

Projektbericht
Research Report

Wettbewerbsfähigkeit und Digitalisierung

Benjamin Bittschi und Richard Sellner
Wissenschaftliche Assistenz: Marliese Wolf



INSTITUT FÜR HÖHERE STUDIEN
INSTITUTE FOR ADVANCED STUDIES
Vienna

Wettbewerbsfähigkeit und Digitalisierung

Benjamin Bittschi und Richard Sellner
Wissenschaftliche Assistenz: Marliese Wolf

Endbericht

Studie im Auftrag der Industriellenvereinigung

August 2018

Institut für Höhere Studien (IHS), Wien

Institute for Advanced Studies, Vienna

Kontakt:

Richard Sellner

☎: +43/1/599 91-261

email: sellner@ihs.ac.at

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Tabellenverzeichnis | II |
| Abbildungsverzeichnis | II |
| Zusammenfassung | III |
| 1 Motivation und Inhalt..... | 5 |
| 2 Wettbewerbsfähigkeit, Lohnstückkosten und Digitalisierung..... | 6 |
| 3 Methode..... | 11 |
| 4 Daten | 21 |
| 5 Ergebnisse | 25 |
| 6 Synthese und Schlussfolgerungen | 33 |
| Literaturverzeichnis | 36 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| <i>Tabelle 1: Verwendete Wirtschaftsbranchen EU KLEMS 1970-2007 Stichprobe</i> | <i>23</i> |
| <i>Tabelle 2: Verwendete Wirtschaftsbranchen EU KLEMS 1995-2015 Stichprobe</i> | <i>24</i> |
| <i>Tabelle 3: Langfristige Effekte 1993-2007</i> | <i>26</i> |
| <i>Tabelle 4: Langfristige Effekte 2008-2015</i> | <i>28</i> |
| <i>Tabelle 5: Langfristige Effekte 2008-2015, detaillierter IKT-Kapitalstock und Wirtschaftsbrancheneffekte...</i> | <i>30</i> |
| <i>Tabelle 6: Kurzfristige Ergebnisse 1995-2015, Warenherstellung</i> | <i>32</i> |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| <i>Abbildung 1: Wachstum der Roboterdichte vs. Perzentil des Wachstums der Roboterdichte, 1993-2007</i> | <i>14</i> |
| <i>Abbildung 2: $\Delta \ln(KH)$ vs. $\Delta \ln(KL)$, 1995-2015</i> | <i>16</i> |
| <i>Abbildung 3: Ersetzbare Arbeitsstunden vs. Perzentil des Wachstums der Roboterdichte, 1993-2007</i> | <i>17</i> |

Zusammenfassung

Die Digitalisierung der Gesellschaft und Wirtschaft stellt neben dem Klimawandel, der Globalisierung und dem demographischen Wandel einen der treibenden Trends unserer Zeit dar. Der digitale Wandel wird stark durch den technologischen Fortschritt und die Adaptions- bzw. Absorptionsfähigkeit der Gesellschaft vorangetrieben. Mit der Digitalisierung einhergehend werden massive Transformationsprozesse innerhalb des Arbeitsmarkts, Bildungssystems, der Produktionsprozesse der Unternehmen und bei den Präferenzen der Konsumenten erwartet. Globalisierte und wettbewerbsorientierte Märkte tragen dazu bei die Innovation und den Diffusionsprozess der neuen Technologien und deren Anwendungen zu verstärken.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, die Auswirkungen der Digitalisierung auf die Wettbewerbsfähigkeit, und hierbei insbesondere auf die Lohnstückkostenentwicklung, aufzuarbeiten. Im Detail soll diese Studie empirische Evidenz zu folgenden sechs Forschungshypothesen liefern:

1. Eine verstärkte Nutzung von IKT-Kapital und/oder Industrierobotern senkt ceteris paribus die Lohnstückkosten einer Wirtschaftsbranche.
2. Ein verstärkter Einsatz von IKT-Kapital und/oder Industrierobotern steigert ceteris paribus die Produktivität einer Wirtschaftsbranche.
3. Lassen sich gegebene Hypothese 2 und einer produktivitätsbasierten Lohnpolitik zusätzliche Effekte der Digitalisierung auf die Reallohnentwicklung (bspw. über höhere Qualifikationsanforderungen) feststellen?
4. Weisen Wirtschaftsbranchen mit höherer Nutzungsdichte von IKT-Kapital und/oder Industrierobotern ceteris paribus eine schwächere Beschäftigungsentwicklung auf?
5. Eine Senkung der Lohnstückkosten führt ceteris paribus zu höheren Exportmarktanteilen.
6. Weisen Branchen welche IKT-Kapital und/oder Industrierobotern stärker nutzen, bedingt auf ihre Lohnstückkostenentwicklung, höhere Exportmarktanteile auf?

Zur Beantwortung dieser Hypothesen und Forschungsfragen untersuchen wir ökonometrisch den Einfluss der Robotisierung bzw. der Verwendung von IKT-Technologien auf Lohnstückkosten, Produktivität, Reallöhnen, Arbeitsstunden und Exportmarktanteile. Hierzu modellieren wir sowohl langfristige Effekte für die Perioden 1993-2007 und 2008-2015 mittels der kumulierten Wachstumsraten sowie kurzfristige, jährliche Effekte für den Zeitraum 1995-2015 auf Ebene der Wirtschaftsbranchen für ausgewählte Länder der OECD.

Die Ergebnisse der Studie deuten auf folgende Zusammenhänge hin:

- Es zeigt sich sowohl kurz- wie auch langfristig, dass Branchen der Warenherstellung, die ihren Kapitaleinsatz relativ zum Arbeitseinsatz erhöhen, geringere Lohnstückkosten, eine höhere Produktivität und damit eine höhere Wettbewerbsfähigkeit aufweisen.
- Über diese generelle Intensivierung des Kapitalstocks hinausgehend zeigen sich auch zum Teil zusätzliche Impulse durch eine Intensivierung von Kapitalgütern, welche mit der Digitalisierung in Verbindung gebracht werden können. Bei diesen Digitalisierungseffekten muss aufgrund differenzierter Effekte zwischen der Automatisierung durch eine Erhöhung der Roboterintensität und einer Intensivierung des IKT-Kapitalstocks unterschieden werden.
- In den frühen Jahren der Digitalisierung, vor der Finanz- und Wirtschaftskrise, wiesen IKT-intensivere Branchen der Warenherstellung langfristig Produktivitätsvorteile auf, während ein verstärkter Einsatz von Industrierobotern beschäftigungsstützend wirkte.
- Nach der Krise lassen sich keine generellen langfristigen Impulse der IKT-Intensität feststellen. Es zeigen sich jedoch signifikante Reallohnimpulse durch die Automatisierung. Branchen mit einer

steigenden realen Kapitalstockintensität in Software und Datenbanken wiesen ebenfalls eine stärkere Reallohnentwicklung auf.

- Längerfristig finden wir keine Evidenz, dass eine Intensivierung des IKT-Kapitalstocks oder der Industrieroboter pro Beschäftigungsstunde zu einem Beschäftigungsrückgang in den Branchen der Warenherstellung führte.
- Steigende Lohnstückkosten gehen bereits in der kurzen Frist mit sinkenden Exportmarktanteilen einher. Branchen mit stärkerem Einsatz von Industrierobotern weisen in der kurzen Frist eine höhere Produktivität und geringere Lohnstückkosten auf. Über ihre Assoziation mit den Lohnstückkosten hinaus, weisen stärker digitalisierte Branchen aber keine zusätzlichen Wettbewerbsvorteile auf.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Investitionen in Digitalisierung langfristig eine ähnliche Wirkung auf die Wettbewerbsfähigkeit von Branchen entfalten, wie herkömmliche Kapitalstockintensivierungen. Kurzfristig geht eine stärkere Digitalisierung mit höherer Produktivität und geringeren Lohnstückkosten einher. Diese Wettbewerbsvorteile können sich in der Folge in höheren Exportmarktanteilen niederschlagen. Im Rahmen der Studien wurden keine negativen Auswirkungen der Digitalisierung auf die langfristige Beschäftigungsentwicklung, jedoch aber Anzeichen auf positive Impulse für die Reallohnentwicklung gefunden. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Digitalisierung, ähnlich zu vergangenen technologischen Entwicklungen, zu einer höherwertigen Produktion führt ohne dabei langfristig in großem Maße Beschäftigung freizusetzen.

