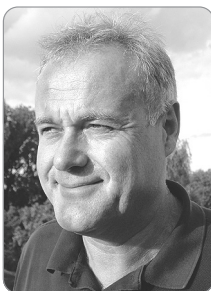


Technologische Revolution und Roboterökonomie – Ein Schreckgespenst?

Die technologische Entwicklung der letzten 200 Jahre hat zu jeder Zeit Befürchtungen dahingehend ausgelöst, dass mit dem technischen Fortschritt auch eine hohe Arbeitslosigkeit und Verarmung ganzer Bevölkerungsschichten verbunden sein kann. In dem folgenden Überblick werden die wichtigsten Ergebnisse der neueren wissenschaftlichen Diskussion präsentiert. Es werden die kurz- und langfristigen Auswirkungen einer technologischen Revolution und des Einsatzes von Robotern im Produktionsprozeß auf das Wachstum und die Einkommensverteilung vorgestellt und diskutiert.



Prof. Dr. Jörg Flemmig
war Dekan des Fachbereichs Wirtschaft der Hochschule Anhalt und ist dort immer noch Lehrbeauftragter für Volkswirtschaftslehre, insbesondere Außenwirtschaft. Bevorzugte Forschungsgebiete: Arbeitslosigkeit und Inflation, Globalisierung, Finanzmärkte.

Summary: This article presents and discusses modern approaches to an old question: what are the implications of a technological revolution and increasing automation on economic growth and labor share. First, the importance of technical progress for growth is shown. The next section looks at the short- and long-term implications of a technological revolution on income distribution, and in the last section the impact of a robot economy on the development of wages and capital income is presented.

Stichwörter: Technologische Revolution, Roboterökonomie, Wachstum, Einkommensverteilung

1. Einleitung und Überblick

In der letzten Zeit wurde eine an sich sehr alte Diskussion wieder aufgegriffen und auf theoretischer Ebene vertieft: Welchen Einfluss hat eine neue technologische Entwicklung bzw. eine zunehmende **Automatisierung des Produktionsprozesses** auf die Beschäftigung und die Ein-

kommensverteilung. Die vorliegenden empirischen Studien reichen von relativ pessimistischen Einschätzungen für die zukünftige Beschäftigung, wie z.B. die Studie von *Frey, Osborne*, in der sogar von Beschäftigungseinbußen im Dienstleistungssektor ausgegangen wird, bis zu relativ moderaten Einschätzungen, z.B. von *Möller und Arntz, Gregory, Zierahn*, (vgl. *Frey/Osborne, 2017, Möller, 2015, Arntz/Gregory/Zierahn, 2019*). In der Untersuchung von *Möller* wird zwar auch das Problem von Jobeinbußen in manchen Branchen gesehen, diese könnten aber durch eine höhere Beschäftigung in anderen Branchen überwiegend kompensiert werden. In der sehr umfangreichen Studie von *Arntz, Gregory und Zierahn* wird insbesondere betont, dass das Potenzial für eine Automatisierung in den verschiedenen Ländern und Branchen in den bisher vorliegenden Studien oft überschätzt wird, weil die Tätigkeiten der Beschäftigten doch sehr heterogen seien.

In dem folgenden Überblick werden die wichtigsten Ergebnisse aus der neueren Literatur zusammengefasst, die sich kurz- und langfristig ergeben, wenn eine **industrielle Revolution** stattfindet oder im Produktionsprozess immer mehr auf den Einsatz von Robotern zurückgegriffen wird. Um den Zusammenhang zwischen einem sehr starken Anstieg eines **arbeitssparenden technischen Fortschritts** und der damit verbundenen kurz- und mittelfristigen Entwicklung des Einkommens darstellen zu können, ist es sinnvoll, auf elementare Produktionsfunktionen und deren produktionstechnische Implikationen zurückzugreifen. Da insbesondere im Zusammenhang mit einer **Roboterökonomie**, wahrscheinlich aus Gründen der Anschaulichkeit, immer wieder auf **Cobb-Douglas-Produktionsfunktionen**

zurückgegriffen wird, werden die wichtigen Begriffe im Zusammenhang mit der Roboterökonomie sowohl für eine Cobb-Douglas-Produktionsfunktion, wie auch für eine **allgemeine Produktionsfunktion mit konstanten Skalenerträgen** zusammengestellt.

Zunächst wird auf die Bedeutung des technischen Fortschritts für den Wachstumsprozess hingewiesen. Es wird gezeigt, dass unter realistischen Voraussetzungen, ohne technischen Fortschritt, die Wachstumsrate einer Volkswirtschaft langfristig sinkt und dann das Wachstum stagniert.

In einem nächsten Abschnitt wird auf die kurz- und langfristigen Implikationen einer technologischen Revolution auf die Einkommensverteilung eingegangen und abschließend wird die Auswirkung einer Roboterökonomie auf die Entwicklung der Löhne und des Kapitaleinkommens vorgestellt.

2. Ist Wachstum ohne technischen Fortschritt möglich?

Um eine Basis für die weitere Diskussion zu haben, werden zunächst die wichtigsten produktionstechnischen Zusammenhänge einer Produktionsfunktion mit konstanten Skalenerträgen und abnehmenden Grenzerträgen und die elementaren Beziehungen der Wachstumstheorie zusammengefasst.

