und (End-) Energie $e=E/E_{1960}$.

Danach hat in allen betrachteten Systemen der Energieeinsatz nur noch wenig oder gar nicht zugenommen. Bemerkenswert ist, dass in den betrachteten Sektoren und Zeiträumen die Wertschöpfung stark gestiegen ist, obwohl in ihnen die empirische Entwicklung des Faktors Arbeit höchst unterschiedlich verlaufen ist: Im amerikanischen Sektor "Industries" wächst das Arbeitsvolumen, in Japan und auch im deutschen Dienstleistungssektor bleibt es nahezu konstant und im deutschen Warenproduzierenden Gewerbe fällt es. Offensichtlich sind insbesondere in den industriellen Sektoren Wachstum und Konjunkturschwankungen stärker mit Kapitalwachstum und Energieeinsatz korreliert als mit der menschlichen Routinearbeit. Quantitativ bestätigen dies die im folgenden Abschnitt berechneten Produktionselastizitäten.

Produktionsmächtigkeiten von Kapital, Arbeit und Energie

Die faktorabhängigen Produktionselastizitäten (PE) von Kapital, Arbeit und Energie werden für die betrachteten Wirtschaftssektoren der USA, Japans und Deutschlands berechnet, indem die jährlichen Werte der in den Bildern 1-4

dargestellten Faktoreinsatzmengen $k(t)$, $l(t)$ und $e(t)$ in die entsprechenden Gleichungen für die PE eingesetzt und die jeweils bis bzw. nach 1977 geltenden Technologieparameter q_0 , a_0 und c , bzw. c_m verwendet werden. Mittelt man die so erhaltenen PE über die Beobachtungszeiträume von rund 3 Dekaden, so erhält man die in Tabelle 2 angegebenen Mittelwerte, die als Maße für die Produktionsmächtigkeiten der Faktoren in den Beobachtungszeiträumen betrachtet werden können.²⁸

Die mittlere Produktionselastizität der Energie, d.h. – grob gesprochen – der mittlere prozentuale Zuwachs der Wertschöpfung bei einprozentigem Zuwachs des Energieeinsatzes, ist in den industriellen Sektoren mit rund 50% so groß wie die Elastizitäten von Kapital und Arbeit zusammen und liegt um rund eine Größenordnung über dem Anteil der Energiekosten an den Faktorgesamtkosten. Im Dienstleistungssektor liegt die PE der Energie um rund das Fünffache über dem dortigen Kostenanteil. Umgekehrt liegt die Produktionselastizität der Arbeit in allen Sektoren deutlich unter ihrem Kostenanteil, der die Lohnquote darstellt und in den industrialisierten Volkswirtschaften rd. 70% beträgt.²⁹

Das Auseinanderfallen von PE und Kostenanteilen von Energie und Arbeit spiegelt zweierlei wider. Zum einen reflektiert es kurz- bis mittelfristige Variationen der Wertschöpfungserzeugung. Der Grund hierfür ist, dass die Auslastung der (industriellen) Produkti-

Tabelle 2: Produktionselastizitäten von Kapital, $\bar{\alpha}$, Arbeit, $\bar{\beta}$, Energie, $\bar{\gamma}$ (Zeitmittel).

Wirtschaftssektor	$\bar{\alpha}$	$\bar{\beta}$	$\bar{\gamma}$
USA, „Industries“	0,36	0,10	0,54
Japan, „Industries“	0,34	0,21	0,45
(alte) BRD, „Warenproduzierendes Gewerbe“	0,45	0,05	0,50
(alte) BRD, „Marktbestimmte Dienstleistungen“	0,54	0,29	0,17

onskapazitäten stärker durch Energie- als durch Arbeitseinsatz bestimmt wird, da die eigentliche Aktivierung des industriellen Produktivkapitalstocks technisch-kausal bedingt primär durch Energieeinsatz erfolgt, während die menschliche Arbeit auch teilweise auslastungsunabhängige Funktionen wie Steuerung, Überwachung oder Verwaltung wahrnimmt. Zum anderen liefert das Ungleichgewicht zwischen Elastizitäten und Kostenanteilen von Energie und Arbeit die produktionstheoretische Deutung der in den meisten Industrieländern auf die lange Frist beobachteten Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Beschäftigung: Unter dem Druck der Kostenminimierung wird die teure menschliche (Routine-) Arbeit im Zuge des Automationsfortschritts durch produktionsmächtigere Kombinationen von billiger Energie und (zunehmend informationsverarbeitendem) Kapital ersetzt. Zwar wird dieser Substitutionsprozess im zeitlichen Verlauf durch noch existierende, aber sich verschiebende technische Grenzen des Automationsfortschritts und bestehende (Sozial-) Gesetze und Verträge verzögert, seine Richtung ist jedoch durch die gegenwärtig vorherrschenden Preise von Arbeit und Energie eindeutig bestimmt.