1 Motivation und Inhalt

Die Digitalisierung der Gesellschaft und Wirtschaft stellt neben dem Klimawandel, der Globalisierung und dem demographischen Wandel einen der treibenden Trends unserer Zeit dar. Der digitale Wandel wird stark durch den technologischen Fortschritt und die Adaptions- bzw. Absorptionsfähigkeit der Gesellschaft vorangetrieben. Mit der Digitalisierung einhergehend werden massive Transformationsprozesse innerhalb des Arbeitsmarkts, Bildungssystems, der Produktionsprozesse der Unternehmen und bei den Präferenzen der Konsumenten erwartet. Globalisierte und wettbewerbsorientierte Märkte tragen dazu bei die Innovation und den Diffusionsprozess der neuen Technologien und deren Anwendungen zu verstärken.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, die Auswirkungen der Digitalisierung auf die Wettbewerbsfähigkeit, und hierbei insbesondere auf die Lohnstückkostenentwicklung, aufzuarbeiten. Die dahinterliegende Grundhypothese lautet, dass Wirtschaftsbranchen welche *ceteris paribus* einen intensiveren Digitalisierungsgrad aufwiesen, Wettbewerbsvorteile realisieren können. Diese Vorteile können bspw. über eine gesteigerte Produktivität, welche *ceteris paribus* zu geringeren Lohnstückkosten führt, erfolgen. Darüber hinaus ist es auch denkbar, dass die Digitalisierung über eine erhöhte Flexibilität im Produktionsprozess, bspw. über die Ermöglichung von individualisierter Massenproduktion, abseits der Kostenvorteile wettbewerbsfördernd wirkt.

In den ökonometrischen Analysen dieser Studie werden Datensätze von ausgewählten OECD-Ländern und Wirtschaftsbranchen verwendet, mit einem Fokus auf die Branchen, welche handelbare Güter produzieren und im internationalen Wettbewerb stehen. Zur Approximation der Digitalisierung werden Daten zu Industrieroboterinstallationen sowie Informations- und Kommunikationskapitalstöcken verwendet. Diese werden mit ökonometrischen Modellen bezüglich langfristiger und kurzfristiger Effekte auf die Entwicklungen der Lohnstückkosten, Produktivität, Reallöhne, Beschäftigungsstunden und Exportmarktanteile untersucht.

Abschnitt 2 gibt einleitend eine kurze Übersicht zu den ökonomischen Grundlagen hinter Konzepten und Zusammenhängen von Wettbewerbsfähigkeit, Lohnstückkosten und Digitalisierung. In Abschnitt 3 werden die darauf aufbauenden Forschungshypothesen und -fragen formuliert. Danach werden die detaillierten ökonometrischen Spezifikationen der einzelnen Modelle über die kurz- und langfristigen Effekte der Digitalisierung auf die oben genannten Zielgrößen ausgeführt, sowie Definitionen der verwendeten Variablen erläutert. Die verwendeten Datenquellen und die daraus ausgewählten Stichproben der einzelnen Modelle werden in Abschnitt 4 näher dargestellt. Abschnitt 5 diskutiert die Ergebnisse der ökonometrischen Schätzungen und Abschnitt 6 erstellt eine kontextuelle Synthese der einzelnen Ergebnisse und formuliert abschließende Folgerungen.

2 Wettbewerbsfähigkeit, Lohnstückkosten und Digitalisierung

Mit dem Begriff der internationalen Wettbewerbsfähigkeit verbindet man oft wirtschaftspolitische Diskurse und einen generell erstrebenswerten Zustand. Widmet man sich jedoch der genaueren konzeptionellen Ausgestaltung dieses Begriffs, so erschließen sich in vielen Fällen nur sehr grobe und abstrakt-formulierte Konzepte. Im engeren ökonomischen Sinne wird unter Wettbewerbsfähigkeit meist die Fähigkeit verstanden Wohlstand auszubauen bzw. zu halten. Andere, weiterlaufende Interpretationen, wie bspw. jene der „green competitiveness“, können zudem Aspekte wie Nachhaltigkeit, Gesundheit oder andere über das Bruttoinlandsprodukt hinausgehende gesellschaftspolitische Ziele beinhalten. (siehe Schibany, Reiner und Sellner, 2014)

Unter empirischen Ökonomen gängige Operationalisierungen des Begriffs beinhalten als Outputgrößen oft die Ausweitung bzw. Erhaltung von Exportweltmarktanteile und als Eingangsgrößen eine hohe Produktivität bzw. geringe Lohnstückkosten. Carlin, Glyn und Van Reenen (2001) bestätigten in einer empirischen Studie anhand von Daten aus 14 OECD Staaten für 1970-1992 einen langfristigen negativen Effekt von Lohnstückkosten auf Exportmarktanteile. Sie finden in ihrem in Differenzen geschätzten jährlichen Panelmodell neben dem Einfluss der Lohnstückkosten auch signifikante länderspezifische Effekte, was auf unerklärte und stark unterschiedliche Wachstumstrends der Marktanteile der betrachteten Länder hinweist. In ergänzenden Analysen stellten die Autoren dann fest, dass abseits rein kostenseitiger Aspekte auch Forschung und Entwicklung, Patente und institutionelle Rahmenbedingungen relevante Determinanten internationaler Wettbewerbsfähigkeit sind.

Per Definition berechnen sich die Lohnstückkosten als Division der Arbeitnehmerentgelte pro unselbständig Beschäftigten durch die Produktivität, zumeist gemessen als reale Wertschöpfung pro Beschäftigten. Als drei wichtige Determinanten der Lohnstückkosten können die konjunkturelle Entwicklung, die Inflation und die Arbeitsmarktlage (siehe bspw. Marterbauer und Walterskirchen 2003) genannt werden. Die beiden erstgenannten Faktoren wirken stärker auf kurzfristige Schwankungen in den Lohnstückkosten ein. Durch Arbeitsmarktrigiditäten fallen in konjunkturellen Schwächephasen meist zuerst die Profite bevor Anpassungen in der Beschäftigung erfolgen. Da zudem die Produktivitätsentwicklung tendenziell prozyklisch verläuft, ergeben sich in Rezessionen häufig steigende Lohnstückkosten. Mittelfristige Trends in den Lohnstückkosten korrespondieren stärker mit dem Arbeitsmarkt. Eine hohe bzw. steigende Arbeitslosenquote schwächt die Verhandlungsposition der Arbeitnehmer und dämpft Lohnsteigerungen und damit tendenziell die Lohnstückkosten. Durch die Definition der Lohnstückkosten lassen sich jedoch im weiteren Sinne alle die Produktivität bzw. Stundenlöhne betreffende Determinanten als Einflussfaktoren nennen. Hierzu gehen wir später vor allem auf die Effekte von Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) und Automatisierung auf die Produktivität näher ein.

Aktuelle Daten weisen auf eine Verschlechterung der Österreichischen Lohnstückkostenposition in der Warenherstellung relativ zu wichtigen Handelspartnern hin (siehe Hölzl und Leoni, 2017). Diese Entwicklung kann auf den verhältnismäßig hohen Anstieg der Bruttoentgelte pro Kopf, welcher in Österreichs Industrie 2016 2,8% oder etwa 1% höher als bei Österreichs Handelspartnern etwa lag, zurückgeführt werden. Auch die Produktivität entwickelte sich zwischen 2011 und 2016 mit einem Anstieg von 1% p.a. unter dem Schnitt der Vergleichsländer (1,3% p.a.). Vor allem in den letzten beiden Perioden wies Österreich mit 0,3% (2015) und 0,5% (2016) eine deutliche niedrigere Produktivitätsentwicklung als der Durchschnitt der EU-Handelspartner mit 3,2% (2015) bzw. 1,4% (2016) auf. In Summe ergibt sich aus Wechselkursveränderungen (welche vernachlässigbar sind), dem Anstieg der Arbeitskosten und der niedrigen Produktivität für 2016 ein Anstieg der Österreichischen

Lohnstückkosten in der Warenherstellung um 2,3%, verglichen mit bspw. 0,3% in Deutschland oder -0,3% der gewichteten EU-Handelspartner. Betrachtet man die längerfristige Entwicklung zwischen 2006 und 2016 so liegt Österreich mit einem Lohnstückkostenwachstum von 1,3% um 0,4% bzw. 0,6% über dem durchschnittlichen Wachstum aller bzw. der EU-Handelspartner.

