Löhne und Beschäftigung nach einer industriellen Revolution: Eine makroökonomische Skizze[1]

Winfried Vogt (2019)

Entscheidendes Merkmal der laufenden industriellen Revolution sind selbständig arbeitende Maschinen (Roboter), die menschliche Arbeiten übernehmen und ersetzen. Ihre Ambivalenz besteht darin, dass sie einerseits aufgrund ihrer hoher Produktivität wachsenden Wohlstand verspricht, vielleicht sogar ein Leben ohne Knappheit, dass sie aber andererseits menschliche Arbeit überflüssig macht und so die Frage aufwirft, wie Menschen ohne Erwerbstätigkeit an die höheren Erträge kommen sollen und wem diese dann eigentlich zufließen[2]. Diese Besorgnis wird genährt durch Studien, nach denen bis 2030 in USA und in Europa fast die Hälfte aller Jobs entfallen wird, nicht nur in der Industrie, wo von einer "hollowing out of middle class jobs" die Rede ist, sondern auch im Dienstleistungsektor[3]. Prognosen für die Bundesrepublik Deutschland sind weniger pessimistisch[4]. Nach einer Studie des Instituts für Arbeitsmarkt und Berufsforschung (Wolter u.a., 2015) gehen zwar bis zum Jahr 2030 immerhin 420.000 Arbeitsplätze verloren, aber es werden gleichzeitig fast 360.000 neu geschaffen. Arbeitsplätze werden dabei in erheblichem Umfang zwischen Branchen, Berufen und Qualifikationen umgeschichtet. Insgesamt sei die Industrie 4.0 weder eine Jobmaschine noch eine "Beschäftigungsvernichterin" (Weber, 2016, ähnlich Möller 2016).

Angesichts solcher Prognosen erscheint es zunächst einmal sinnvoll daran zu erinnern, wie sich die Beschäftigungsmöglichkeiten nach den großen industriellen Revolutionen der Vergangenheit entwickelt haben. In der Tat haben Erfindung und Einsatz der Dampfmaschine zu Beginn des 19. Jahrhunderts fast ein Jahrhundert lang traditionelle

---

[1] Erste Fassung November 2017, letzte Version Dezember 2019. Für hilfreiche Hinweise und Kommentare möchte ich mich bei Jörg Flemmig bedanken.

[2] Die damit verbundenen Möglichkeiten werden eindrucksvoll geschildert in Brynjolfsson und McAfee (2014).

[3] Quelle: Studien von Frey und Osborn (2017) von der Universität Oxford und von Bowles (2014) von der London School of Economics.

[4] Vgl. z.B. Studien für das Bundesministerium für Arbeit und Soziales, von Bonin u.a. (2015) zur Übertragung der Studie von Frey und Osborne auf Deutschland, und von Vogler u.a. (2016) mit einer Prognose für den Arbeitsmarkt 2030.

Beschäftigungsmöglichkeiten beschränkt, aber der Anstieg der Arbeitsproduktivität hat doch auch das wirtschaftliche Wachstum so begünstigt, dass gleichzeitig neue Arbeitsplätze geschaffen werden konnten. Dies gilt erst recht für die zweite industrielle Revolution nach Einführung von Elektrizität und Fließband zu Beginn des 20. Jahrhunderts, nach der noch Keynes eines dauerhafte "technologische Arbeitslosigkeit" befürchten konnte. Aber die anschließende Massenarbeitslosigkeit der dreißiger Jahre war keine Folge der industriellen Revolution, sondern – wie gerade Keynes klar gemacht hat –konjunktureller Natur.
Allgemein gilt, dass ein dramatischer Anstieg der Arbeitsproduktivität zunächst immer traditionelle Arbeitsplätze wegrationalisiert, und dass ein Übergang zu neuen, modernen Arbeitsplätzen Zeit für Ausbildung, regionale Mobilität etc. erfordert, so dass es auf alle Fälle zumindest vorübergehend zu friktioneller Arbeitslosigkeit kommt. Ohne wirtschaftliches Wachstum müsste man auch nach Überwindung dieser Friktionen mit Lohn- und Beschäftigungsverlusten rechnen. Langfristig begünstigt jedoch der Anstieg der Arbeitsproduktivität ein Wirtschaftswachstum, das neue Arbeitsplätze schafft, bei denen sich der Produktivitätsschub schließlich auch in höheren Löhnen niederschlägt.
Solche Entwicklungen können mit einem klassischen makroökonomischen Modell beleuchtet werden, das die mittel- und langfristigen Folgen einer industriellen Revolution für den Arbeits- und Kapitalmarkt und für das wirtschaftliche Wachstum analysiert, auch nach dem Einsatz von Mikroelektronik und selbständig arbeitenden Maschinen (Robotern). Um die großen Zusammenhänge zu verdeutlichen, ist es zweckmäßig, bei einer solchen Analyse strukturelle Änderungen (nach Branchen und Berufsgruppen) zunächst auszublenden[5].

Makroökonomische Folgen einer industriellen Revolution

1. Jede industrielle Revolution beruht auf einem dramatischen Anstieg der Arbeitsproduktivität, einem arbeitssparenden technischen Fortschritt, der es erlaubt, das gleiche Sozialprodukt mit signifikant weniger Arbeit herzustellen. In einem makroökonomischen Standardmodell wird dieser Zusammenhang durch eine Produktionsfunktion $Y=F(K,NT)$ ausgedrückt, in der Y das Sozialprodukt, K und N den Einsatz von Kapital bzw. Arbeit und T den jeweiligen Stand der Technologie bezeichnen. Das Sozialprodukt steigt (mit abnehmender Rate) mit K und NT, und bei gegebenem

[5] In der zitierten Studie von Wolter u.a. (2015) wird ein disaggregiertes makroökonomisches Modell verwendet, in dem der Arbeitsmarkt nach Branchen, Berufen und Qualifikationen gegliedert ist.

Einsatz von K und N mit arbeitssparendem technischem Fortschritt, der T erhöht. Während sich ein solcher Fortschritt im Allgemeinen langsam und gedämpft vollzieht, kommt es von Zeit zu Zeit zu dramatischen Veränderungen, bei denen die Produktivität der Arbeit sprunghaft zunimmt. Im Folgenden wird eine solche Revolution durch einen einmaligen Anstieg des angegebenen Parameters von $T=1$ auf $T>1$ ausgedrückt.