Ausgangspunkt sei die Produktionsfunktion:

$$Y = F(NT, K), \quad Y = f\left(\frac{TN}{K}\right)K, \quad y = f(nT), \quad y = \frac{Y}{K}, \quad n = \frac{N}{K}. \quad (1)$$

Dabei ist die Höhe der Produktion des Sozialprodukts Y eine Funktion des **effektiven Arbeitseinsatzes** NT und der Höhe des eingesetzten Kapitalstocks K . Der effektive Arbeitseinsatz lässt sich aufspalten in den direkten Beitrag der Arbeit N zum Produktionsergebnis und den Beitrag der Produktivität der Arbeit T , die sich im technologischen Niveau widerspiegelt. Für die Produktionsfaktoren Arbeit und Kapital trifft das Gesetz von positiven aber abnehmenden Grenzerträgen und konstanten Skalenerträgen zu. Der technische Fortschritt, der sich in einer Erhöhung von T niederschlägt, wirkt arbeitsvermehrend. Die **Kapitalproduktivität**, $y = Y/K$, ist eine Funktion der Ausstattung einer Kapitaleinheit mit effektiver Arbeit Tn . Die Kapitalproduktivität steigt, wenn die Ausstattung einer Kapitaleinheit mit effektiver Arbeit steigt. Sie fällt, wenn der effektive Arbeitseinsatz pro Kapitaleinheit NT/K fällt. Für den Reallohn w und den Realzinssatz r gilt:

$$w = \frac{\partial Y}{\partial N} = f' \left(\frac{TN}{K} \right) T, \quad r = \frac{\partial Y}{\partial K} = f' \left(\frac{TN}{K} \right) - f' \left(\frac{TN}{K} \right) \frac{TN}{K} = \frac{Y - wN}{K}. \quad (2)$$

Ändern sich die Faktorpreise, werden gewinnmaximierende/kostenminimierende Unternehmer die Inputkombina-

tion optimal anpassen. Um derartige Effekte darzustellen, wird in der ökonomischen Diskussion auf das von Maßeinheiten unabhängige **Konzept der Elastizitäten** zurückgegriffen, in dem zudem Ausgangsniveaus berücksichtigt werden. Die **Produktionselastizität der Arbeit** $\eta := dY / Y / (dN / N) > 0$ gibt annähernd an, um wieviel Prozent der Output steigt, wenn der Arbeitseinsatz um 1 Prozent steigt. Für allgemeine Produktionsfunktionen mit konstanten Skalenerträgen gilt: $0 < \eta < 1$, (vgl. Vogt, 1968a, S. 31). Die **Elastizität des Grenzprodukts der Arbeit** $\varepsilon := (dw / w) / (dN / N) < 0$ gibt an, um wieviel Prozent das Grenzprodukt der Arbeit und damit der Reallohn abnimmt, wenn die Arbeitsintensität um ein Prozent steigt.

Ebenfalls sehr hilfreich für die weitere Diskussion der Auswirkung eines technischen Fortschritts auf die Entwicklung der Löhne ist die **Substitutionselastizität** σ . Diese beschreibt annähernd, welche prozentuale Änderung der effektiven Arbeitsintensität $n = N / K$ sich ergibt, wenn sich das Faktorpreisverhältnis $p = (r / w)$ um 1 % ändert: $\sigma := (dn / n) / (dp / p) = (1 - \eta) / -\varepsilon > 0$, (vgl. Vogt, 1968a, S. 42).

Dass beide Elastizitäten η und ε die Substitutionselastizität beeinflussen, liegt auf der Hand. Aus der elementaren Produktions- und Kostentheorie ist bekannt, dass sich die Substitutionselastizität in der **Krümmung der Produktionsisoquante** der Produktionsfunktion widerspiegelt. Wenn mit einer relativ kleinen Veränderung der Steigung der Produktionsisoquante eine relativ große Änderung des Faktoreinsatzverhältnisses verbunden ist, ist die Krümmung der Produktionsisoquante relativ schwach und die Änderung des Faktoreinsatzverhältnisses relativ groß. Führt die Änderung der Steigung der Produktionsisoquante zu einer relativen kleinen Änderung des Faktoreinsatzverhältnisses, ist die Substitutionselastizität relativ gering. Im Extremfall $\sigma = 0$ wäre die Nachfrage nach Arbeit völlig lohnunelastisch, die Arbeitsintensität N / K wäre alleine durch die Technik bestimmt. Wenn die Produktionselastizität der Arbeit η relativ hoch, also nahe beim Wert Eins ist, ist das Grenzprodukt des Kapitals relativ niedrig, die Produktionsisoquante tendiert zu einer relativ starken Krümmung. Eine sehr ausführliche Erläuterung der verschiedenen Elastizitäten findet sich z.B. in Arbeiten von Vogt, (vgl. Vogt 1968a, S. 31 ff. und 1968b, S. 194). Eine gute Übersicht über die Lohnelastizität der Arbeitsnachfrage geben Michaelis und de Pinto (2010).

Die **Kapitalproduktivität**, $y = Y / K$, ist eine Funktion der Ausstattung einer Kapitaleinheit mit effektiver Arbeit Tn . Die Kapitalproduktivität steigt, wenn die Ausstattung einer Kapitaleinheit mit effektiver Arbeit steigt. Bildet man für die Funktion $Y = f(NT / K)K$ bzw. $y = f(n)$ das totale Differential bezüglich Y , N , T und K und erweitert entsprechend, erhält man den aus der Wachstumstheorie bekannten Zu-

sammenhang: $dY / Y = \eta(dN / N + dT / T) + (1 - \eta)dK / K$ bzw. $dy / y = \eta(dT / T + dn / n)$. Die **Wachstumsrate des Sozialprodukts** einer Volkswirtschaft dY / Y ergibt sich als gewogenes Mittel der Wachstumsraten des effektiven Arbeitseinsatzes ($dN / N + dT / T$) und des Kapitalstocks dK / K . Das Gewicht dieser Wachstumsraten sind jeweils die **Produktionselastizitäten der Produktionsfaktoren**. Bekanntlich sind diese Produktionselastizitäten α und $1 - \alpha$ für die Cobb-Douglas-Produktionsfunktion $Y = K^{1-\alpha}N^\alpha$ konstant, so dass die Wachstumsrate des Sozialproduktes durch die Wachstumsraten der Produktionsfaktoren und der Wachstumsrate des technischen Fortschritts bestimmt wird. Bei allgemeinen Produktionsfunktionen $y = f(nT)$ kann man nicht von einer konstanten Produktionselastizität der Produktionsfaktoren ausgehen. In diesem Fall gilt für die Wachstumsrate der Produktionselastizität der Arbeit: $d\eta / \eta = ((dy / y) / \eta) (1 + \varepsilon - \eta)$, (vgl. Vogt, 1968a, S. 33). Für Werte von $(1 + \varepsilon - \eta)$ ungleich Null ist die Produktionselastizität der Arbeit erst dann konstant, wenn die Kapitalproduktivität $y = Y / K$ konstant ist. Im Anpassungsprozess an ein steady state beeinflussen sich die Kapitalproduktivität und die Produktionselastizität der Arbeit gegenseitig.