Wirtschaftlich stark entwickelte Volkswirtschaften weisen höhere Stundenlöhne als wirtschaftlich schwächer entwickelte Länder auf und streben wirtschaftspolitisch danach ein hohes Lohn- und Wohlstandsniveau zu erhalten. Internationale Wettbewerbsfähigkeit findet in diesen Länder daher, neben einer regelbasierten Lohnsteigerungspolitik, bevorzugt über und Produktivitätssteigerungen, welche ceteris paribus zu Lohnstückkostenreduktionen führen, statt. Innerhalb der ökonomischen Literatur findet sich unter dem Titel der Determinanten der Produktivität eine Vielzahl an theoretischer und empirischer Forschung (für einen Überblick siehe Syverson, 2011). Neben Faktoren wie der Wettbewerbssituation, Qualität des Management, F&E und Innovation, Learning-by-doing oder der Unternehmensorganisation, wird auch der IKT-Ausstattung und in der rezenten Literatur dem Einsatz von Industrierobotern vermehrt ein relevanter Stellenwert eingeräumt.

So hebt Syverson (2011) die Rolle der IKT-Investitionen für den Produktivitätsauftrieb der USA in den 1990er Jahren hervor, eine Hypothese die kürzlich in Aum, Lee und Shin (2018) untermauert wurde. Empirische Studien wie Jorgenson, Ho und Stiroh (2005, 2008) und Oliner, Sichel und Stiroh (2007) dokumentieren weit über Durchschnittswerten liegende Produktivitätswachstumsraten von IKT-produzierenden sowie stark IKT-nutzenden Wirtschaftsbranchen. Auf Ebene der Unternehmen vereinfachen IT-intensive Technologien die Anpassung der Produktion an Konsumentenwünsche schaffen höheren Mehrwert durch Produktspezialisierung und Innovation, erhöhen die Produktionsgeschwindigkeit und steigern die Adaptionfähigkeit für best-practices (siehe Hubbard, 2003; Bartel, Ichniowski und Shaw, 2007 oder Brynjolfsson et al., 2008). Auch Cardona, Kretschmer und Strobel (2013) finden in einem aktuelleren Überblick der empirischen Befunde überwiegend signifikant positive Effekte der IKT-Nutzung auf die Produktivität.

Hinsichtlich der Auswirkungen des Einsatzes von Industrierobotern (Automatisierung) auf die Produktivität bestehen derzeit weniger empirische Analysen, was vor allem darauf zurückzuführen ist, dass erst seit einigen Jahren eine angemessene Datenbasis besteht. Eine vielzitierte Studie ist jene von Graetz und Michaels (2018), in welcher der langfristige Einfluss eines zunehmenden Industrierobotereinsatzes auf Arbeitsproduktivität und weitere Zielgrößen auf einer breiteren Branchenebene (inkl. des primären Sektors, Bergbau, Bau, Energie- und Wasserwirtschaft sowie Bildung) untersucht wurde. Die Analyse beschränkt sich dabei auf eine Auswahl an OECD Ländern und untersucht den Einfluss des Roboterbestands je Arbeitsstunde zwischen 1993 und 2007 auf die kumulierten Wachstumsraten der Produktivität. Die in diesem Zeitraum erfolgte Steigerung der Roboterintensität (gemessen pro Mio. geleistete Arbeitsstunden) in zahlreichen Sektoren erhöhte das jährliche Produktivitätswachstum um 0.36 Prozentpunkte und ist für 15 Prozent des aggregierten Produktivitätswachstums verantwortlich. Im Vergleich zum Wachstumsbeitrag von IKT, welcher von O'Mahony und Trimmer (2009) für die EU und die USA auf 0,6 bis 1 Prozent geschätzt wird, fällt der Beitrag der Industrieroboter etwas geringer aus. Abseits der Arbeitsproduktivität fanden die Autoren auch positive Effekte auf die totale Faktorproduktivität. Die Autoren verwendeten zur Identifikation eines kausalen Effekts die exogene Variation des Wachstums der Roboterdichte, welche durch den Anteil an automatisierbaren Arbeitsstunden in der jeweiligen Branche erklärt wird. Zahlreiche Robustheitsanalysen bestärken Graetz und Michaels (2018) in ihrem Ergebnis, jedoch weisen die Ergebnisse auch darauf hin, dass der Einsatz von Industrierobotern abnehmende Skalenerträge aufweist.

Mit einer ähnlichen Datenquelle für Automatisierung finden Dauth et al. (2017) für lokale Arbeitsmärkte in Deutschland ähnliche Ergebnisse wie Graetz und Michaels (2018).

Spricht man von Determinanten der Wettbewerbsfähigkeit, liegt der Fokus oftmals auf Preis- und Kostenvorteilen. Neben preislichen Aspekten sind jedoch noch andere Faktoren bestimmend für die internationale Konkurrenzfähigkeit der Produkte und Unternehmen eines Landes (siehe Carlin et al., 2001). Dazu zählen unter anderem die Produktqualität, Innovationsfähigkeit oder Flexibilität bezüglich der Anpassung an Kundenwünsche. Letzterer Punkt wird meist auch unter dem Schlagwort individualisierte Massenfertigung (*mass customization*) subsumiert, womit die profitable Produktion von geringen Losgrößen gemeint ist. Solche Produktionstechniken erfordern einen hohen Grad an Flexibilität um letztlich gewinnbringend zu sein. In den Fallstudien der Berichte der *International Federation of Robotics (IFR)* finden sich dazu immer wieder Verweise, dass gerade die Robotisierung hierfür einen erheblichen Beitrag leisten kann. Zur Illustration skizzieren wir dazu im Folgenden drei Fallstudien.

Ein erstes Beispiel liefert die FME Feinmechanik AG aus Buchberg in der Schweiz. Hier werden kleine, feinmechanische Komponenten für Unternehmen der Feinwerktechnik bzw. der Medizintechnik produziert. Die Herstellung betrifft sowohl Prototypen als auch Serienteile und einbaufertige Baugruppen. Nicht nur diese Komponenten variieren, sondern als Folge davon auch die Stückzahlen mit Losgrößen kleiner Serien von 50 Stück bis hin zu 10.000 Stück. Daher ist ein flexibler Produktionsansatz erforderlich. Ein konkreter zu automatisierender Arbeitsschritt beinhaltete dabei alle 13 Sekunden eine Gewindehülse in eine Maschine zu stecken, auf die Beschriftung zu warten die Hülse dann wieder herauszunehmen und die nächste einzusetzen. Durch die Automatisierung dieses Arbeitsschritts konnte die Produktion von fünf Achtstundentagen auf 20 Stunden an sieben Tagen ausgeweitet werden. Diese unbemannte Nachtproduktion haben zudem Vorteile in der Preisgestaltung.

Ein weiteres Beispiel ist die Produktion von Lautsprechergehäusen im Unternehmen Bowers & Wilkins bei der FANUC Roboter im Produktionsprozess eingesetzt werden. Der Produktionsschritt der Gehäuseherstellung zählt zu den aufwändigsten und kostenintensivsten in der Herstellung des Produkts. Die automatisierte Fertigungsanlage ist für die Leistung hoher Produktivität gestaltet in der auf einer Seite ein Arbeiter die Einheit be- und entlädt und auf der anderen Seite der Roboter seine Tätigkeit durchführt. Während die manuelle Fertigstellung eines Produkts ungefähr eine Stunde in Anspruch nahm, dauert die Durchführung derselben Aufgabe durch einen FANUC Roboter des Modells M20iA/M20 weniger als zehn Minuten. Die Automatisierung resultierte somit in einer signifikanten Verkürzung der Fertigungsdauer. Ein weiterer Vorteil ist die verwendete Software, die eine rasche Erweiterung der Programme für neue Produkttypen sowie Modifizierung vorhandener Programme ermöglicht. Der Einsatz der Roboter gewährt somit mehr Flexibilität in der Produktherstellung durch die Vereinfachung der Anpassung an Nachfrageänderungen und der Innovation vorhandener Produkte.