Würde das Produktionsergebnis im Sinne der sog. „Grenzproduktivitätstheorie der Verteilung“ den Elastizitäten entsprechend verteilt, erhielte die Arbeit nur einen wesentlich geringeren Anteil des Volkseinkommens als die genannten 70%. Offenbar kommt jedoch die von der Energie geleistete Wertschöpfung im Wesentlichen der (unselbständigen) Arbeit zugute. Der

hierbei zugrunde liegende Verteilungsmechanismus beruht(e) auf der Verhandlungsmacht freier Gewerkschaften, die in Zeiten der Vollbeschäftigung stark genug sind, um Lohnerhöhungen durchzusetzen gemäß „Produktivitätsfortschritt“, der durch die Ausweitung und die zunehmende Effizienz des Energieeinsatzes bedingt ist. Auf diese Weise konnten bislang breite Bevölkerungsschichten von dem Wohlstand profitieren, der im Zusammenwirken der Produktionsfaktoren Kapital, Arbeit und Energie geschaffen wurde.

Mit zunehmender Automation in der Produktion wird die menschliche Routinearbeit jedoch immer entbehrlicher. Zunehmende Ungleichheiten in der Einkommensverteilung zu Ungunsten der Arbeitseigner sind eine mögliche Folge. Dies ist etwa in den USA zu beobachten, wo durch flexiblere Arbeitsmärkte und eine wesentlich größere Lohnspreizung als hierzulande zwar die Beschäftigung angestiegen, dafür jedoch das Problem der „working poor“ ungelöst ist. Wenn dennoch der Arbeitsmarkt stärker wettbewerblich organisiert und gleichzeitig gesellschaftlich nicht wünschenswerte Verteilungswirkungen vermieden werden sollen, stellt sich die Frage, wie die sozialen Rahmenbedingungen der Marktwirtschaft den sich wandelnden technologischen Verhältnissen geeignet anzupassen sind.

Auf den Beitrag, den verstärkte Investitionen in Ausbildung und Bildung dabei leisten können und müssen, soll hier nicht eingegangen werden, auch nicht auf Fragen der Ausgestaltung und

²⁸ Die in Tabelle 2 ausgewiesenen Werte der Produktionselastizitäten (PE) ändern sich nicht wesentlich, wenn man der Analyse andere Produktionsfunktionen zugrunde legt. Dies gilt sowohl für „kompliziertere“ Funktionen mit verfeinerten Ansätzen für die Faktorabhängigkeit der PE als auch für „einfachere“ Funktionen, wie die Cobb-Douglas Funktion mit ihren konstanten PE (Kümmel et al. (1985), Lindenberger (2000)).

²⁹ Beaudreau (1998) erhält mit einer Cobb-Douglas Produktionsfunktion der Variablen Kapital K , Arbeit L und elektrische Energie EP für die USA (1950-1984), Japan (1965-1988) und Deutschland (1963-1988) Produktionselastizitäten von L und EP , die den $\bar{\beta}$ und $\bar{\gamma}$ der Tabelle 1 vergleichbar sind; s. auch Ayres (2001).

des Zusammenwirkens von Arbeitsmarkt- und Sozialpolitik. Stattdessen soll abschließend ein Teilaspekt angesprochen werden, der für die Finanzierung dieser Politikfelder relevant ist: Die Finanzierung von Gemeinschaftsaufgaben des Staates und sozialen Sicherungen erfolgt heute zum großen Teil über die Belastung des Produktionsfaktors menschliche Arbeit. Dies ist zugleich eine Ursache für das identifizierte Ungleichgewicht zwischen dem hohen Kostenanteil der Arbeit und ihrem deutlich geringeren produktiven Beitrag, wodurch technischer Fortschritt in die Richtung zunehmender Automation und abnehmender Beschäftigung induziert wird. Wenn diese Ungleichgewichtssituation zu stark ausgeprägt ist, besteht die Gefahr, dass in expandierenden und sich neu entwickelnden Wirtschaftsfeldern neue Beschäftigung nicht in ausreichendem Maße entstehen kann, um die durch Automationsfortschritt wegfallende zu kompensieren. Dies ist potenziell umso gravierender, weil mit Nettobeschäftigungsverlusten die Bemessungsgrundlage für Steuern und Abgaben reduziert wird, wodurch die Finanzierung des Staatshaushalts und der sozialen Sicherungssysteme untergraben wird. Daher erscheint es aus Gleichgewichts- und Stabilitätsüberlegungen heraus erwägenswert, in den Industrienationen die steuer- und abgabemäßige Belastung der Produktionsfaktoren Arbeit und Energie stärker als bisher an ihren produktiven Beiträgen zur Wertschöpfung zu orientieren.