Die Folgen einer solchen Revolution hängen von Eigenschaften der Produktionsfunktion ab. Dazu gehören konstante Skalenerträge, bei denen $Y = (\partial Y/\partial N)N + (\partial Y/\partial K)K$ ist, mit $\partial Y/\partial N$ als Grenzproduktivität der Arbeit und $\partial Y/\partial K$ als Grenzproduktivität des Kapitals. Die Produktionsfunktion kann dann durch $Y=f(NT/K)K$, und mit $x:=NT/K$ durch $Y=f(x)K$ ausgedrückt werden. Im relevanten Bereich von x ist $f'(x)>0$ und $f''(x)<0$. Bei Wettbewerbsbedingungen wird sowohl Arbeit als auch Kapital nach der jeweiligen Grenzproduktivität entlohnt, Arbeit mit dem Lohnsatz w und Kapital mit dem Zinssatz r, wobei $dY/dK = f(x)-xf'(x)$ unbd $dY/dN = Tf'(x)$ ist. Zulässige Werte von x unterliegen dabei der Bedingung, dass die beiden Grenzproduktivitäten nicht negativ sind. Dies definiert einerseits einen Mindestwert $x_A \leq x$, bei dem $f(x_A)-x_A f'(x_A) = 0$ bzw. $f'(x_A)=f(x_A)/x_A$ ist, andererseits einen Höchstwert x_B mit $f'(x_B)=0$. Wegen der Konstanz der Skalenerträge folgt $Y=wN+rK$, d.h. das Sozialprodukt wird ganz auf die Produktionsfaktoren Arbeit und Kapital verteilt. Der Anteil der Arbeitseinkommen am Sozialprodukt ist $wN/Y=\eta$, mit $\eta:=xf'(x)/f(x)$ als Produktionselastizität der Arbeit, die zwischen Null und Eins liegt.

Wie zu erwarten schlägt sich ein hoher Wert von T bei einer gegebenen Ausstattung von Kapital und Arbeit in einem höheren Sozialprodukt und Zinssatz nieder[6]. Dagegen ist die Wirkung auf den Arbeitslohn zunächst im Allgemeinen ambivalent. Das zeigt sich schon, wenn man in der Produktionsfunktion $L=NT$ setzt, so dass $w=\partial Y/\partial N=T\partial F/\partial L$ ist. Daran erkennt man, dass eine Erhöhung von T zwei entgegengesetzte Einflüsse auf den Lohn ausübt. Einerseits steigt dieser proportional mit T, andererseits sinkt $\partial F/\partial L$ aufgrund abnehmender Erträge von L. Welcher Effekt sich durchsetzt, hängt von Eigenschaften der Produktionsfunktion ab. Setzt man in der Lohngleichung $T=xK/N$, dann ist $w=xf'(x)K/N$. Dabei ist $\varepsilon:=xf''(x)/f'(x)<0$ die Elastizität der Grenzproduktivität der Arbeit. Durch den Übergang von $T=1$ auf $T>1$ steigt x. Als Folge davon ändert sich der Lohn gemäß

$$(x/w)dw/dx = 1+\varepsilon.$$

Dabei ist $\varepsilon:=xf''(x)/f'(x)<0$ die Elastizität der Grenzproduktivität der Arbeit, und ihr Kehrwert, $1/\varepsilon$, die Elastizität der Arbeitsnachfrage in Bezug auf den Lohnsatz. Empirische Befunde legen nahe, dass letztere, absolut genommen, kleiner ist als eins, d.h. dass die

[6] Aus $Y=f(x)K$ folgt $dY/dx= f'(x)>0$. Aus $r=f(x)-xf'(x)$ folgt $dr/dx >0$ wegen $f''<0$.

Arbeitsnachfrage mehr oder weniger unelastisch auf Lohnänderungen reagiert. Entsprechend ist dann $(-\varepsilon)>1$, so dass der Lohn mit steigendem x fällt. Eine industrielle Revolution zieht dann trotz höherer Arbeitsproduktivität zumindest kurz- bis mittelfristig Lohnsenkungen nach sich.

Der Anteil der Arbeitseinkommen am Sozialprodukt ändert sich mit x gemäß

$$d\eta/dx = (\eta/x)\,(1-\eta+\varepsilon).$$

Wenn, wie eben schon unterstellt, $(-\varepsilon)>1$ ist, dann ist $d\eta/dx$ negativ, so dass der Lohnanteil sinkt, wenn x durch arbeitssparenden technischen Fortschritt steigt.

Damit bestätigt eine makroökonomische Analyse die historischen Erfahrungen, dass eine industrielle Revolution trotz höherer Arbeitsproduktivität zumindest kurz- bis mittelfristig die Position der Arbeitnehmer schwächt.

> **Bei gegebener Faktorausstattung (konstanter gesamtwirtschaftlicher Kapitalintensität) kommt der Produktivitätsfortschritt in Form einer höheren Verzinsung ausschließlich den Kapitaleignern zugute. Der Arbeitslohn sinkt, so dass bei einem Mindestlohn auch Arbeitslosigkeit droht.**

2. Langfristig können diese Verluste wettgemacht werden, weil der Anstieg der Produktivität auch das wirtschaftliche Wachstum fördert. Schon bei gegebenem Kapitalstock steigt das Sozialprodukt $Y=f(x)K$, weil mit steigendem x die Kapitalproduktivität $Y/K=f(x)$ zunimmt. Dadurch werden höhere Ersparnisse möglich, die sich in Investitionen und damit einem höheren Kapitalstock niederschlagen. Bei einer Sparquote s und einer Abschreibungsrate δ ist seine Wachstumsrate

$$g=\Delta K/K=s(Y/K)-\delta=sf(x)-\delta.$$

Bei gegebenem Technologieniveau T ist der Kapitalstock in einem langfristigen Gleichgewicht konstant bei einem Wert $x=x^*$, der sich aus $f(x^*)=\delta/s$ ergibt, und bei dem $\Delta K/K=0$ ist. Ist $x>x^*$, dann ist $g>0$, d.h. der Kapitalstock steigt.

Angenommen, die Wirtschaft befindet sich vor einer industriellen Revolution bei $T=1$ in einem stationären Gleichgewicht mit $x=x^*=N/K$ und dem Arbeitslohn $w=f'(x^*)$. Durch die industrielle Revolution steigt T und damit x über x^*, was zur Folge hat, dass der Kapitalstock wächst, so dass x wieder abnimmt, bis ein neuer Gleichgewichtswert x^* erreicht ist, bei dem nun

$$K/N = Tx^* \quad \text{und} \quad w=Tf'(x^*)$$

ist. Der Arbeitslohn liegt damit um den Faktor der Produktivitätssteigerung über dem Wert vor der industriellen Revolution. Wie zu erwarten, erweist sich eine industrielle Revolution langfristig auch für den Produktionsfaktor Arbeit als vorteilhaft.