Ein abschließendes Beispiel liefert die Sekundärverpackungslinie der Firma Holopack Verpackungstechnik GmbH, die Umverpackungen von Augentropfen durchführt. Die Firma war auf Grund hoher Intensität manueller Arbeit im Prozess nicht mehr in der Lage, die weltweit gestiegene Produktnachfrage zu bewältigen. Der vor dem Einsatz der Yawasaka Roboter rein von Arbeitern durchgeführte Fertigungsprozess brachte zwei wesentliche Nachteile mit sich: eine zu lange Dauer des Verpackungsprozesses und Belegung von Mitarbeitern, die für komplexere Aufgaben benötigt würden, mit monotonen Tätigkeiten. Der Verpackungsvorgang gestaltet sich folgendermaßen: Jeweils fünf Ampullen der Augentropfen sind zusammengehängt. Der Yawasaka Roboter muss jeweils vier dieser Einheiten in einer schlauchförmigen Verpackung verpacken, die entsprechenden Daten darauf abdrucken und diese anschließend in Boxen verschließen. Selbst die Kontrolle der Arbeit wird mit Hilfe einer Kamera von der Maschine selbst übernommen. Durch die Automatisierung der Arbeitsschritte und das zeitlich optimal abgestimmte System, wurde der Output um 35 Prozent gesteigert. Für den

gesamten Verpackungsprozess werden nunmehr zwei Bediener benötigt. Somit konnten als Resultat der Automatisierung zwei Drittel der Mitarbeiter für wichtigere Aufgaben freigegeben werden.

Der immer schneller voranschreitende technische Fortschritt und der vermehrte Einsatz von Robotern steigern aber auch die Unsicherheiten der Menschen bezüglich zukünftiger Beschäftigungsmöglichkeiten. Die technischen Fortschritte innerhalb der Computeralgorithmen und Roboter führen dazu, dass immer mehr Tätigkeiten automatisiert werden können. Die Angst vor dem drohenden Jobverlust erfährt weitere Unterstützung durch rezente Studien welche die fallenden Lohnquoten in vielen entwickelten Ländern direkt oder indirekt (Technologie führt zu Marktkonzentration und sogenannten *superstar firms*) auf die technologischen Entwicklung zurückführen (siehe Autor und Salomons, 2018 oder Autor et al. 2017).

Eine Reihe an aktuellen Beiträgen aus der empirischen Forschung beschäftigt sich mit den Auswirkungen der Automatisierung auf den Arbeitsmarkt. Acemoglu und Restrepo (2017) analysierten den Effekt vermehrten Robotereinsatzes in der Industrie zwischen 1990 und 2007 auf lokale Arbeitsmärkte in den USA. Die Resultate deuten auf einen Rückgang der aggregierten Beschäftigung relativ zur Population um 0,34 Prozent hin, was einem Verlust von 5,6 Arbeitsplätzen durch den Einsatz eines zusätzlichen Roboters entspricht, sowie eine Verminderung der aggregierten Löhne um 0,5 Prozent. Beschränkt man die Analyse auf jene Industrien mit der höchsten Roboterintensität, so resultiert ein zusätzlicher Roboter pro tausend Arbeiter in einer Verminderung der Beschäftigungsquote um etwa 0,18 Prozent und der aggregierten Löhne um 0,25%. Die Autoren merken an, dass auf Grund der geringen Zahl der Roboter in der US-Wirtschaft auch die Anzahl der Arbeitsplatzverluste durch diese bisher begrenzt ausfiel. Falls sich der Robotereinsatz wie von Experten erwartet entwickelt und es zu einer knappen Verdreifachung (bis zu einer Vervierfachung) des Roboterbestands in der Industrie kommt, kann man, basierend auf den Schätzungen von Acemoglu und Restrepo, einen 0,54-1 (0,94-1,76) Prozent niedrigeren Anteil Beschäftigter an der Gesamtbevölkerung und eine Reduktion des Lohnanstiegs um 0,75-1,5 (1,3-2,6) Prozent zwischen 2015 und 2025 erwarten.

Dauth et al. (2017) führten eine entsprechende Analyse für den Arbeitsmarkt in Deutschland durch. Im Gegensatz zu Acemoglu und Restrepo (2017) für die USA, finden sich in den Daten für Deutschland keine negativen Auswirkungen auf die aggregierte Beschäftigung resultierend aus gesteigener Anwendung von Industrierobotern. Trotzdem zeigen sich im Produktionssektor starke negative Effekte auf die Beschäftigung mit einem durchschnittlichen Verlust von zwei Arbeitsplätzen pro zusätzlich eingesetzten Roboter, welche etwa 23% des Rückgangs von Beschäftigten im industriellen Sektor erklären. Diese Jobverluste konnten jedoch gänzlich durch zusätzliche Arbeitsnachfrage im Dienstleistungssektor kompensiert werden. In Deutschland veränderte sich durch die Automatisierung zwischen 1994 und 2014 somit nur die Beschäftigungsstruktur. Die Autoren untersuchten auch den Einfluss der Roboter auf individueller Ebene anhand einzelner Arbeiter. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass eine höhere Roboterintensität zu einer größeren Arbeitsplatzstabilität für Beschäftigte führt und der negative Beschäftigungseffekt somit nicht durch Verdrängungseffekte bereits angestellter Arbeiter, sondern durch eine niedrigere Anzahl von Neuanstellungen begründet wird. Vermehrter Robotereinsatz lässt den Lohn hochqualifizierter Arbeiter steigen, während niedrig- oder mittelqualifizierte Arbeitnehmer Lohnrückgänge erfahren. Der mit der Automatisierung einhergehende Anstieg des Outputs trägt zudem positiv zu einem Rückgang der Lohnquote bei.

Chiacchio et al. (2018) schätzten den Einfluss von Industrierobotern auf Beschäftigung und Löhne in sechs Ländern der Europäischen Union (Finnland, Frankreich, Griechenland, Deutschland, Italien, Spanien und Schweden), die zusammen 85,5 % des EU Industrierobotermarkts ausmachen. Dafür verwenden sie ebenfalls den Ansatz eines lokalen Arbeitsmarktgleichgewichts von Acemoglu und Restrepo (2017). Die Ergebnisse deuten in Richtung eines Rückgangs der Beschäftigungsquote von 0,16

bis 0,2 Prozentpunkten durch einen zusätzlichen Roboter pro tausend Arbeiter in der Periode vor 2007. Dies unterstützt die Hypothese der Existenz eines signifikanten Verdrängungseffekts. Die beobachteten negativen Auswirkungen dieses Aspekts der Automatisierung sind für Arbeiter mit mittlerer Qualifikation, junge Arbeitskräfte und Männer besonders stark ausgeprägt. Abseits der negativen Effekte der Automatisierung finden die Autoren auch einen positiven Effekt von IKT-Kapital auf die Beschäftigung, woraus sich erkennen lässt, dass verschiedene Technologien auch differenzierte Einflüsse auf die Dynamiken am Arbeitsmarkt haben können.

Graetz und Michaels (2018) finden bei der Analyse der aggregierten geleisteten Arbeitsstunden keine signifikante Auswirkung von erhöhtem Robotereinsatz. Betrachtet man verschiedene Qualifikationslevels, so zeigt sich eine Reduktion des Anteils an geleisteten Arbeitsstunden durch Arbeiter mit niedrigem Qualifikationsniveau relativ zu solchen mit mittlerer oder hoher Qualifikation. Der Nutzen für Arbeiter durch Lohnsteigerungen fällt geringer aus als die Produktivitätszunahme selbst und ist ungleich über die unterschiedlichen Qualifikationsniveaus verteilt. Schulabgänger, welche die Gruppe Niedrigqualifizierter ausmachen, erfahren sogar Lohnverluste durch vermehrten Robotereinsatz. Arbeiter mit höherer Qualifikation kann man jedoch als Gewinner der Einführung von Robotern in der Industrie bezeichnen.

3 Methode

Forschungshypothesen bzw. -fragen

Im Rahmen dieser Studie soll die Evidenz zu folgenden Forschungshypothesen aufgearbeitet werden bzw. die folgenden Forschungsfragen untersucht werden:

1. Eine verstärkte Nutzung von IKT-Kapital und/oder Industrierobotern senkt ceteris paribus die Lohnstückkosten einer Wirtschaftsbranche.
2. Ein verstärkter Einsatz von IKT-Kapital und/oder Industrierobotern steigert ceteris paribus die Produktivität einer Wirtschaftsbranche.
3. Lassen sich gegebene Hypothese 2 und einer produktivitätsbasierten Lohnpolitik zusätzliche Effekte der Digitalisierung auf die Reallohnentwicklung (bspw. über höhere Qualifikationsanforderungen) feststellen?
4. Weisen Wirtschaftsbranchen mit höherer Nutzungsdichte von IKT-Kapital und/oder Industrierobotern ceteris paribus eine schwächere Beschäftigungsentwicklung auf?
5. Eine Senkung der Lohnstückkosten führt ceteris paribus zu höheren Exportmarktanteilen.
6. Weisen Branchen welche IKT-Kapital und/oder Industrierobotern stärker nutzen, bedingt auf ihre Lohnstückkostenentwicklung, höhere Exportmarktanteile auf?