Literaturverzeichnis

- Ayres, R.U. (2001): The minimum complexity of endogeneous growth models: the role of physical resource flows, in: *Energy – The International Journal* 26, 817-838.
- Beaudreau, B.C. (1998): *Energy and organization: growth and distribution reexamined*, Westwood (CT), Greenwood Press.
- Binswanger, H.C.; Ledergerber, E. (1974): Bremsung des Energiezuwachses als Mittel der Wachstumskontrolle, in: *Wirtschaftspolitik in der Umweltkrise*, hrsg. von J. Wolff, dva, Stuttgart.
- Boskin, M.J.; Lau, L.J. (1992): Capital, Technology and Economic Growth, in: *Technology and the Wealth of Nations*, hrsg. von Rosenberg R. et. al., Stanford University Press, California.
- Denison, E.F. (1979): Explanations of Declining Productivity Growth, in: *Survey of Current Business* 59, No.8, Part II, 1-24.
- Deutsche Bundesbank (1996): *Makroökonomisches Mehr-Länder-Modell*, Deutsche Bundesbank, Frankfurt.
- Gahlen, B. (1972): *Der Informationsgehalt der neoklassischen Wachstumstheorie für die Wirtschaftspolitik*, Tübingen.
- Hall, C; Lindenberger, D.; Kümmel, R.; Kroeger, T; Eichhorn, W. (2001): The Need to Reintegrate the Natural Sciences with Economics, in: *BioScience* 51 (8), 663-673.
- Heinloth, K. (1993): *Energie und Umwelt*, B.G. Teubner, Stuttgart.
- Henn, J. (2000): *Die Produktionsmächtigkeit von Energie und Kreativität: Eine Zeitreihenanalyse für Deutschland, Japan und die USA*, Diplomarbeit, Würzburg, unveröffentlicht.
- IDW (1996), *Institut der deutschen Wirtschaft: Zahlen zur wirtschaftlichen Entwicklung der Bundesrepublik Deutschland*, Deutscher Institutverlag, Köln.
- Jorgenson, D.W. (1984): The Role of Energy in Productivity Growth, in: *The American Economic Review* 74, No. 2, 26-30.
- Kümmel, R. (1980): Growth Dynamics of the Energy Dependent Economy, *Mathematical Systems in Economics*, Vol. 54, Hain, Königstein/Ts. and Oelgeschlager, Gunn & Hain, Cambridge Mass.
- Kümmel, R. (1982): The Impact of Energy on Industrial Growth, in: *Energy – The International Journal* 7, 189-203.
- Kümmel, R; Strassl, W.; Gossner, A.; Eichhorn, W. (1985): *Technical Progress and Energy Dependent Production Functions*, in: *Zeitschrift für Nationalökonomie/Journal of Economics* 45, 285-311.
- Kümmel, R.; Lindenberger, D.; Eichhorn, W. (1997): *Energie, Wirtschaftswachstum und technischer Fortschritt*, *Physikalische Blätter* 53, 869-875.
- Kümmel, R.; Lindenberger, D.; Eichhorn, W. (2000): The Productive Power of Energy and Economic Evolution, *Indian Journal of Applied Economics* 8 (Special Issue in Honor of P.A. Samuelson) 231-262.
- Kümmel, R.; Henn, J.; Lindenberger, D. (2001): *Capital, Labor, Energy and Creativity: Modelling Innovation Diffusion*, eingereicht bei *Structural Change and Economic Dynamics*.
- Lindenberger, D. (2000): *Wachstumsdynamik industrieller Volkswirtschaften – Energieabhängige Produktionsfunktionen und ein faktorpreisgesteuertes Optimierungsmodell*, Metropolis-Verlag, Marburg.
- Lindenberger, D.; Eichhorn, W.; Kümmel, R. (2000): *Energie, Wirtschaftswachstum und Beschäftigung*, in: *Zur deutschen Energiewirtschaft an der Schwelle des neuen Jahrhunderts*, hrsg. von W. Brune, Teubner, Leipzig, S. 52-76.
- Lucas, R.E. (1988): On the Mechanics of Economic Development, in: *Journal of Monetary Economics* 22, 3-42.
- Pack, H. (1994): Endogenous Growth Theory: Intellectual Appeal and Empirical Shortcomings, in: *Journal of Economic Perspectives* 8, 55-72.
- Romer, P.M. (1986): Increasing Returns and Long Run Growth, *Journal of Political Economy* 94, 1002-1037.
- Solow, R.M. (1957): Technical Change and the Aggregate Production Function, in: *The Review of Economics and Statistics* 39, 312-320.
- Solow, R.M. (1994): Perspectives on Growth Theory, *Journal of Economic Perspectives* 8, 45-54.
- Thome, R. (1997): *Arbeit ohne Zukunft? Organisatorische Konsequenz der wirtschaftlichen Informationsverarbeitung*, Vahlen, München.
- Tryon, F.G. (1927): An index of consumption of fuels and water power, *Journal of the American Statistical Association* 22, 271-282.