> **Durch wirtschaftliches Wachstum schlägt sich die Produktivitätssteigerung langfristig voll in einem höheren Arbeitslohn nieder. Der Zinssatz ist wieder auf das Niveau vor der industriellen Revolution gefallen, allerdings nun bei einem höheren Kapitalstock.**

Verdrängung einer traditionellen Produktionsweise

1. Bei einer industriellen Revolution werden alte durch moderne Anlagen ersetzt. Das obige Modell illustriert diesen Vorgang mit der Vorstellung, dass Arbeit mit dem vorhandenen Kapitalstock gewissermaßen auf einen Schlag produktiver wird. Man kommt der Wirklichkeit einen Schritt näher, wenn man berücksichtigt, dass bei der Umstrukturierung alte Anlagen nicht schlagartig, sondern schrittweise produktiver werden, so dass zumindest in einer Übergangszeit traditionelle und produktivere Produktionsweisen im Wettbewerb nebeneinander existieren. Im Prinzip können beide gleichzeitig nebeneinander eingesetzt werden. In der traditionellen Produktionsweise ist das Technologieniveau $T_0=1$, der Kapitaleinsatz K_0, die Beschäftigung N_0, die Arbeitsintensität $x_0:=N_0/K_0$, und die Produktion Y_0. Die entsprechenden Variablen der modernen Produktionsweise sind $T_1=T>1$, K_1, N_1, $x_1:=N_1/K_1$ und Y_1. Die entsprechenden Produktionsfunktionen sind

$$Y_0 = f(x_0)K_0 \quad \text{und} \quad Y_1 = f(Tx_1)K_1.$$

Die vorhandenen Produktionsfaktoren N und K werden auf die beiden Produktionsweisen aufgeteilt:

$$N_0+N_1=N \quad \text{und} \quad K_0+K_1=K.$$

Bei einem gegebenen Kapitalstock erfolgt die Aufteilung des Kapitals dabei unter Wettbewerbsbedingungen so, dass bei jeder Produktionsweise die gleiche Kapitalverzinsung erzielt wird, dass also $r = f(Tx_1)-Tx_1f'(Tx_1) = f(x_0)-x_0f'(x_0)$ ist. Daraus folgt, dass im Gleichgewicht auf dem Kapitalmarkt $x_0= Tx_1$ ist. Die Arbeitsintensität der alten übersteigt die der neuen mit dem Faktor T. Bei einer gegebenen Aufteilung der Beschäftigten $\lambda:=N_0/N$ auf die beiden Produktionsweisen ergibt sich dann die jeweilige Höhe der Arbeitsintensität bei $x:=N/K$ aus

$$x_0 = [\lambda+T(1-\lambda)]x \quad \text{und} \quad x_1 = x_0/T.$$

Vor der industriellen Revolution sind alle in der traditionellen Produktionsweise beschäftigt, es ist $N_0=N$, bzw. $\lambda=1$, und $K_0=K$. Bei der Arbeitsintensität $x_0=x$ ist der Zinssatz $r=f(x)-xf'(x)$ und der Lohnsatz $w_0=f'(x)$. Durch die industrielle Revolution steigt in der modernen Produktionsweise der Lohn auf $w_1=Tf'(Tx_1)=Tf'(x_0)=Tw_0$. Dies ist ein Anreiz für Arbeitskräfte von der traditionellen in die moderne Produktionsweise zu wechseln. Mit dem Rückgang von N_0 bzw. λ steigt x_0, weil die moderne Produktionsweise trotz höherem Zinssatz auch Kapital von der traditionellen Produktionsweise abzieht. Der Arbeitslohn nimmt in beiden Produktionsweisen ab, und zwar umso mehr, je weiter die Umstrukturierung fortschreitet, je größer also die moderne auf Kosten der traditionellen Produktionsweise wird. Vor der Umstrukturierung ist $w_0=f'(x)$, danach $w_0=f'(Tx)<f'(x)$. Dabei liegt der Lohn in der modernen Produktionsweise nach erfolgtem Übergang sogar unter dem Lohn der traditionellen Produktionsweise vor der technologischen Revolution[7], d.h. es ist $Tf'(Tx)<f'(x)$.

> **Während einer mehr oder weniger langen Übergangszeit führt eine industrielle Revolution zu einer Verdrängung der traditionellen Produktionsweise mit sinkenden Arbeitslöhnen und bei einem Mindestlohn auch zu Arbeitslosigkeit. Gewinner dieses Prozesses sind allein die Kapitaleigner.**

2. Aber weil eine industrielle Revolution auch wirtschaftliches Wachstum schafft, kehren sich diese Ergebnisse langfristig wieder um. Das Sozialprodukt, das mit beiden Produktionsweisen entsteht, beträgt

$$Y = Y_1+Y_2 = f(x_0)K.$$

Bei einer Sparquote in Höhe von s und einer Abschreibungsrate in Höhe von δ ist die Wachstumsrate des Kapitalstocks

$$g = sf(x_0)-\delta.$$

Je höher die Arbeitsintensität x_0, umso höher die Wachstumsrate. Ein langfristiges stationäres Gleichgewicht ergibt sich bei $x_0=x_0^*$ mit $g=sf(x_0^*)-\delta=0$. Bei $x_0>x_0^*$ steigt die Wachstumsrate von K und $x=N/K$ sinkt.

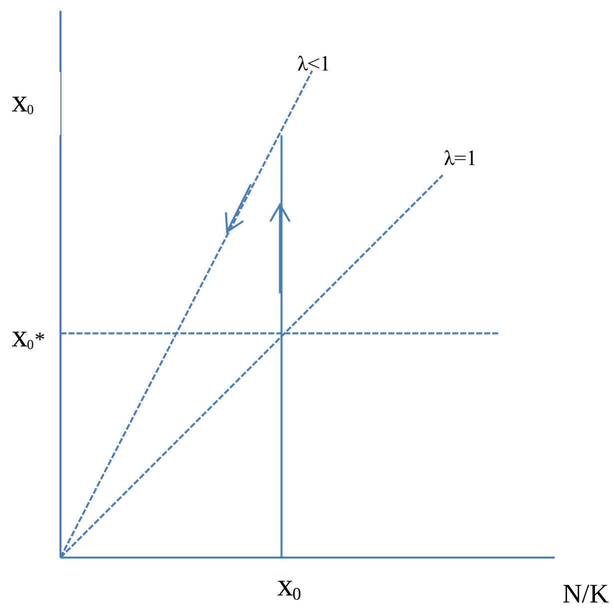
Die Folgen dieses Wachstumsprozesses können mit der Figur 1 llustriert werden. Sie zeigt den Zusammenhang zwischen x_0 und N/K, der durch die Gleichung

$$x_0 = [T-(T-1)\lambda]N/K$$

---

[7] Es ist $d\,Tf'(Tx)/dT=f'(1+\varepsilon)<0$ bei $-\varepsilon>1$.