Die Motivation für diese Forschungshypothesen ergibt sich aus den Ausführungen in Abschnitt 2. Im Folgenden werden die ökonometrischen Spezifikationen formalisiert welche sich auf die anschließend in Abschnitt 5 dargestellten Zusammenfassungen der Ergebnisse beziehen.

Methodologischer Rahmen

Während IKT-Kapitalgüter bereits in den 1990er Jahren ein verstärktes empirisches Forschungsinteresse auslösten, widmeten sich erst kürzlich empirische Studien dem Einfluss der Automatisierung über die Nutzung von flexiblen und programmierbaren Robotern. Die vorliegende Studie nimmt stark Bezug auf die bestehenden Analysen von Graetz und Michaels (2018)¹ und erweitert bzw. modifiziert diese. Die Erweiterungen betreffen zunächst die Hinzunahme der Lohnstückkosten als zu untersuchende Zielgrößen. Zudem wurde die Untersuchungsperiode² bis auf das Jahr 2015 ausgeweitet. Eine andere Erweiterung betrifft die Methode, da wir einen aktuelleren Datensatz für die Periode 1995-2015 heranziehen um kurzfristige Effekte der Digitalisierung zu quantifizieren. Wir analysieren daher nicht wie in Graetz und Michaels (2018) ausschließlich den Einfluss auf die langfristige Wachstumsrate der Zielgrößen, sondern analysieren ebenfalls die Effekte auf die Wachstumsraten in einem jährlichen Paneldatensatz für 1995-2015.

Die Modifikationen betreffen vor allem die Auswahl der betrachteten Wirtschaftsbranchen. Graetz und Michaels (2018) inkludierten neben typischen Branchen der Warenherstellung auch die Branchen Land- und Forstwirtschaft, Bergbau, Bau, Energie- und Wasserversorgung sowie Bildung/F&E. Da diese fünf Branchen zum einen keine klassischen Warenerzeugungsbranchen darstellen, welche im Fokus dieser Studie stehen, und zum anderen keine stark international exponierten Branchen darstellen wurden diese in den Analysen der vorliegenden Studie zum Teil ausgeklammert.

Die zweite empirische Arbeit auf welche die vorliegende Studie Bezug nimmt ist Carlin, Glyn und Van Reenen (2001). Aufbauend darauf untersuchen wir die ob Digitalisierung, abseits eines potentiellen

¹ Wir verwenden in einigen Analysen den originalen Datensatz und Berechnungsalgorithmen von Graetz und Michaels (2018). Dieser steht auf der Homepage des *Review of Economics and Statistics*, in welchem die Studie veröffentlicht wird, zur Verfügung.

² Da die Klassifikation der Wirtschaftsbranchen von NACE 1.1. auf NACE 2 umgestellt wurde und auch unterschiedliche Länderstichproben vorliegen, können die Ergebnisse nicht gänzlich verglichen werden.

indirekten Effekts über die Lohnstückkosten, einen direkten Effekt auf Exportmarktanteile ausübt. Da Wettbewerbsfähigkeit, wie eingangs erwähnt, ein Konzept ist welches mehr als reine Kostenvorteile abbildet, könnten andere Aspekte wie bspw. eine höhere Flexibilität bei sich rasch ändernden Kundenwünschen oder eine höhere Produktqualität, Wettbewerbsvorteile über eine verstärkte Digitalisierung bringen. Im Gegensatz zu Carlin et al. (2001) beschränkt sich diese Studie auf kurzfristige Effekte und wählt einen methodologischen Ansatz analog zu den Analysen über die kurzfristigen Lohnstückkostenentwicklung.

Eine empirische Untersuchung benötigt messbare Größe von meist abstrakten bzw. umfangreich definierten Konzepten wie bspw. jenem der Digitalisierung. Verstand man unter der Digitalisierung in den 1980/90er Jahren die Nutzung von Desktoprechnern und Software wie Wortverarbeitungsprogramme oder Spreadsheets, versteht man darunter derzeit ein Konzept welches oft mit Schlagwörter wie „Industrie 4.0“, „Internet der Dinge“ oder „Robotisierung“ in Verbindung gebracht wird. So definieren Acatech (2013, S. 18) etwa: *„Industrie 4.0 meint im Kern die technische Integration von [Cyber-Physical Systems] CPS in die Produktion und die Logistik sowie die Anwendung des Internets der Dinge und Dienste in industriellen Prozessen – einschließlich der sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Wertschöpfung, die Geschäftsmodelle sowie die nachgelagerten Dienstleistungen und die Arbeitsorganisation.“*

Dabei stehen die Interoperabilität im Sinne eines Informationsaustausches zwischen Mensch und Smart Factor, die Virtualisierung der Produktion durch Sensordaten, die Dezentralisierung von Entscheidungsprozessen mittels CPS, eine echtzeitfähige Analyse von Daten, Dienstleistungsorientierung und ein flexibler Produktionsprozess über Modularität im Zentrum der sogenannten Smart Factory der Zukunft (siehe DC Internal Policies, 2016).

Auf Basis dieser Definition und Beschreibung der Industrie 4.0 grenzt sich diese klar von der 3. Industriellen Revolution ab, welche durch den Einsatz von Elektronik und IKT die Automatisierung des Produktionsprozesses vorangetrieben hat. Anhand der Abgrenzung lassen sich auch die neuen Schlüsseltechnologien identifizieren, über deren Einsatz in Verbindung mit den nötigen Organisationskonzepten und Humankapital Industrie 4.0 umgesetzt werden kann. Als Schlüsseltechnologien, -kompetenzen bzw. -voraussetzungen für Industrie 4.0 zählen unter anderem Cloud Computing, RFID-Technologien (Radio Frequency Identification), Breitbandverbindung mit mind. 50-100 Mbit/Sekunde, mobile internetfähige Endgeräte und Social Media.³ Innerhalb der „Cyber-Physical Systems“ werden über RFID Informationen übertragen und real-time ausgewertet und zur Steuerung verwendet. Hierfür benötigt man ein leistungsfähiges Netz und für die Verarbeitung der großen Datenmengen Cloud Computing. Die ausgewerteten Informationen lassen sich an die betreffenden Module und an die mobilen Endgeräte der Arbeitskräfte weiterleiten und zur Prozesssteuerung verwendet. Die Big Data Schnittstelle zum Konsumenten kann dann zusätzlich über Social Media erfolgen.

Dem Konzept der Industrie 4.0 nach müssten man die Digitalisierung auf Basis der Intensität der Nutzung von Schlüsseltechnologien wie Cloud Computing, re-programmierbaren Robotern oder Machine Learning Algorithmen in Unternehmen bzw. Wirtschaftsbranchen messen. Bezüglich der re-programmierbaren Roboter besteht eine mehrere Länder, Wirtschaftsbranchen und Jahre umfassende Datenbank. Unglücklicherweise, lassen sich bisher die Aspekte der neueren Digitalisierung welche sich auf Hardware und Software beziehen nur unzureichend mit Daten unterlegen. Hier besteht nach wie vor die Restriktion einer Betrachtung von Aggregaten nach Investitionskategorien des Europäischen Systems der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (ESVG) 2010 wie „Computer und Hardware“,

³ Siehe hierzu auch ZEW (2015).

„Telekommunikationsausrüstung“ und „Software und Datenbanken“. Da kein Informationsgehalt bezüglich der Qualität des eingesetzten Kapitals besteht, kann man darunter bspw. auch all jene Aspekte der Digitalisierung der 1990er Jahre auffassen. Somit besteht hinsichtlich der Hard- und Software weiterhin eine relativ grobe Erfassung des Phänomens der Digitalisierung im Sinne einer zeitgemäßen Definition.