Aus der elementaren Wachstumstheorie ist bekannt, dass bei einer konstanten Sparquote s und einer Abschreibungsrate δ im **Gütermarktgleichgewicht** die Ersparnisse $S = sY$ gleich den Investitionen I sind und damit die Wachstumsrate g einer Volkswirtschaft durch

$$g = sy - \delta = \frac{sY}{K} - \delta = \frac{S}{K} - \delta = \frac{I}{K} - \delta \quad (3)$$

gegeben ist. Die Wachstumsrate des technischen Fortschritts, die Sparquote s und die Wachstumsrate der Bevölkerung seien exogen vorgegeben. Die Wachstumsrate des Sozialprodukts g steigt mit der Kapitalproduktivität y . Bei einem konstanten technologischen Niveau würde, bei einer konstanten Bevölkerung, mit einem Anstieg des Kapitalstocks $n = N / K$ sinken. Damit sinkt die Kapitalproduktivität y und damit die Wachstumsrate der Volkswirtschaft. Prinzipiell wäre es durchaus denkbar, dass diese Konstanz von N und T als Schranke für die Produktion überwunden werden könnte. Kapital wäre durch den Akkumulationsprozess relativ reichlicher vorhanden, der Zinssatz r , als Preis für Kapital, würde relativ zum Preis für Arbeit w sinken und Kapital würde günstiger werden. Kapital könnte den effektiven Arbeitseinsatz im Produktionsprozess ersetzen. Es hängt somit von der Höhe der Substitutionselastizität σ ab, ob ohne technischen Fortschritt und bei konstanter Bevölkerung unbeschränktes Wachstum möglich ist. Dies kann man sich relativ einfach mit Hilfe einer Produktionsfunktion mit einer **konstanten Substitutionselastizität** σ verdeutlichen. In der Literatur und den Lehrbüchern wird als konkretes Beispiel für eine Produktionsfunktion $y = f(nT)$

mit konstanter Substitutionselastizität häufig die CES Produktionsfunktion und die Cobb-Douglas-Produktionsfunktion, als Spezialfall der CES Produktionsfunktion, verwendet. Ein Beispiel für eine **linear homogene CES Produktionsfunktion** wäre:

$$Y = \gamma [\alpha N^{-\rho} + (1 - \alpha)K^{-\rho}]^{-\frac{1}{\rho}} \quad (4)$$

Der Output Y ist eine Funktion des Arbeitseinsatzes N und des Kapitaleinsatzes K . Der Parameter γ ist ein Niveauparameter, der Parameter α ist ein Verteilungsparameter und ρ wird als Substitutionsparameter bezeichnet. Für die Substitutionselastizität σ gilt bei dieser CES Produktionsfunktion: $\sigma = 1 / (1 + \rho)$. Für $\rho \rightarrow 0$ nimmt die Substitutionselastizität den Wert Eins an. Steigt das Lohnzinsverhältnis w / r um ein Prozent, steigt die Kapitalintensität K / N ebenfalls um ein Prozent. Für $\gamma = 1$ und $\rho \rightarrow -1$ erhält man eine **unendlich große Substitutionselastizität** σ und aus (4) die Produktionsfunktion: $Y = \alpha N + (1 - \alpha)K$. Bei dieser Produktionsfunktion wäre es völlig unproblematisch, auch ohne technischen Fortschritt, den Kapitalstock immer weiter auszudehnen, da man sehr einfach Arbeit durch Kapital ersetzen kann. Wegen $Y / K = \alpha N / K + (1 - \alpha)$ würde die Kapitalproduktivität, für sehr große Werte von K , gegen den konstanten Wert $(1 - \alpha)$ tendieren. Bei einer Substitutionselastizität $\sigma > 1$ lässt sich Arbeit immer relativ leicht durch Kapital substituieren. Für die CES Produktionsfunktion (4) gilt dann für $\gamma = 1$: $Y^{-\rho} = \alpha N^{-\rho} + (1 - \alpha)K^{-\rho}$ und damit $(Y / K)^{-\rho} = \alpha(N / K)^{-\rho} + (1 - \alpha)$, für Werte von ρ zwischen Minus Eins und Null. Bei dem Spezialfall $\rho = 0$ und damit $\sigma=1$ erhält man die Cobb-Douglas-Funktion und damit $y = n^\alpha$, (vgl. Chiang, 1974, S. 419). Auch hier führt ein Anstieg des Kapitalstocks in ein **stationäres Gleichgewicht** mit einer Wachstumsrate in Höhe von Null, wenn sich weder die Bevölkerung, noch der technische Fortschritt entwickelt. Auf diesen Zusammenhang zwischen stationären Wachstumsgleichgewichten mit einer Wachstumsrate von Null, bei einer konstanten Bevölkerung und ohne technischen Fortschritt ist immer wieder hingewiesen worden (vgl. Vogt, 1968a, S. 84 ff. und von Weizäcker, 1962, S. 9 ff. und Vogt, 2019a, S. 4 ff.).