beschrieben wird. Bei gegebenem $\lambda=N_0/N$ steigt die Arbeitsintensität x_0 der traditionellen Produktionsweise linear mit der gesamtwirtschaftlichen Arbeitsintensität $x=N/K$. Ein langfristiges Gleichgewicht liegt vor bei $x_0=x_0^*$. Vor der industriellen Revolution ist $x_0=x=x_0^*$ im Schnittpunkt von x_0^* mit der 45°-Linie. Als Folge der industriellen Revolution fällt λ, weil Arbeitskräfte wegen der höheren Löhne in die moderne Produktionsweise wechseln. In der Figur dreht sich die Gerade um den Nullpunkt nach oben. Entsprechend steigt bei gegebenem N/K die Arbeitsintensität x_0 und mit ihr der Kapitalzins, während gleichzeitig der Lohnsatz bei der traditionellen Arbeitsweise sinkt. Aber bei $x_0>x_0^*$ setzt der Wachstumsprozess ein, durch den N/K fällt. Bei gegebenem λ setzt sich dieser Prozess fort bis zu einem Wert von N/K, bei dem wieder ein langfristiges Gleichgewicht mit $x_0=x_0^*$ erreicht ist. Bei vollständiger Verdrängung, $\lambda=0$, wäre $x_0=TN/K$ bzw. $x_1=N/K$.



Figur 1

Im langfristigen Gleichgewicht ist der Lohn in der traditionellen Produktionsweise wieder auf den Wert vor der industriellen Revolution gestiegen, $w_0 = f\,'(x_0^*)$, in der modernen Produktionsweise ist er entsprechend $w_1=Tw_0$. Der Kapitalzins ist wieder auf das Niveau vor der industriellen Revolution gefallen, $r = f(x_0^*)-x_0^*f\,'(x_0^*)$, während der Lohnanteil wieder auf $wN/Y=x_0^*f\,'(x_0^*)/f(x_0^*)$ gestiegen ist.

Durch das wirtschaftliche Wachstum erreichen die Beschäftigten bei der traditionellen Produktionsweise wieder ihren ursprünglichen Lohn. Eindeutige

Gewinner der hohen Produktivität sind die Beschäftigten mit der modernen Produktionsweise. Die Kapitalgeber erzielen langfristig zwar nur den unveränderten Gleichgewichtszins, aber sie verfügen durch das Wachstum über mehr Kapital.

Eine voll automatische Ökonomie

Von den industriellen Revolutionen der vergangenen Jahrhunderte scheint sich die anlaufende Entwicklung einer Industrie 4.0 dadurch zu unterscheiden, dass sie menschliche Arbeit in der industriellen Produktion ebenso wie bei Dienstleistungen weitgehend durch lernende Maschinen und mobile Roboter mit künstlicher Intelligenz und Netzwerkkommunikation ersetzt. Im Extremfall könne man sich vorstellen, dass die moderne Produktionsweise gar keine Arbeitskräfte mehr beschäftigt, weil sie durchwegs automatisiert wäre. Dass eine solche Vorstellung vom Ende der Arbeit statt Erleichterung eher Existenzängste hervorruft, ist verständlich.

Mit einer Variante des obigen Modells kann man Eigenschaften einer voll automatisierten Ökonomie illustrieren. Wenn in der modernen Produktionsweise die gesamte Produktion automatisch ohne Einsatz von Arbeitskräften betrieben werden könnte, dann müsste die traditionelle Produktionsweise Arbeitsplätze für das gesamte Arbeitsangebot N zur Verfügung stellen, damit Vollbeschäftigung möglich wäre. Ihre Produktion wäre dann $Y_0=f(N/K_0)K_0$. Die Produktionsmöglichkeit der automatisierten Produktionsweise könnte man dann durch eine Produktionsfunktion $Y_1=f(nT/K_1)K_1$ beschreiben. Hierbei bezeichnet n die Zahl automatisierter Unternehmungen, von denen jede mit einem Kapitaleinsatz in Höhe von K_1/n eine Produktion in Höhe von Y_1/n erstellt[8]. Bei $nT>N$ ist die automatisierte Produktionsweise produktiver als die traditionelle, weil sie bei gleichem Kapitaleinsatz ($K_0=K_1$) eine höhere Produktion ermöglicht.

Bei einem einheitlichen Zinssatz folgt die Aufteilung des Kapitals auf die beiden Produktionsweisen aus $K_0/K_1=N/nT$. Der Kapitalanteil der traditionellen Produktionsweise wäre umso kleiner, je höher der durch nT/N beschriebene Produktivitätsvorsprung der automatisierten Produktionsweise wäre. Die Arbeitsintensität der traditionellen Produktionsweise beträgt

$$x_0 = (1+nT/N)N/K > N/K.$$

---

[8] Es liegen also konstante Skalenerträge in K und n vor.

Dann müsste auch der Arbeitslohn $w = f\,'(x_0)$ entsprechend niedrig sein, damit die traditionelle Produktionsweise überhaupt konkurrenzfähig wäre. In der automatisierten Produktionsweise, in der keine Löhne anfallen, ergäbe sich ein Gewinn in Höhe von $\pi=Y_1-rK_1=x_0f\,'(x_0)K_1 = wnT>wN$. Der Gewinn liegt über der Lohnsumme, die in der traditionellen Produktionsweise noch erwirtschaftet wird.
Aber bei Wettbewerb um die Gewinne der automatisierten Produktionsweise durch Konkurrenz um das vorhandene Kapital wäre die Folge für den Arbeitsmarkt noch dramatischer. Bei positiven Gewinnen würde die Zahl n konkurrierender Unternehmungen zunehmen. Die Folge wäre, dass immer mehr Kapital aus der traditionellen Produktionsweise abgezogen wird, so dass die Arbeitsintensität $x_0=N/K_0$ und mit ihr der Kapitalzins steigt, während der Lohnsatz $w=f\,'(x_0)$ fällt. Bei der unterstellten Produktionsfunktion gäbe es schließlich so viele Unternehmungen, dass die Grenzproduktivität $f\,'(x_0)$ gegen Null ginge, und mit ihr der Gewinn der automatisierten Produktionsweise, so dass dort der gesamte Ertrag dem Kapital zufiele. Gleichzeitig könnte die traditionelle Produktionsweise wegen des hohen Kapitalzinses keine Löhne mehr bezahlen, wäre also nicht mehr konkurrenzfähig. Die moderne Produktionsweise hätte das ganze Kapital an sich gezogen. Sie würde damit das Sozialprodukt $Y=f(nT/K)K$ produzieren, in dem sich der Kapitaleinsatz einer Unternehmung aus $f\,'(nT/K)=0$ ergibt. Da $x=nT/K$ dabei entsprechend hoch ist, kann man eine positive Wachstumsrate $g=sf(x)-\delta$ erwarten, so dass der Kapitalstock (und mit ihm die Zahl der Firmen) laufend mit dieser Rate steigen würde.