Empirische ökonometrische Spezifikationen

Analog zu Graetz und Michaels (2018), modellieren wir langfristige Effekte für die Perioden 1993-2007 und 2008-2015 mittels der kumulierten Wachstumsrate der abhängigen und unabhängigen Größe zwischen Ausgangs- und Endperiode. Demnach wäre die Zielvariable der Lohnstückkosten des Landes i und der Wirtschaftsbranche k für die Periode 1993-2007 gegeben durch:

$$\Delta \ln(LSTK_{i,k,93/07}) = \ln(LSTK_{i,k,2007}) - \ln(LSTK_{i,k,1993}).$$

Die Lohnstückkosten ergeben sich durch Division der nominellen Arbeitnehmerentgelte ($AN E_{nom}$) je Arbeitsstunde der unselbständig Beschäftigten (H_{uns}) durch die reale Wertschöpfung (Y_{real}) je Arbeitsstunde (H):

$$LSTK = \frac{AN E_{nom}/H_{uns}}{Y_{real}/H}.$$

Mit Ausnahme der Roboterdichte und des Exportmarktanteils werden alle anderen Variablen, wie die Lohnstückkosten, in logarithmischen Differenzen ausgedrückt. Die unabhängige Variable zur Approximation der Nutzung von Industrierobotern ist die Roboterdichte, welche definiert ist als die Anzahl der Roboterinstallationen (Bestand) pro Mio. geleisteter Arbeitsstunden:

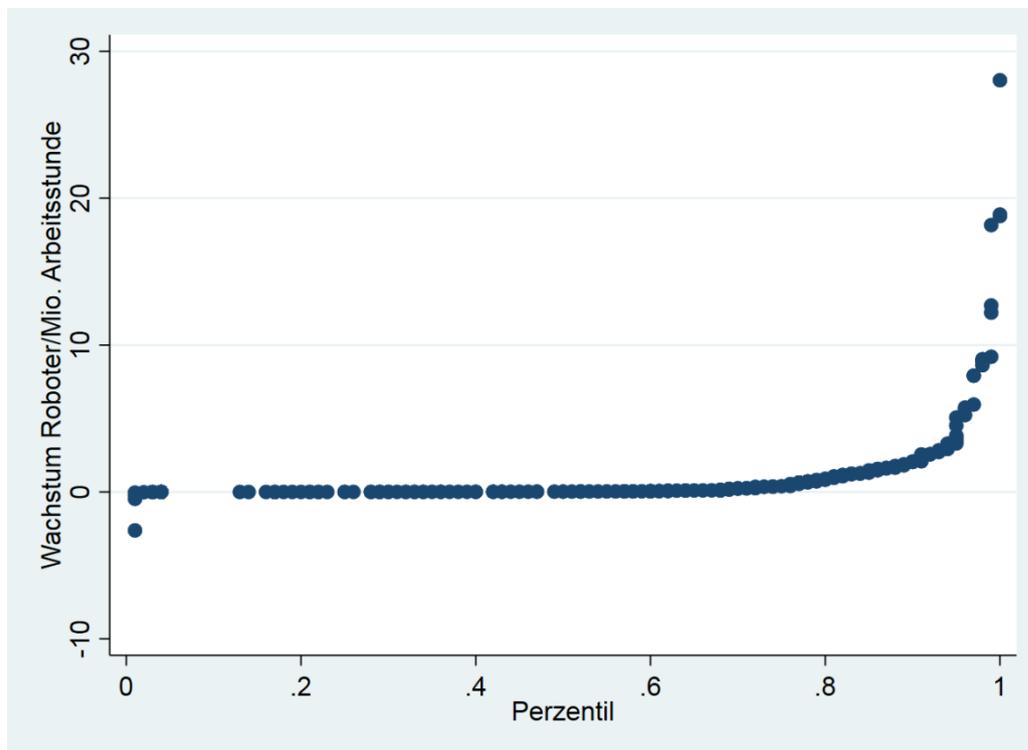
$$ROB = \frac{ROBSTOCK}{H}.$$

Die Veränderung der Industrieroboter pro Millionen Arbeitsstunden wird, wie in Graetz und Michaels (2018), als Differenz berechnet:

$$\Delta ROB_{i,k,93/07} = ROB_{i,k,2007} - ROB_{i,k,1993}.$$

Da dieses Maß eine stark auf niedrige Ausprägungen gebündelte Verteilung aufweist, berechnen wir die Perzentile der einzelnen Realisationen⁴ auf Länder und Wirtschaftsbranchenebene. Das Resultat dieser Transformation ist für die alle Wirtschaftsbranchen umfassende Stichprobe für die Periode 1993-2007 in Abbildung 1 dargestellt. Der Vorteil dieser Transformation ist, dass diese funktionale Form in linearen Modellen besser zu projizieren ist.

⁴ In der Stichprobe zu den Berechnungen der kurzfristigen Effekte berechnen wir die Perzentile der Differenzen innerhalb jedes Jahres.

Abbildung 1: Wachstum der Roboterdichte vs. Perzentil des Wachstums der Roboterdichte, 1993-2007

Quelle: Eigene Darstellung. Anmerkungen: Die abgebildeten Daten beinhalten alle Länder und Wirtschaftsbranchen (inkl. LW, Bergbau, Bau, Energie- und Wasserversorgung und Unterricht) aus den Hauptspezifikationen in Graetz und Michaels (2018).

Der Exportmarktanteil ($XMA_{i,k}$) von Land i in Wirtschaftsbranche k ist gegeben durch:

$$XMA_{i,k} = \frac{X_{i,k}}{\sum_n X_{n,k}},$$

wobei $X_{i,k}$ die gesamten Exporte des Landes i in Wirtschaftsbranche k sind und in der Summe im Nenner die gesamten weltweiten Exporte (über alle Länder n) der Wirtschaftsbranche k enthalten sind. Da der Exportmarktanteil in Prozent (zwischen 0 und 1) definiert ist drücken wir die Veränderung in Prozentpunkten aus:

$$\Delta XMA_{i,k,t} = (XMA_{i,k,t} - XMA_{i,k,t-1}) * 100.$$

Die Produktivität je Arbeitsstunde, welche ebenfalls als zu erklärende Größe herangezogen wird:

$$PROD = Y_{real}/H.$$

Reallöhne⁵ je Arbeitsstunde sind gegeben durch die realen Arbeitnehmerentgelte (deflationiert mittels der Konsumentenpreis-inflation) geteilt durch die Arbeitsstunden der unselbständig Beschäftigten:

$$W = ANE_{real}/H_{uns}.$$

In einer weiteren Spezifikation untersuchen wir zudem die Effekte auf die Beschäftigung. Hierzu ziehen wir die gesamten Arbeitsstunden (H) als Indikator heran.

Als Indikator zur Nutzung von IKT Ausrüstung kann eine Vielzahl an möglichen Variablen herangezogen werden. Wir beschränken uns einerseits auf Kenngrößen welche in beiden Versionen bzw. Perioden der EU KLEMS Datenbank nachgebildet werden können und andererseits auf ergänzende Größen welche

⁵ Man beachte, dass der Zähler der Lohnstückkosten die nominellen und nicht realen Löhne beinhaltet.

aufgrund von Datenrestriktionen nur für bestimmte Perioden verfügbar sind, jedoch im Forschungsinteresse liegen.

Als IKT-Indikator welcher für beide Perioden gebildet werden kann, steht die reale IKT Kapitalkompensation (KAP_{real}^{IKT}) pro Arbeitsstunde zur Verfügung:

$$KAPH^{IKT} = \frac{KAP_{real}^{IKT}}{H}$$

In der aktuelleren EU KLEMS Datenbank (1995-2015) stehen zusätzliche Kapitalinputdateien in ausreichender Abdeckung zur Verfügung. Daher bilden wir für diese Periode die zusätzlichen Kennzahlen realer IKT Kapitalstock pro geleistete Arbeitsstunde:

$$KH^{IKT,u} = \frac{K_{real}^{IKT,u}}{H}$$

wobei das Superskript u als Platzhalter für den Kapitalstock mit $u = 1$: Computer Hardware, $u = 2$: Telekommunikationsausrüstung und $u = 3$: Software und Datenbanken steht. In Summe werden daher drei IKT-Variablen gleichzeitig ins Modell inkludiert.