Entscheidend wäre in diesem Fall für ein anhaltendes Wachstum die Substitutionselastizität σ . Für den Wert dieser Größe gab es viele empirische Untersuchungen, die aber fast alle zu dem Ergebnis gekommen sind, dass die Substitutionselastizität einen Wert von kleiner als Eins hat. Eine sehr umfangreiche Untersuchung findet sich in *Knoblach, Stöckl* (vgl. *Knoblach, Stöckl*, 2019). Ohne technischen Fortschritt wäre also ein anhaltendes Wachstum gar nicht möglich. Die Kapitalproduktivität und damit das Wachstum der Wirtschaft würde langfristig den Wert Null annehmen, bzw. würde sich an die Abschreibungsrate der Volkswirtschaft anpassen.

Die einfachste Lösung für die Erklärung eines anhaltenden Wachstums war, eine Wachstumsrate für den arbeitssparenden technischen Fortschritt exogen vorzugeben (vgl. *Solow*, 1956 und z.B. *Blanchard/Ilting*, 2009, 364 ff.).

3. Die Folgen einer industriellen Revolution

Nimmt man als Ausgangspunkt eine Cobb-Douglas-Produktionsfunktion, kann man sehr einfach die verschiedenen Grenzprodukte und Elastizitäten berechnen. Ein sprunghafter Anstieg des technischen Fortschritts von $T = 1$ auf $T > 1$ würde für die Einkommensverteilung nichts ändern. Für die Cobb-Douglas-Produktionsfunktion mit $T = 1$ gilt: $Y = K^{1-\alpha}N^\alpha$, $w = \alpha(N/K)^{\alpha-1}$ und $r = (1 - \alpha)(N/K)^\alpha$. Für den Anteil des Arbeitseinkommens am Sozialprodukt ergibt sich $wN/Y = \alpha$ und entsprechend für den Anteil des Kapitaleinkommens am Sozialprodukt der Wert $(1 - \alpha)$. Für die Cobb-Douglas-Produktionsfunktion mit $T > 1$ gilt: $Y = K^{1-\alpha}(NT)^\alpha$, $w = \alpha(NT/K)^{\alpha-1}T$. Für den Anteil des Arbeitseinkommens am Sozialprodukt ergibt sich $wN/Y = \alpha$. Cobb-Douglas-Produktionsfunktionen sind daher nicht besonders hilfreich für die Untersuchung der Auswirkung eines technischen Fortschritts auf die Einkommensverteilung, da dieser Wert durch die konstanten Produktionselastizitäten vorgegeben ist. Die folgenden Betrachtungen, für allgemeine Funktionen, finden sich in einer Arbeit von *Vogt*, (vgl. *Vogt*, 2019b).

Wie man aus (2) sieht, ist die Wirkung eines sprunghaften technischen Fortschritts auf die Kapitalverzinsung, bei allgemeinen Funktionen, eindeutig:

$$\frac{dr}{dT} = -f''\left(\frac{TN}{K}\right)\frac{N}{K} \frac{TN}{K} > 0. \quad (5)$$

Dagegen ist die Wirkung einer technologischen Revolution auf den Reallohn keineswegs eindeutig:

$$\frac{\partial w}{\partial T} = f'\left(\frac{TN}{K}\right) + f''\left(\frac{TN}{K}\right)\frac{TN}{K} = (1 + \varepsilon)f'\left(\frac{TN}{K}\right) < 0 \quad \text{für } |\varepsilon| > 1. \quad (6)$$

Einerseits steigt der Reallohn proportional mit dem technischen Fortschritt, andererseits steigt der effektive Arbeitseinsatz NT und damit sinkt das Grenzprodukt. Wäre der Betrag der Elastizität der Arbeitsnachfrage bezüglich einer Änderung des Lohnsatzes größer als Eins, würde sich eine technologische Revolution negativ auf den Lohnsatz auswirken. Für die Elastizität der Arbeitsnachfrage bezüglich einer Änderung des Lohnsatzes um 1 Prozent gilt: $(dN/N)/(dw/w) = 1/\varepsilon < 0$. Empirische Daten deuten darauf hin, dass die Nachfrage nach Arbeitskräften eher unelastisch auf Reallohnänderungen reagiert, und damit der Betrag von $-\varepsilon$ größer als Eins ist. Der Lohnsatz würde somit bei einer technologischen Revolution zunächst sinken. Im Falle von Lohnrigiditäten käme es zu Arbeitslosigkeit. Kurzfristig kommt es zu einer Einkommensumverteilung zu Ungunsten der Arbeitnehmer wenn der Betrag der Elastizität

der Arbeitsnachfrage bezüglich einer Änderung des Lohnsatzes größer als Eins ist: $d\eta/dT = (\eta/T)(\varepsilon + 1 - \eta)$, (vgl. *Vogt*, 2019b, S. 4).

Man kann sich aber sehr einfach verdeutlichen, dass dies durch langfristige Effekte kompensiert wird. Durch den technischen Fortschritt erhöht sich die Kapitalproduktivität und damit das Wachstum der Wirtschaft. Die Kapitalausstattung pro Beschäftigten steigt und damit das Grenzprodukt bzw. der Reallohn. Aus (3) wird klar, dass bei $T = 1$, einer konstanten Bevölkerung und einem Kapitalstock K_0 ein steady state mit $sf(N/K_0) = \delta$ gegeben war. Für $T > 1$ ergibt sich ein höherer effektiver Arbeitseinsatz pro Kapitaleinheit NT/K_0 , die Kapitalproduktivität Y/K steigt, die Wachstumsrate des Kapitalstocks ist positiv $g = sf(NT/K_0) - \delta > 0$. Der Kapitalstock K_0 steigt so lange, bis $g = sf(NT/K_1) - \delta = 0$ erfüllt ist. Bei gleicher Spar- und Abschreibungsquote ist dies genau dann der Fall, wenn $N/K_0 = NT/K_1$, bzw. $K_1 = TK_0$, gegeben ist. Der Lohnsatz vor der industriellen Revolution war $w_0 = f(N/K_0)$. Nach der industriellen Revolution ist der Lohnsatz gleich $w_1 = f(NT/K_1)T$. Wegen $N/K_0 = NT/K_1$ ist der Lohnsatz nach dem Anpassungsprozess um den Faktor T höher. Der Kapitalstock ist gestiegen und wie man aus (2) sieht, ist der Zinssatz, bei nun höherem Kapitalstock, wieder auf sein altes Niveau gesunken.