> **In einer voll automatischen Ökonomie wäre die traditionelle Produktionsweise auch bei einem noch so niedrigen Lohn nicht mehr konkurrenzfähig. Es gäbe keine entsprechenden Beschäftigungsmöglichkeiten, die automatisierte Produktionsweise hätte das ganze Kapital, das laufend wächst, an sich gezogen. Die Produktion fände nur noch dort statt, die Erträge würden ausschließlich den Kapitaleigentümern zufließen.**

Es ist klar, dass eine Ökonomie ohne Beschäftigungsmöglichkeiten, in der alle Erträge ausschließlich den Kapitaleigentümern zufließen, höchstens tolerierbar wäre, wenn es eine Umverteilung zugunsten der Mehrheit gäbe, die nicht mehr von Arbeit leben kann, aber über kein oder zu wenig Kapital verfügt. In jüngster Zeit ist zur Lösung solch drohender Problem auch von prominenten Vertretern der Wirtschaft immer wieder ein Grundeinkommen vorgeschlagen worden, das jedem bedingungslos zusteht. Um es zu finanzieren, müssten in einer voll automatisierten Ökonomie die Kapitaleinkommen entsprechend besteuert werden. Nun ist ein bedingungsloses Grundeinkommen sicher eine gute Idee für eine Ökonomie mit einem funktionierenden Arbeitsmarkt, weil sie dort die Position der Arbeitsanbieter stärkt, und weil sie diejenigen absichert, die ganz oder vorübergehend keine Beschäftigung finden. Aber als öffentliche Alimentierung einer erwerbslosen Mehrheit der Bevölkerung erscheint sie nicht besonders attraktiv. Die Alternative wäre eine Umverteilung des Kapitals, die jedem Chancen für ein ausreichendes Einkommen gäbe, allerdings auch mit üblichen Anlagerisiken (die dann aber vielleicht von "Robo-Beratern" gemanagt werden könnten).

Eine Roboterökonomie (Industrie 4.0)

Das obige Modell beruht auf der Vorstellung, dass sich eine industrielle Revolution in Anlagen mit einem höheren Automatisierungsgrad niederschlägt, so dass weniger und bei voller Automatisierung gar keine Arbeitskräfte benötigt werden. Der effiziente Arbeitseinsatz ist NT, wobei $T=1$ die Arbeit an traditionellen und $T>1$ die an automatisierten Anlagen beschreibt. Unter Industrie 4.0 versteht man auch, dass Arbeitskräfte direkt durch Roboter ersetzt bzw. ergänzt werden können. Ein entsprechendes Modell ist von Steigum (2011) vorgeschlagen und von Prettner (2018) aufgegriffen worden. Danach wird das vorhandene Kapital K in Höhe von A in Anlagen und Maschinen, und in Höhe von R in Roboter investiert, die menschliche Arbeit im Verhältnis Eins zu Eins ersetzen. Der effektive Arbeitseinsatz beträgt dann $N+R$, und eine entsprechende Produktionsfunktion ist $Y = F(A, N+R)$ mit $A+R=K$. Bei konstanten Skalenerträgen kann sie als $Y = f(x)A$ geschrieben werden, wobei $x:=(N+R)/A$ ist.

Bei einer optimalen Aufteilung des Kapitals auf Anlagen und Roboter ist die Grenzproduktivität von Robotern, $\partial Y/\partial R=f'(x)$, gleich hoch wie die von Anlagen, $\partial Y/\partial A=f(x)-xf'(x)$. Das ist offensichtlich der Fall bei einem festen Wert $x=c$, der sich aus der Gleichung

$$f'(c) = f(c)-cf'(c) \qquad \text{bzw.} \qquad f(c) =(1+c)f'(c)$$

ermitteln lässt. Bei der unterstellten Produktionsfunktion ist garantiert, dass ein solcher Wert existiert[9].

[9] Bei der unterstellten Produktionsfunktion ist die Funktion $\varphi(x)=f(x)-xf'(x)$ definiert im Intervall $x_A \le x \le x$ mit x_A aus $f(x_A)/x_A- f'(x_A)=0$ und x_B aus $f'(x_B)=0$. Damit ist $\varphi(x_A)=f'(x_A)>0$ und $\varphi(x_B)=-f(x_B)<0$. Mit $\varphi'(x)=(1+x)f''(x)<0$ erkennt man, dass $\varphi(x)$ monoton von $\varphi(x_A)>0$ bis $\varphi(x_B)<0$ fällt, so dass es einen und nur einen Wert mit $\varphi(x)=0$ gibt.

Bei $(N+R)/A=c$ und $A+R=K$ folgt daraus für die Aufteilung des Kapitals

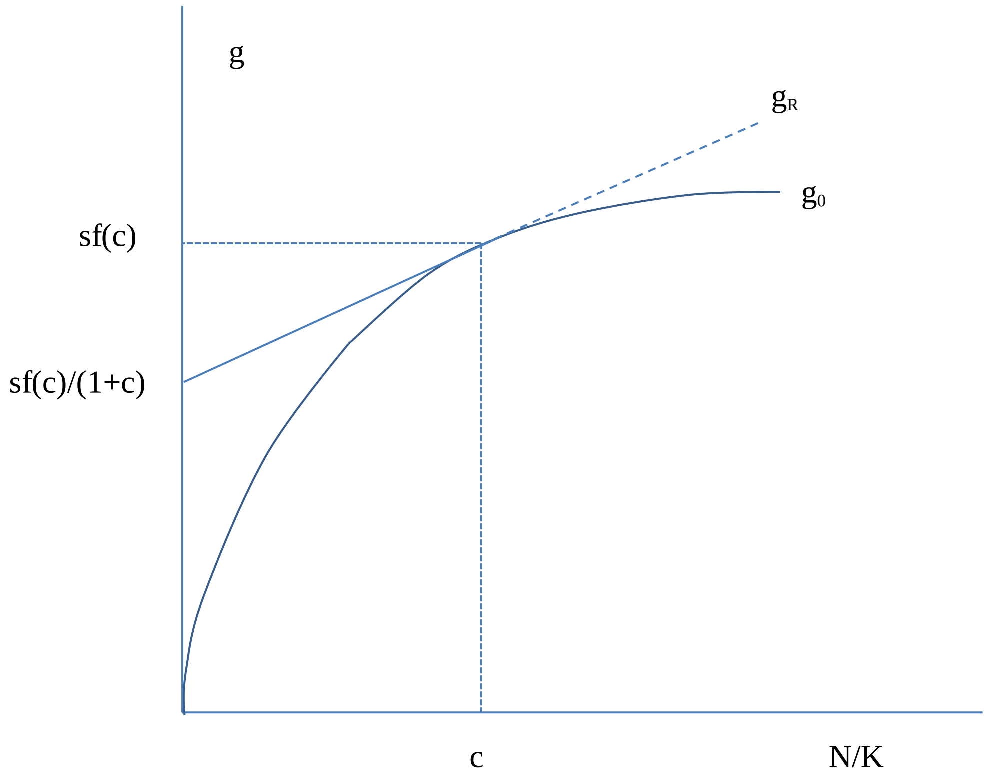
$$A = (K+N)/(1+c) \quad \text{und} \quad R = (cK-N)/(1+c).$$