Als Kontrollvariable dienen überwiegend die in Graetz und Michaels (2018) verwendeten Größen. Eine wichtige Kontrollgröße bildet das Verhältnis zwischen den eingesetzten Produktionsfaktoren Kapital und Arbeit. Dieses Verhältnis wird in den meisten Fällen über das Verhältnis der Kompensationen (also Arbeitnehmerentgelte und Betriebsüberschuss) dargestellt:

$$KL = \frac{KAP}{ANE}$$

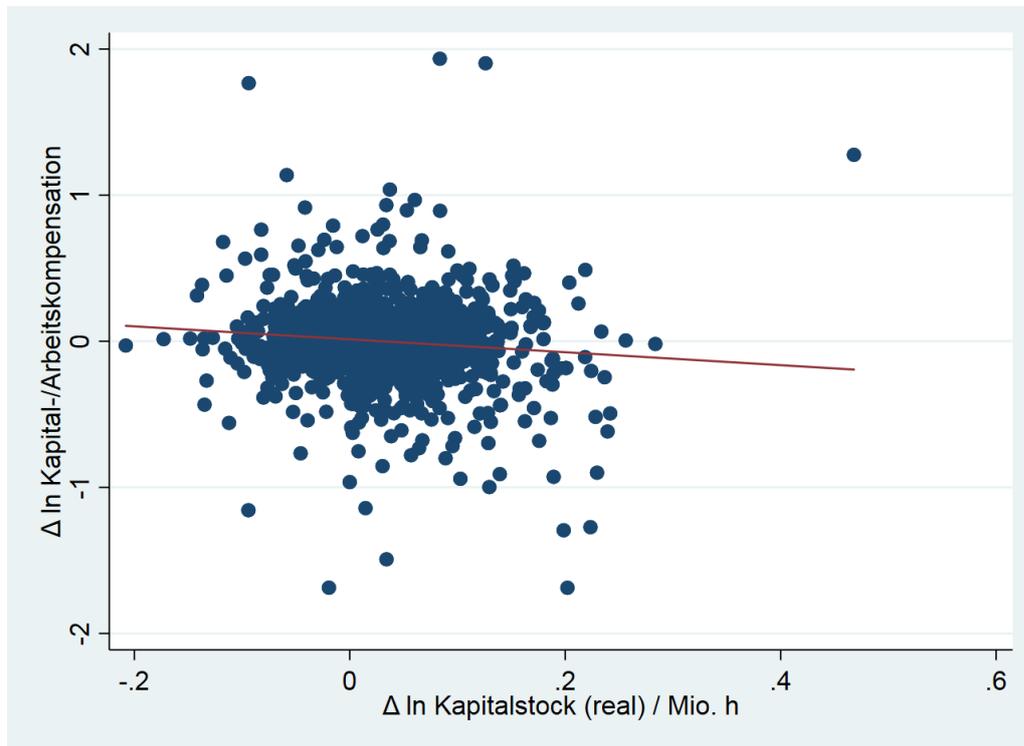
Diese Größen stellen Flussgrößen innerhalb der VGR dar, welche zur verteilungsseitigen Berechnung des Bruttoinlandsprodukt herangezogen werden. Eine andere Möglichkeit zur Messung des Kapital/Arbeitsverhältnisses wäre eine Messung über den zur Verfügung stehenden Bestand:

$$KH = \frac{K_{real}}{H}$$

was ein analoges Maß zu den zuvor dargestellten realen IKT Kapitalstöcken pro geleistete Arbeitsstunde entspricht. Diese Bestandgröße setzt keine Annahmen über die Profitabilität und Produktivität der Nutzung voraus, während das zuvor dargestellte Kompensationsverhältnis⁶ über die Darstellung der Faktorentlohnungen (und nach neoklassischer Theorie der Grenzproduktivitäten der Faktoren) implizit auf die Qualität der Nutzung des Bestands Bezug nimmt. Diese beiden Größen stellen unterschiedliche Aspekte dar und können beide gemeinsam berücksichtigt werden, da die Korrelation in der jährlichen Stichprobe 1995-2015 lediglich -0,11 beträgt (siehe Abbildung 2). Diese statistisch signifikant negative Korrelation deutet auf die fallende Grenzproduktivität bei verstärktem Faktoreinsatz hin.

Die beiden Kapitalintensitätskontrollvariablen dienen vor allem dazu den Effekt der Digitalisierung von den Entwicklungen einer generellen Kapitalintensivierung zu trennen. Es stellt sich daher die Frage, ob Investitionen in IKT und/oder Industrieroboter, lediglich über ihren direkten Effekt der Kapitalintensivierung wirken oder ob deren spezifische Qualität, bspw. über in Investitionsgütern manifestierte Technologie, weitere ergänzende Wirkungen auf Produktivität oder andere Zielgrößen entfaltet. Durch die Inklusion der Gesamtkapitalintensitätsmaße kann dieser Effekt isoliert werden.

⁶ Das Faktorkompensationsverhältnis lässt sich mit $r \cdot K / w \cdot L$, wobei r der Zinssatz, w der Stundenlohn, K der Kapitalstock und L die eingesetzten Arbeitsstunden sind, beschreiben. Die Kapitalintensität hingegen ist mit K/L gegeben und berücksichtigt damit nicht die Faktorentlohnungen.

Abbildung 2: $\Delta \ln(KH)$ vs. $\Delta \ln(KL)$, 1995-2015

Quelle: Eigene Darstellung. Anmerkung: Beobachtungen sind jährliche Wachstumsraten von Ländern und Wirtschaftsbranchen

Langfristige Spezifikationen

Die empirischen Modellspezifikationen zur Schätzung der langfristigen Effekte der Digitalisierung für T=1993-2007 bzw. 2008-2015 sind wie folgt:

$$\Delta \ln(LSTK_{i,k,T}) = \alpha_{1,i} + \beta_1 \Delta ROB_{i,k,T} + \gamma_1 \Delta \ln(KAPH_{i,k,T}^{IKT}) + \delta_1 \Delta \ln(KL_{i,k,T}) + X_{i,k} \Pi_1 + \epsilon_{1,i,k}, \quad (1)$$

$$\Delta \ln(PROD_{i,k,T}) = \alpha_{2,i} + \beta_2 \Delta ROB_{i,k,T} + \gamma_2 \Delta \ln(KAPH_{i,k,T}^{IKT}) + \delta_2 \Delta \ln(KL_{i,k,T}) + X_{i,k} \Pi_2 + \epsilon_{2,i,k}, \quad (2)$$

$$\Delta \ln(W_{i,k,T}) = \alpha_{3,i} + \beta_3 \Delta ROB_{i,k,T} + \gamma_3 \Delta \ln(KAPH_{i,k,T}^{IKT}) + \delta_3 \Delta \ln(KL_{i,k,T}) + \eta_3 \Delta \ln(PROD_{i,k,T}) + X_{i,k} \Pi_3 + \epsilon_{3,i,k}, \quad (3)$$

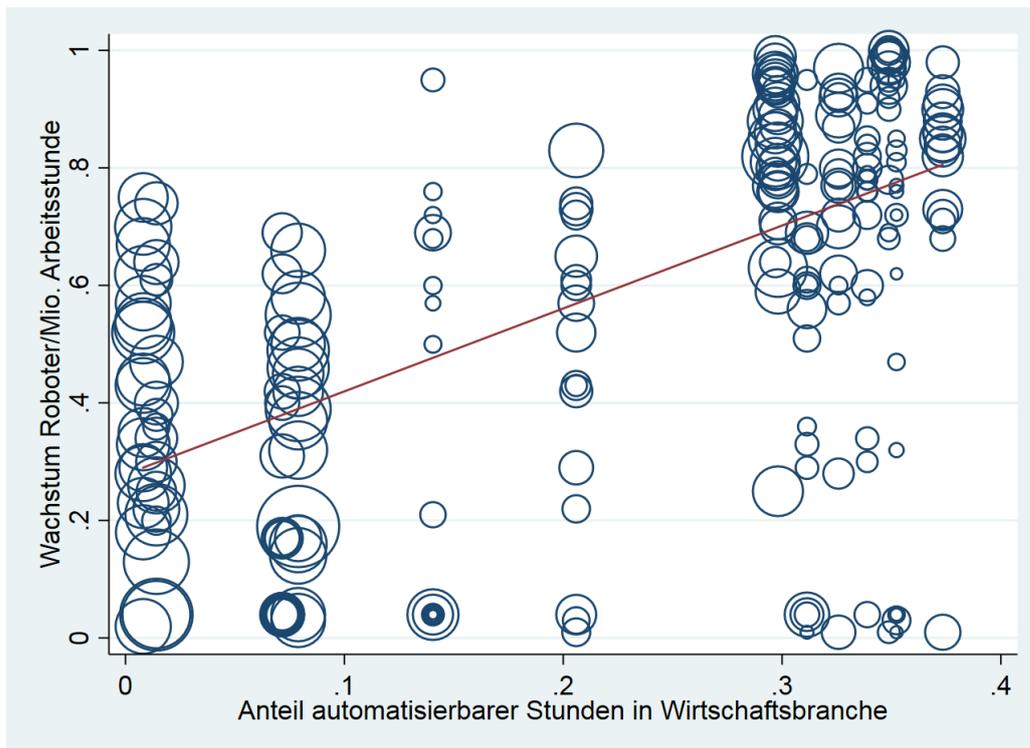
$$\Delta \ln(H_{i,k,T}) = \alpha_{4,i} + \beta_4 \Delta ROB_{i,k,T} + \gamma_4 \Delta \ln(KAPH_{i,k,T}^{IKT}) + \delta_4 \Delta \ln(KL_{i,k,T}) + \eta_4 \Delta \ln(PROD_{i,k,T}) + X_{i,k} \Pi_4 + \epsilon_{4,i,k}. \quad (4)$$