4. Roboterökonomie

Das Problem bei der obigen Einführung des technischen Fortschritts ist, dass dieser exogen vorgegeben wird. Schon in den 50er und 60er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde immer wieder versucht, die Wachstumsrate des technischen Fortschritts zu endogenisieren. *Kaldor* versuchte die Arbeitsproduktivität Y/N als Funktion der Kapitalintensität K/N darzustellen. Die Idee war, dass mit einem Anstieg der Kapitalintensität K/N ein Anstieg der Produktivität der Arbeit N erfolgt (vgl. *Kaldor*, 1957). Diese Idee wurde auch in neuerer Zeit wieder aufgegriffen (vgl. *Schlicht*, 2015). Ein weiterer Erklärungsansatz für einen Anstieg der Produktivität der Beschäftigten war die Idee, dass mit einer Produktion Lernprozesse verbunden sind (vgl. *Arrow*, 1962). Diese Ideen wurden durchaus kontrovers diskutiert, haben sich aber nicht wirklich durchgesetzt (vgl. *von Weizsäcker*, 1967, Kapitel 3 und Kapitel 4 und *Krelle*, 1964). Auch die Unterscheidung in „**Erweiterungsinvestitionen**“, bei denen lediglich der Kapitalstock erhöht wird, und in „**Vertiefungsinvestitionen**“, die der Erhöhung des technischen Fortschritts dienen, und die damit verbundenen ökonomischen Implikationen wurden in dieser Zeit schon sehr ausführlich diskutiert (vgl. *Vogt*, 1968b).

Ein relativ neuer Ansatz für eine Erklärung eines anhaltenden Wachstums durch eine hohe Produktivität ist die **Roboterökonomie**. Diese Idee geht auf *Steigum* zurück und

wurde insbesondere von *Prettner*, aufgegriffen. (vgl. *Steigum*, 2011 und *Prettner, Geiger, Schwarzer*, 2018). Die Diskussion erfolgte weitgehend im Zusammenhang mit einer Cobb-Douglas-Produktionsfunktion. Dies macht die Idee sicher auch leichter verständlich. Im folgenden Absatz werden die Zusammenhänge auch im Rahmen von allgemeinen Funktionen vorgestellt, wie sie in Arbeiten von *Vogt* entwickelt wurden (vgl. *Vogt*, 2019b).

Es wird mit Kapital K produziert, das man sich als **Maschinen- und Anlagekapital** vorstellen kann, wie es bisher in Produktionsfunktionen verwendet wurde. Auch am Einsatz von Arbeitskräften N ändert sich nichts. Neu ist der Einsatz von Robotern R , die mit dem Inputfaktor Arbeit völlig substituierbar sind. Für eine Cobb-Douglas-Produktionsfunktion gilt dann: $Y = K^\alpha(N + R)^{1-\alpha}$ und für die entsprechende Kapitalproduktivität $Y / K = y = ((N + R) / K)^{1-\alpha}$. Eine allgemeine Funktion mit konstanten Skalenerträgen und mit positiven aber abnehmenden Grenzerträgen wäre durch $Y = F(K, N + R)$ bzw. $y = f((N + R) / K)$ gegeben. Die Kapitalproduktivität steigt mit dem **Einsatz von Robotern**.

Der Arbeitsinput N und die Roboter R haben das gleiche Grenzprodukt. Anlagen A in **traditionelles Anlagekapital K** oder in **Roboterkapital R** müssen im Gleichgewicht den gleichen Ertrag erwirtschaften; nur in diesem Fall werden beide Vermögenswerte gehalten. Diesen Punkt betonen insbesondere *Heer*, und *Immen*, in ihrer Kritik an *Prettner*, (vgl. *Heer, Immen*, 2019, und *Prettner*, 2019). Für das bisher akkumulierte Kapital A gilt $A = K + R$. Kommen Roboter nicht zum Einsatz, gilt $A = K$.

Für die Cobb-Douglas-Produktionsfunktion und für die allgemeine Funktion erhält man dann folgende Beziehungen:

$$\frac{\partial Y}{\partial N} = \frac{\partial Y}{\partial R} = (1 - \alpha) \left(\frac{N + R}{K}\right)^{-\alpha}, \quad \frac{\partial Y}{\partial K} = \alpha \left(\frac{N + R}{K}\right)^{1-\alpha}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial N} = \frac{\partial Y}{\partial R} = f' \left(\frac{N + R}{K}\right), \quad \frac{\partial Y}{\partial K} = f \left(\frac{N + R}{K}\right) - \frac{N + R}{K} f' \left(\frac{N + R}{K}\right).$$

Für die Cobb-Douglas-Produktionsfunktion ergibt sich damit die Beziehung:

$$\frac{\partial Y}{\partial K} = \frac{\partial Y}{\partial R} \text{ daher gilt: } R = \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha}\right) K - N > 0 \text{ wenn } \frac{N}{K} < \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha}\right), \quad (8)$$

bzw. $R = \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha}\right)(A - R) - N > 0 \text{ wenn } \frac{N}{A} < \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha}\right).$