Daran zeigt sich, dass in Roboter dann und nur dann investiert wird, wenn bei der gegebenen Faktorausstattung $N/K<c$ ist. Bei $N/K\geq c$ werden keine Roboter eingesetzt, weil in diesem Bereich die Grenzproduktivität von Anlagen höher ist[10]. Das Sozialprodukt wird hier durch eine übliche Produktionsfunktion $Y=f(N/K)K$ bestimmt. Mit Robotern ist die Produktionsfunktion hingegen $Y=f(c)A=(K+N)f(c)/(1+c)$.

Mit diesen Angaben kann man beschreiben, wie die Einführung von Robotern den Wachstumsprozess verändert. Der Einfachheit halber wird dabei wieder ein konstantes Arbeitsangebot N unterstellt. Der Kapitalstock wächst mit Ersparnissen, die bei einer konstanten Sparquote s in Höhe von sY anfallen, und er fällt mit der Abschreibungsrate δ. Die Wachstumsrate des Kapitalstocks ist $\Delta K/K=g-\delta$ mit $g= sY/K$. Für die beiden Bereiche erhält man damit folgende Wachstumsraten:

$$g_0 = sf(N/K) \qquad \text{bei} \qquad N/K\geq c,$$

$$g_R = s(1+N/K)f(c)/(1+c) \qquad \text{bei} \qquad 0\leq N/K<c.$$



Figur 2

[10] Formal hat man hier wegen der Bedingung $R\geq 0$ eine Randlösung $R=0$.

In Figur 2 sind diese beiden Wachstumsraten in Abhängigkeit von N/K eingezeichnet. Die Gerade g_R, die im Intervall $N/K<c$ relevant ist, liegt über der Kurve g_0, die sie im Punkt $N/K=c$ tangiert[11]. In diesem Intervall wird also durch den Einsatz von Robotern eine höhere Wachstumsrate erreicht. Das liegt daran, dass hier bei $R=0$ die Grenzproduktivität eines Roboters höher ist als die einer zusätzlichen Anlage, so dass mit seinem Einsatz das Sozialprodukt steigt, aus dem gespart wird.

Entscheidend ist, dass Roboter die Begrenztheit des Faktors Arbeit überwinden. Sie bleiben unrentabel, solange relativ viel menschliche Arbeit vorhanden ist, wie im Bereich $N/K>c$, in dem infolgedessen ein klassischer Wachstumsprozess ohne sie abläuft. Im Akkumulationsprozess wird aber Arbeit immer knapper, N/K fällt und damit auch die Produktivität des Kapitals und mit ihr das Wachstum. Bei einer Arbeitsintensität, die sich aus $g_0-\delta=sf(N/K)-\delta=0$ ergibt, würde die Entwicklung in einen stationären Zustand münden. Wäre $sf(c)<\delta$, dann läge dieser Zustand bei $N/K>c$, so dass Roboter unwirtschaftlich blieben. Bei $\delta<sf(c)$ führt die Kapitalakkumulation jedoch in den Bereich $N/K<c$, in dem die optimale Aufteilung des Kapitals zu positiven Werten von R führt, Roboter also rentabel werden. Dann spielt sich der Wachstumsprozess im Intervall $0\leq N/K<c$ ab. In diesem Intervall liegt die Wachstumsrate wegen der optimalen Allokation von Kapital über jener, die sich ohne Roboter ergäbe, d.h. es ist $g_R>g_0$. Der Einsatz von Robotern dämpft den Rückgang der Wachstumsrate, die im traditionellen Fall bei weiterer Kapitalakkumulation zu erwarten wäre. Bei $[sf(c)/(1+c)]<\delta$ führt auch hier der Wachstumsprozess in einen stationären Zustand bei $g_R=\delta$, aber die Figur zeigt, dass dabei die Arbeitsintensität niedriger ist als beim klassischen Wachstumsprozess mit $g_0=\delta$, weil mehr Kapital akkumuliert worden ist. Besonders interessant ist der Fall, in dem $\delta<[sf(c)/(1+c)]$ ist. Hier bleibt die Wachstumsrate $g_R-\delta$ selbst dann positiv, wenn sich die Arbeitsintensität N/K durch fortlaufende Akkumulation der null nähert. Der Einsatz von Robotern, der dabei auf $cK/(1+c)$ steigt, verhindert eine säkulare Stagnation, die im klassischen Fall ohne weiteren technischen Fortschritt zu erwarten wäre. Bemerkenswert ist, dass Roboter Arbeitsplätze dabei nicht verdrängen, sondern ergänzen. Aber während der Lohnsatz bei der traditionellen Produktionsweise steigt, weil mit fallendem N/K die Grenzproduktivität der Arbeit $f'(N/K)$ zunimmt, bleibt er in der Roboterökonomie konstant bei der Grenzproduktivität $f'(c)$. In welchem Ausmaß darüber hinaus die ökonomische Bedeutung traditioneller Arbeit abnimmt, zeigt sich, wenn man wieder zwei Produktionsweisen unterscheidet, ein Produktionsweise 0, in dem Arbeitsanbieter eine

[11] In diesem Punkt ist $sf(c)/(1+c)$ die Steigung von g_R und $sf'(c)$ die Steigung von g_0. Mit der Optimalitätsbedingung zeigt sich, dass beide Werte gleich sind.

Beschäftigung finden, und eine Produktionsweise 1, bei der nur Roboter produzieren. Die entsprechenden Produktionsfunktionen sind $Y_0=f(N/K_0)K_0$ und $Y_1=f(R/K_1)K_1$, mit $K_0+K_1+R=K$. Durch die Konkurrenz um Kapital ist $N/K_0=R/K_1=c$. Damit ist $Y_0/Y_1=N/R$, d.h. mit wachsendem Einsatz von Robotern fällt der Anteil, den menschliche Arbeit zum Sozialprodukt beiträgt.

> **In einer Ökonomie mit knappem Arbeitsangebot ist es rentabel, menschliche Arbeit durch Roboter zu ergänzen, die ein höheres Wachstum ohne Stagnation ermöglichen. Erwerbsarbeit würde dann allerdings ohne Teilnahme am Wachstum auf eine Art Subsistenzwirtschaft zurückfallen.**

3. Alternative Beschäftigungsfelder

1. Mit den Modellen einer Automaten-oder Roboterökonomie wird verdeutlicht, wohin sich im Extremfall eine Wirtschaft entwickeln könnte, in der menschliche Arbeit zunehmend durch lernende Maschinen und mobile Roboter mit künstlicher Intelligenz ersetzt oder abgewertet wird. Die meisten Experten halten das Bild einer solchen Ökonomie aber eher noch für science fiction, weil mit dem Siegeszug selbständig arbeitender Maschine auch neue Beschäftigungsfelder entstehen. Bei der Frage nach den Auswirkungen der laufenden industriellen Revolution sollte man auch diese Möglichkeiten mit in Betracht ziehen.
Die folgenden Überlegungen dazu knüpfen wieder an das Modell einer industriellen Revolution durch zunehmende Automatisierung an. In dieser Sichtweise wird die vorherrschende traditionelle zunehmend von einer automatisierten Produktionsweise abgelöst, die höhere Löhne zahlen kann. Als Folge davon wandern Arbeitskräfte von der traditionellen zur modernen Produktionsweise. Dadurch sinkt das allgemeine Lohnniveau, während der Kapitalzins steigt. Die Entwicklung begünstigt aber auch ein stärkeres Wachstum. Im neuen Gleichgewicht sind Lohnsatz und Zinssatz wieder auf ihrem Ausgangsniveau, aber der Kapitalstock ist gewachsen. Eine solche industrielle Revolution hätte also den Beschäftigten kurz- und mittelfristig nur Verluste und langfristig keinen Gewinn gebracht. Dies wäre erst recht der Fall, wenn in einer voll automatisierten Ökonomie alle Arbeitsplätze wegfallen würden.
Dieses Bild relativiert sich, wenn man mögliche Beschäftigungsfelder genauer betrachtet. Zunächst einmal kommt auch der automatisierte industrielle Bereich nicht ohne Arbeitskräfte

aus. Er benötigt Experten zur Organisation, Überwachung, Kontrolle etc. von komplexen Systemen, weil sich nach bisherigen Erkenntnissen nicht alle diese Aufgaben kostengünstig programmieren lassen. Erforderlich sind vor allem IT- und Wartungsspezialisten mit hoher kognitiver Kompetenz. Die Anzahl solcher Experten, die die moderne Produktionsweise an sich ziehen kann, hängt von den Qualifikationskosten und damit insbesondere auch von individuellen Fähigkeiten ab. Im Gleichgewicht wird N_1 durch den Anbieter bestimmt, der seine individuellen Kosten eben noch durch die Lohndifferenz w_1-w_0 decken kann. Die oben erklärte Gleichung

$$x_0 = [T-\lambda(T-1]N/K$$

zeigt, dass die Arbeitsintensität x_0 kurz- bis mittelfristig mit dem Anteil (1-λ) von Experten steigt, den die moderne von der traditionellen Produktionsweise abzieht, weil mit diesem Abzug auch überproportional Kapital verloren geht. Die Folge ist ein Lohnrückgang, der allerdings langfristig wieder ausgeglichen wird, weil Arbeitsintensität und Lohnsatz durch wirtschaftliches Wachstum wieder auf ihre Gleichgewichtswerte steigen. In der modernen Produktionsweise wären alle Arbeitskräfte mit den entsprechenden, vor allem kognitiven Kompetenzen, in der traditionellen Produktionsweise könnten alle beschäftigt bleiben, für die eine Qualifikation zu teuer oder unmöglich wäre.

Durch den weitreichenden Einsatz von Automaten und Robotern gewinnt aber auch ein weiteres Beschäftigungsfeld an Bedeutung. Mit dem Einsatz dieser Technologien entsteht eine zunehmende "Verdinglichung" des Gütertausches, bei dem persönliche Beziehungen keine Rolle mehr spielen. Die Erfahrung zeigt aber, dass in einer ganzen Reihe von Dienstleistungen solche Beziehungen durchaus geschätzt werden. Vor allem im Bildungs-, Pflege- und Gesundheitswesen präferieren Nachfrager anstelle von oder auch in Verbindung mit Automaten und Robotern menschliche Anbieter, von denen sie sich auf gleiche Weise akzeptiert und verstanden fühlen, wie sie auch selbst akzeptieren und verstehen können. Aufgrund dieser Präferenzen werden solche Dienstleistungen auch in einer Roboter-Ökonomie nicht verschwinden. Es ist vielmehr zu erwarten, dass als Folge zunehmender Automatisierung mehr Anbieter mit entsprechenden sozialen und emotionalen Kompetenzen, mit der Fähigkeit zu Empathie und Einfühlungsvermögen benötigt und ausgebildet werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass Probanden auch schon mit physischen Gütern emotional enger verbunden sind als mit digitalen Gegenständen, und dass sie auch bereit sind, für analoge Güter mehr zu bezahlen als für digital verfügbare Güter, die ansonsten den gleichen Nutzen stiften[12]. Dies dürfte dann erst recht für persönliche Dienstleistungen gelten.

2. Im Rahmen des Makromodells kann man dies durch einen Bereich 2 für persönliche Dienstleistungen darstellen, der die Beschäftigungsmöglichkeiten ergänzt[13].Hier bieten N_2 Beschäftigte je eine persönliche Dienstleistung an. Wenn sie dabei ohne Kapital auskommen, verteilen sich die Produktionsfaktoren auf die drei Bereiche folgendermaßen:

$$K_0+K_1=K \qquad \text{und} \qquad N_0+N_1+N_2=N.$$

Der jeweilige Anteil eines Bereichs an der Gesamtzahl der Beschäftigten wird im Folgenden mit λ_0, λ_1 und λ_2 bezeichnet. Mit $x_0=N_0/K_0=TN_1/K_1$ ergibt sich die Arbeitsintensität