Der Einsatz von Robotern macht erst dann Sinn, wenn der Kapitalstock, bei gegebenem Arbeitseinsatz N , hinreichend groß ist. Mit zunehmendem Einsatz von Kapital K sinkt das Grenzprodukt des eingesetzten traditionellen Kapitalstocks K und das Grenzprodukt der Arbeit N steigt. Mehr eingesetztes Kapital K würde auch das Grenzprodukt der Roboter erhöhen. Solange jedoch das Grenzprodukt des Kapitals größer ist als das Grenzprodukt eines Roboters, wird nur in **traditionelles Kapital** investiert $A = K$. Durch den Akku-

mulationsprozess sinkt jedoch das Grenzprodukt des Kapitals K , und wenn die Arbeitsintensität N / K auf den Wert $(1 - \alpha) / \alpha$ gesunken ist, lohnt sich der Einsatz von Robotern, $A = K + R$. Werden im Weiteren im Wachstumsprozess Ersparnisse in traditionelles Kapital K und in Roboterkapital R investiert, muss beachtet werden, dass diese Investitionen gerade so erfolgen, dass die Grenzerträge den in (7) beschriebenen Gleichgewichtsbedingungen genügen. Wenn man in einem Bereich plant, in dem der Einsatz von Robotern Sinn macht, weil der Kapitalstock hinreichend groß ist und damit das Grenzprodukt des Kapitals hinreichend niedrig ist, bzw. wegen des hohen Kapitalstocks das Grenzprodukt der Arbeit und der Roboter relativ hoch ist, muss man bei der Aufteilung des Gesamtkapitaleinsatzes $A = K + R$ beachten, dass zu jedem Zeitpunkt das Grenzprodukt des Kapitals K dem Grenzprodukt der Roboter entspricht. Wenn Roboter zum Einsatz kommen, gilt für die Cobb-Douglas-Produktionsfunktion:

$$Y = K^\alpha(N + R)^{1-\alpha} = \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha}\right)^{1-\alpha} K \text{ für } R = \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha}\right) K - N. \quad (9)$$

Der Einsatz von Robotern führt zu einer Produktionsfunktion in der Tradition der **AK Modelle**. Das **Grenzprodukt des Kapitals K bleibt konstant**. Dies liegt daran, dass bei konstantem Arbeitseinsatz N , durch die Aufteilung des Anlagevermögens A auf traditionelles Kapital und auf Roboter, der Einsatz von Robotern wie eine Erhöhung des Arbeitseinsatzes wirkt und daher einer Abnahme des Grenzproduktes des wachsenden Kapitalstocks K entgegenwirkt.

$$A = K + R = K + \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha}\right) K - N = \frac{K}{\alpha} - N, \quad K = \alpha(A + N). \quad (10)$$

Diese Aufteilung von $A = K + R$ stellt sicher, dass das Grenzprodukt von Robotern dem Grenzprodukt des traditionellen Kapitalstocks entspricht. Jede zusätzlich akkumulierte Vermögenseinheit dA muss, bei konstantem Arbeitseinsatz $dN = 0$ gemäß $dA = dK / \alpha$, auf den traditionellen Kapitalstock und die Roboter aufteilt werden, damit die Grenzprodukte den Gleichgewichtsbedingungen genügen. Wird mit Robotern produziert, die mit Arbeit völlig substituierbar sind, sind die Grenzprodukte von K , N und R identisch.

Diese Idee lässt sich auch auf die allgemeine Produktionsfunktion mit konstanten Skalenerträgen übertragen (vgl. *Vogt*, 2019b). Aus (8) folgt, dass auch in diesem Fall nur dann mit Robotern produziert wird, wenn das Grenzprodukt der Roboter dem des traditionellen Kapitals entspricht. Es gibt einen Wert für $x_R = (N + R) / K$, bei dem das Grenzprodukt eines Roboters gleich ist dem Grenzprodukt einer zusätzlich eingesetzten Kapitaleinheit, für den also gilt: $f(x_R) = f'(x_R) (1 + x_R)$. Insgesamt können $A = R + K$ in Roboterkapital und Anlagekapital angelegt werden. Damit gilt $x_R = (N + A - K) / K$ und $K = (N + A) / (1 + x_R)$. Setzt man dieses K in $x_R = (N + R) / K$ ein, erhält man für R den Wert $R = (x_R A - N) / (1 + x_R)$. Roboter werden somit erst dann

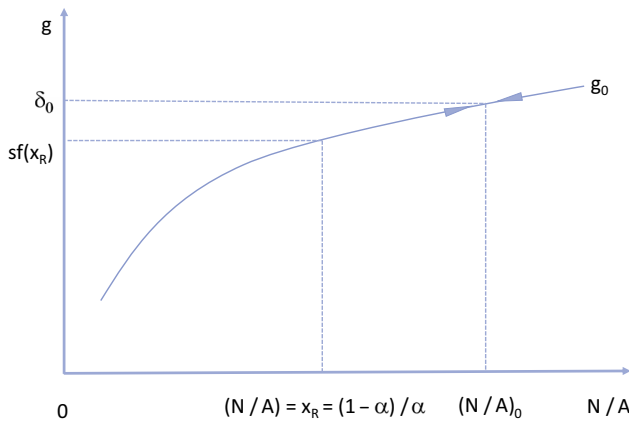


Abb. 1

eingesetzt, wenn die Bedingung $N/A < x_R$ erfüllt ist. Für $N/A > x_R$ beschränkt sich das bisher eingesetzte Kapital auf $A = K$ und das bisher eingesetzte Kapital ist relativ gering. Die Entwicklung der Grenzprodukte im Wachstumsprozess ist analog zur Entwicklung der Grenzprodukte bei der Cobb-Douglas-Funktion. Es gibt somit für beide Funktionen, bei konstantem N , einen kritischen Wert für K , ab dem der Einsatz von Robotern Sinn macht.

Der bisher akkumulierte Kapitalstock $A = K + R$ ändert sich gemäß $dA = sY - \delta A$. Er wächst mit den Ersparnissen sY und sinkt mit den Abschreibungen auf das Anlagen- und Roboterkapital. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass diese Abschreibungsraten für K und R identisch sind und die Bevölkerung nicht wächst. Für das Einkommen, aus dem gespart wird, setzt man die entsprechenden Produktionsfunktionen ein. Die Wachstumsraten für das bisher akkumulierte Kapital/Vermögen A kann man wie folgt zusammenfassen und in *Abb. 1* präsentieren. *Abb. 1* findet sich für die allgemeine Funktion bei *Vogt, 2019b*, (vgl. *Vogt, 2019b*, S. 11).

$$\frac{dA}{A} = \frac{dK}{K} = \frac{sK^\alpha N^{1-\alpha}}{A} - \delta = s \left(\frac{N}{K} \right)^{1-\alpha} - \delta \text{ für } R = 0. \quad (11)$$

Ohne Roboter und ohne Berücksichtigung der Abschreibungen wächst das bisher investierte Vermögen A einer Volkswirtschaft mit der Rate $sy = sf(N/K) = g_0$. Im Falle der Cobb-Douglas-Produktionsfunktion mit der Rate $s(N/K)^{1-\alpha}$. In *Abb. 1* ist der kritische Wert x_R angegeben, ab dem es sich lohnt Roboter einzusetzen. Rechts von x_R ist der Kapitalstock noch zu niedrig und damit das Grenzprodukt des traditionellen Anlagekapitals K zu hoch, es wird ohne Roboter produziert, $A = K$. Bei einer konstanten Bevölkerung fällt N/K im Wachstumsprozess, die Kapitalproduktivität Y/K fällt und damit, bei gegebener Sparquote, die Wachstumsrate g_0 . Eine Produktion mit Robotern macht nur dann Sinn, wenn N/K auf den kritischen Wert $x_R = (1 - \alpha) / \alpha$ fällt. Die Wachstumsrate wäre dann $sf(x_R)$ bzw. für die obige Cobb-Douglas-Produktionsfunktion $s((1 - \alpha) / \alpha)^{1-\alpha}$. Wenn jedoch die Abschreibungsrate größer ist als die kriti-

sche Wachstumsrate $sf(x_R)$, wird der Bereich, in dem sich der Einsatz von Robotern lohnt, nicht erreicht. Genau dieser Fall ist in *Abb. 1* abgebildet. Der Kapitalstock wächst mit der Rate $dK / K = g_0 - \delta_0$. In $g_0 = \delta_0$ wird ein stationärer Zustand erreicht. Das Grenzprodukt von K ist größer als von R . Es werden keine Roboter eingesetzt.

Wird mit Robotern produziert, ist das Sozialprodukt nach (9) und (10) durch $Y = ((1 - \alpha) / \alpha)^{1-\alpha} (A + N)\alpha$ gegeben. Die Akkumulationsgleichung für den gesamten Kapitalstock $A = K + R$ erhält man aus den Ersparnissen einer Periode, bezogen auf den Bestand A , sY / A :

$$\frac{sY}{A} = \frac{\left[\left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^{1-\alpha} \alpha (A+N) \right]}{A} s - \delta = s \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^{1-\alpha} \alpha \left(1 + \frac{N}{A} \right) - \delta, \quad (12)$$

$$\frac{sY}{A} = g_1 - \delta \text{ für } g_1 = s \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^{1-\alpha} \alpha \left(1 + \frac{N}{A} \right).$$

Diese Wachstumsrate g_1 ist in *Abb. 2* abgebildet. Sie hat die konstante Steigung $s((1 - \alpha) / \alpha)^{1-\alpha}\alpha$. Leitet man die Wachstumsrate g_0 an der kritischen Grenze $N / A = (1 - \alpha) / \alpha$ nach N / A ab und setzt den Wert $(1 - \alpha) / \alpha$ ein, hat die Wachstumsrate an dieser Stelle die gleiche Steigung. Die Wachstumsrate mit Robotern ist größer als die Wachstumsrate ohne Roboter. Dies liegt daran, dass bei einer Produktion mit Robotern die Kapitalproduktivität Y/A und damit die Ersparnisse größer sind. Bei einer hinreichend kleinen Abschreibungsrate δ_1 fällt die Wachstumsrate auf den Wert $s((1 - \alpha) / \alpha)^{1-\alpha}\alpha$. Bei einer konstanten Bevölkerung N entwickelt sich der Wert N/A im Wachstumsprozess gegen Null, wenn die Abschreibungsrate δ_1 kleiner ist als $s((1 - \alpha) / \alpha)^{1-\alpha}\alpha$. Die Volkswirtschaft würde, wie in *Abb. 2* gezeigt, in diesem Fall dauerhaft mit der Rate $g_1 - \delta_1$ wachsen. Für die Anzahl der Roboter gilt dann: $R = A - \alpha(A + N)$ und damit $R = A(1 - \alpha) - \alpha(N / A)A$. Die Anzahl der Roboter würde im oben diskutierten Fall gegen den Wert $R = A(1 - \alpha)$ tendieren, wenn N / A wegen dem Wachstum von A gegen Null geht. Diese Roboter verhindern eine Stagnation, wie sie im Falle ohne technischen Fortschritt bzw. ohne eine Produktion mit Robotern zu erwarten wäre. Würde es keine Robotertechnologie geben wäre die Wachstumsrate g_0 relevant, es würde sich in *Abb. 2* ein stationäres Gleichgewicht mit der Abschreibungsrate δ_1 und der Arbeitsintensität $(N / A)_1 = (N / K)_1$ ergeben.

In *Abb. 3* wird zwar der Bereich erreicht, in dem mit Robotern produziert wird, das System tendiert jedoch bei der Arbeitsintensität $(N / A)_2$ und der relativ hohen Abschreibungsrate δ_2 in ein stationäres Gleichgewicht. Im Vergleich zu einer Produktion ohne Robotertechnologie ist der gesamte Kapitaleinsatz $A_2 = K + R$ größer.