$$x_0 = [1+(T-1)\lambda_1-\lambda_2]/(K/N).$$

Im Folgenden wird angenommen, dass λ_1 den Anteil der Beschäftigten angibt, die für eine Beschäftigung mit der modernen industriellen Produktionsweise qualifiziert sind, und dass dieser Anteil konstant ist. Er verhindert die Abwanderung vom traditionellen in den modernen Bereich, aber dafür gibt es die Möglichkeit in den Dienstleistungsbereich zu wechseln. Dann zeigt sich, dass die Arbeitsintensität x_0 (bei gegebenem K/N) mit steigendem Anteil λ_2 abnimmt[14]. Dadurch steigt der Lohnsatz $w_0=f'(x_0)$, d.h. die Lage der Beschäftigten verbessert sich. Die traditionelle Produktionsweise bleibt rentabel, obwohl der Lohn höher ist und gleichzeitig Kapital an den modernen Sektor abfließt ($x_1=N_1/K_1$ sinkt mit x_0, weil K_1 steigt), weil der Zinssatz sinkt. Der höhere Lohn kommt auch den Dienstleistern zugute, wenn sie bei Wettbewerb den gleichen Lohn erhalten wie die Arbeitskräfte bei der traditionellen Produktionsweise. Wie hoch der Lohn ist, hängt dabei nicht zuletzt auch davon ab, wie stark die Nachfrage nach Dienstleistungen von der Lohnhöhe beeinflusst wird[15].
Durch die Umstrukturierung steigt außerdem die Wachstumsrate des Kapitalstocks, so dass im langfristigen Gleichgewicht mehr Kapital vorhanden sein wird als zu Beginn der industriellen Revolution, so dass der Lohnsatz zusätzlich steigt. Unter Einbeziehung der

---

[12] Die Sozialwissenschaftler Atasoy und Morewedge (2017) sprechen dabei von psychologischem Besitztum". Probanden waren z.B. bereit, mehr Geld für Informationen auszugeben, wenn diese analog statt digital geboten wurden.

[13] Dies ist als Ergänzung eines schon bestehenden Dienstleistungssektors zu verstehen, der nicht in das Modell integriert worden ist.

[14] Die Nachfrage nach Dienstleistungen zieht Beschäftigte ohne Kapital aus der traditionellen Produktionsweise ab. Letztere verliert aber Kapital an die moderne Produktionsweise. Wegen $x_0=TN_1/K_1=\lambda_1TN/K_1$ steigt nämlich bei fallendem x_0 der Kapitaleinsatz K_1. Dies zeigt, dass in der traditionellen Produktionsweise die Zahl der Beschäftigten stärker sinkt als der Kapitaleinsatz.

[15] Im Gleichgewicht hängt w_0 einerseits ab von x_0 und damit von λ_2, andererseits λ_2 auch von w_0.

Dienstleistungen ist das Sozialprodukt $SP:=Y_1+Y_2+w_0N_2$. Aus der eben angegebenen Gleichung für x_0 folgt $N_2=N+(T-1)N_1-x_0K$. Damit ergibt sich

$$SP = Y_1+Y_2+w_0N_2 = f(x_0)K + f'(x_0)[N+(T-1)N_1-x_0K].$$

Wegen $d(SP)/dx_0=f''(x_0)<0$ steigt das Sozialprodukt mit sinkender Arbeitsintensität. Zwar gewinnt der Dienstleistungsbereich Arbeitskräfte nur auf Kosten von Beschäftigten in der traditionellen industriellen Produktionsweise, aber da gleichzeitig der Lohn steigt, nimmt das Gesamteinkommen zu. Dies hat zur Folge, dass bei gegebener Sparquote die Wachstumsrate des Kapitalstocks $g=s(SP/K)-\delta$ höher ist als ohne die Dienstleistungen. Mit wachsendem K sinkt allerdings SP/K und damit die Wachstumsrate. Im langfristigen Gleichgewicht ist ein höherer Kapitalstock aufgebaut, bei dem auch der Lohnsatz höher ist. Auf diese Weise könnte die industrielle Revolution durch der Ausbau eines entsprechenden Dienstleistungsbereichs auch für die Beschäftigten sowohl kurz- bis mittelfristig als auch langfristig von Vorteil sein.

Wenn Beschäftigte in einen Dienstleistungsbereich abwandern können, kann die traditionelle Produktionsweise mit weniger Arbeitskräften wettbewerbsfähig bleiben, obwohl durch die Umstrukturierung der Lohnsatz steigt. Höhere Lohneinkommen begünstigen das Wachstum des Kapitalstocks und damit des Sozialprodukts.

Literatur

Atasoy, O., Morewedge, C. K., Digital goods are valued less than physical goods, Journal of Consumer Research, Oct. 2017.

Bonin, H., Gregory, T., Zierhan, U. Übertragung von Frey/Osborne (2013) auf Deutschland; Endbericht Kurzexpertise Nr. 57, 2015, Mannheim: Bundesministerium für Arbeit und Soziales.

Bowles, J., The Computerisation of European Jobs – who will win and who will lose from the impact of new technology onto old areas of employment, http://www. bruegel.org//2014/07/the-computerization-of-European-jobs.

Brynjolfsson, E. und McAfee, A., The Second Machine Age. Work, Progress and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies, W.W. Norton, London, New York, 2014

Frey, C.B. und Osborne, M.A., The Future of Employment: How susceptible are jobs to computerization, Technological Forecasting and Social Change, vol. 114, issue C, 2017, 254-280.

Geiger, N., Prettner, K., Schwarzer, J. A.. Die Auswirkungen der Automatisierung auf Wachstum, Beschäftigung und Ungleichheit, Perspektiven der Wirtschaftspolitik, 19(2), 2018, 59-77.

Möller, J., Verheißung oder Bedrohung? Die Arbeitsmarktwirkungen einer vierten industriellen Revolution. In: G. Bäcker, S. Lehndorff & C. Weinkopf (Hrsg.), Den Arbeitsmarkt verstehen, um ihn zu gestalten. Festschrift für Gerhard Bosch, Wiesbaden: Springer VS, 2016, 49-59.

Prettner, K., A Note on the Implications of Automation for Economic Growth and the Labor Share, Macroeconomic Dynamics, 2018, im Erscheinen.

Steigum, E., Robotics and Growth, in: O. de la Grandville (Hrsg.) Frontiers of Economics and Globalization: Economic Growth and Development. West Yorkshire, Emerald Group, 2011, 543-557.

Weber E., Industrie 4.0: Wirkungen auf den Arbeitsmarkt und politische Herausforderungen, Zeitschrift für Wirtschaftspolitik, 2016, 65, 1, 66-74

Vogler-Ludwig, K., Düll, N., Kriechel, B., Arbeitsmarkt 2030 – Wirtschaft und Arbeitsmarkt im digitalen Zeitalter Prognose 2016. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales, unter Mitarbeit von T. Vetter. München, 2016.

Wolter, M.I., Mönnig, A., Hummel, M., Schneemann, Ch., Weber, E., Zika, G., Helmrich, R., Maier, T., Neuber-Pohl, C., Industrie 4.0 und die Folgen für Arbeitsmarkt und Wirtschaft. Szenario-Rechnungen im Rahmen der BIBB-IAB- Qualifikations- und Berufsfeldprojektionen, IAB Forschungsbericht 8/2015