Die oben diskutierten Wachstumsraten und verschiedenen steady state Gleichgewichte können auch auf der Grundlage von Pro-Kopf Größen und der Entwicklung des traditio-

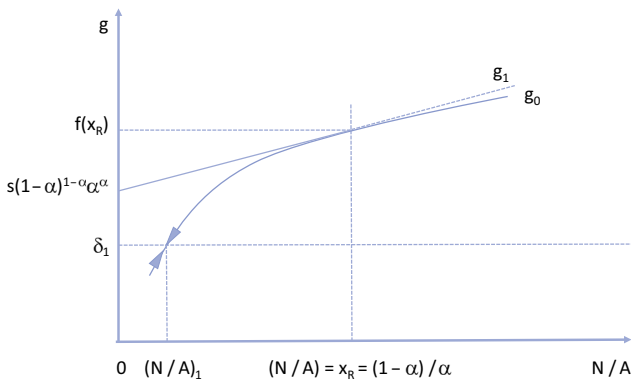


Abb. 2

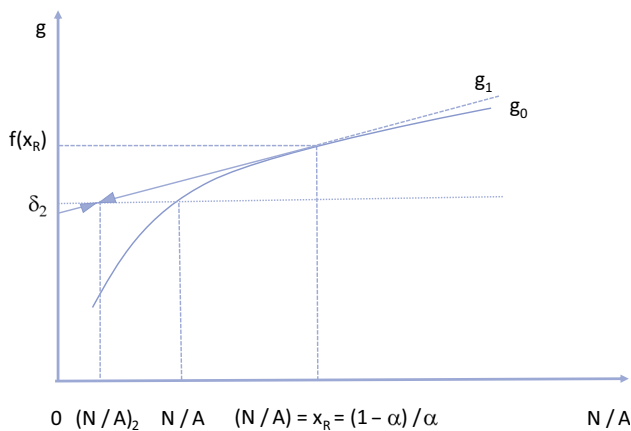


Abb. 3

nellen Kapitalstocks K diskutiert werden. Es wird dann von $dA = dK / \alpha$ ausgegangen, an den Ergebnissen ändert sich nichts (vgl. Heer, Irmen, 2019).

Im Rahmen einer traditionellen Produktion ohne Roboter würde der Lohnsatz steigen, weil mit zunehmendem Kapitaleinsatz die Grenzproduktivität der Arbeit zunimmt. In einer Roboterökonomie bleibt der Lohnsatz konstant: $w = f'(x_R)$.

Literatur

Arntz, M., Gregory, T., U. Zierahn, Digitalization and the future of work: macroeconomic consequences, ZEW Discussion Papers No. 19-024, 2019.
 Arrow, K., The Economic Implications of Learning by Doing, in: Review of Economic Studies, Vol. 29 (1962). S. 155-173.

Blanchard, O., G. Illing, Makroökonomie, 5. Aufl., München, 2009.
 Chiang, A., Fundamental Methods of Mathematical Economics, 2.ed. New York, 1974.
 Frey, C. B., M. Osborne, The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation?, in: Technological Forecasting & Social Change, Vol. 114 (2017), S. 254-280.
 Heer, B., A. Irmen, Automation, Economic Growth, and the Labor Share - A Comment on Prettner, CESifo WORKING PAPERS 7730, 2019.
 Kaldor, N., A Model of Economic Growth, in: The Economic Journal, Vol. 67 (1957), S. 591-624.
 Knoblach, M., F. Stöckl, What determines the elasticity of substitution between capital and labor? A literature review, CEPIE Working Paper No. 01/19, 2019.
 Krelle, W., Investition und Wachstum, in: Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik, Band 76 (1964), S. 1-22.
 Michaelis, J, M. Pinto de, Wodurch wird die Lohnelastizität der Arbeitsnachfrage bestimmt? -Die vier Hicks-Marshall-Regeln, in: WIST 10 (2010), S. 490-496.
 Möller, J., Verheißung oder Bedrohung? Die Arbeitsmarktwirkungen einer vierten industriellen Revolution, IAB-Discussion Paper No. 18, 2015.
 Prettner, K., Geiger, N., J. Schwarzer, Die Auswirkungen der Automatisierung auf Wachstum, Beschäftigung und Ungleichheit, in: Perspektiven der Wirtschaftspolitik, Band 19/2 (2018), S. 59-77.
 Prettner, K., A Note On The Implications Of Automation For Economic Growth And the Labor Share, in: Macroeconomic Dynamics, 23/3 (2019), S. 1294-13.
 Schlicht, E., Directed technical Change and Capital Deepening: A Reconsideration of Kaldor's Technical Progress Function, in: Metroeconomica 67/1 (2015), S. 119-151.
 Solow, R., A Contribution to the Theory of Economic Growth, in: Quarterly Journal of Economics, Band 70 (1956), S. 65-96.
 Steigum, E., Robotics and growth, in: La Grandville, O., (Hrsg.), Frontiers of Economics and Globalization: Economic Growth and Development, West Yorkshire 2011, S. 543-547.
 Vogt, W., Theorie des wirtschaftlichen Wachstums, Berlin und Frankfurt 1968a.
 Vogt, W., Kapitalakkumulation und technischer Fortschritt, in: Weltwirtschaftliches Archiv, Band 100 (1968b), S. 185-196.
 Vogt, W., Die Logik der Marktwirtschaft. 4 A Wirtschaftliches Wachstum, 2019a, Online im Internet: URL: <https://www.uni-regensburg.de/Fakultaeten/WiWi/vogt/index.htm> (Abrufdatum: 12.12.2019).
 Vogt, W., Industrielle Revolution, 2019b, Online im Internet: URL: <https://www.uni-regensburg.de/Fakultaeten/WiWi/vogt/index.htm> (Abrufdatum: 15.12.2019).
 Weizäcker von, C.C., Wachstum, Zins und optimale Investitionsquote, Basel 1962.
 Weizäcker von, C.C., Zur ökonomischen Theorie des technischen Fortschritts. Göttingen 1967.