Diese Spezifikation wird 1) für alle in Tabelle 1 und Tabelle 2 angegebenen Wirtschaftsbranchen geschätzt und 2) eingeschränkt auf 9 bzw. 8 handelbare Güter produzierende bzw. im internationalen Wettbewerb befindlichen Wirtschaftsbranchen der Warenherstellung. Die Matrix $X_{i,k}$ beinhaltet als weitere Kontrollvariablen, analog zu Graetz und Michaels (2018), den Logarithmus der Löhne und des Kapital-/Arbeitskompensationsverhältnisses des Jahres Ausgangsjahres (1993 bei T=1993-2007 und 2008 bei T=2008-2015). In der Stichprobe der Periode T=1993-2007 mit allen 14 Wirtschaftsbranchen werden zudem die Veränderung der Anteile an Beschäftigten mit mittlerer bzw. hoher Qualifikation⁷ als Kontrollgrößen inkludiert. Da dieser Anteil nur für die grobe NACE 1-Steller - und damit nur ein Anteil für

⁷ Als hohe Qualifikation gilt ein Universitätsabschluss (ISCED 5-6) und als mittlere Qualifikation ein formaler Bildungsabschluss, im Gegensatz zu niedriger Qualifikation ohne formalen Abschluss.

die gesamte Warenherstellung – verfügbar sind, wird diese Kontrollgröße nur für Stichproben mit allen Wirtschaftsbranchen herangezogen. In den Spezifikationen (3) Reallöhne und (4) Arbeitsstunden kontrollieren wir zusätzlich für den Einfluss der Produktivitätsentwicklung. Da in den meisten entwickelten Ländern eine produktivitätsbasierte Lohnsetzungspolitik erfolgt erscheint dies für (3) gerechtfertigt. Hinsichtlich der eingesetzten Arbeitsstunden kontrollieren wir für mögliche Rationalisierungseffekte⁸ bzw. induzierte Nachfrageeffekte⁹ von Produktivität auf Beschäftigung. In den Spezifikationen (3) und (4) kann auch getestet werden ob die Digitalisierung über die Produktivität hinausgehende Wirkungen auf Reallöhne und Beschäftigung entfaltet.

Abbildung 3: Ersetzbare Arbeitsstunden vs. Perzentil des Wachstums der Roboterdichte, 1993-2007



Quelle: Eigene Darstellung. Anmerkungen: Trendgerade basiert auf einer mit Wertschöpfungsanteilen gewichteten Regression. Größe der Kreise gibt die Wertschöpfungsanteile wieder.

Alle Spezifikationen werden mit fixen Ländereffekten ($\alpha_{i,t}$) geschätzt. Da die Modelle in Differenzen geschätzt werden, bildet bspw. der Parameter $\alpha_{1,1}$ den Wachstumstrend der Lohnstückkosten aller Wirtschaftsbranchen des ersten Landes in der Stichprobe ab. Dieser Effekt wird über die Beobachtungen der Wirtschaftsbranchen identifiziert und ist somit für alle Wirtschaftsbranchen gleich. Die Beobachtungen werden mittels des Wertschöpfungsanteils der Wirtschaftsbranche zu Beginn der Periode, also 1993 für $T=1993-2008$ und 2008 für $T=2008-2015$, gewichtet. Weiters werden alle Standardfehler Heteroskedastizitätsrobust und auf Ebene der Länder und Wirtschaftsbranchen¹⁰ gruppiert („clustered“) ausgegeben.

⁸ Rationalisierungseffekt ergibt sich durch einen geringeren Bedarf an Beschäftigung aufgrund höherer Produktivität.

⁹ Nachfrageeffekte führen zu einer Ausweitung der Beschäftigung aufgrund von gesteigerter Nachfrage durch attraktivere Preise (Weitergabe der Produktivitätsvorteile an den Konsumenten).

¹⁰ Wir folgen hier Abadie et al. (2017), wonach die Standardfehler gruppiert werden sollten, wenn nur eine Teilmenge der Grundpopulation in der Stichprobe enthalten ist. In diesem Falle betrachten wir nur bestimmte Ländern und Wirtschaftsbranchen,

Um Endogenitätsprobleme aufgrund Messfehlern, umgekehrter Kausalität bzw. Simultanität zwischen unseren Digitalisierungsvariablen und den Zielgrößen abzumildern, instrumentieren wir die Roboterichte, mittels des Anteils der durch Industrieroboter ersetzbaren Arbeitsstunden der Wirtschaftsbranche der USA im Jahr 1980 (siehe Graetz und Michaels, 2018 für genauere Informationen zur Konstruktion und Validität dieses Instruments). Abbildung 3 zeigt ein Streudiagramm mit dem Perzentil des Wachstums der Roboterichte auf der Abszisse und dem Anteil der durch Industrieroboter ersetzbaren Arbeitsstunden der Wirtschaftsbranchen auf der Ordinate, für die Stichprobe aller Wirtschaftsbranchen der Periode 1993-2007. Die Beobachtungen sind mit dem Beschäftigungsanteil der Wirtschaftsbranche des Jahres 1993 gewichtet und die rote Gerade stellt die Trendgerade einer gewichteten Regression dar.

Graetz und Michaels (2018) fokussierten ihre Analysen auf die kausalen Effekte des Einsatzes von Industrierobotern auf die Produktivität und andere Kerngrößen. Die dafür vorgebrachten Vorbehalte hinsichtlich Endogenität bzw. Simultanität können analog auch für IKT Variablen vorgebracht werden und daher müssten auch für diese Größen geeignete Instrumente gefunden werden. Da eine solche Analyse den Rahmen der vorliegenden Studie sprengen würde, wird ein anderer Lösungsweg zur Abmilderung des Endogenitätsproblems herangezogen.

Da das Instrument der Anteile an ersetzbaren Arbeitsstunden je Wirtschaftsbranche auf Basis von US Daten des Jahres 1980 für alle Länder gleich ist und nur über die Wirtschaftsbranchen variiert, können alternativ zum Instrument fixe Effekte auf Ebene der Wirtschaftsbranche¹¹ verwendet werden. Wir wiederholen daher die Analysen für die Periode 2008-2015¹² mit fixen Wirtschaftsbrancheneffekten statt Instrumenten und vertiefen gleichzeitig die Analyse des IKT Kapitals. Da innerhalb der EU KLEMS Version 2017 ausreichend Daten über die Kapitalstöcke nach ESVG 2010 Investitionskategorien zur Verfügung stehen, inkludieren wir die realen Kapitalstöcke je Mio. Arbeitsstunde für Computer und Hardware, Telekommunikationsausrüstung und zusätzlich für Software und Datenbanken. Letzteres Kapitalgut zählt laut ESVG 2010 zwar nicht zur IKT Investitionskategorie, erscheint jedoch zur Abbildung der Digitalisierungseffekte geeignet. Die entsprechenden Spezifikationen für T=2008-2015 lauten:

$$\Delta \ln(LSTK_{i,k,T}) = \alpha_{5,i} + \beta_5 \Delta ROB_{i,k,T} + \sum_{u=1}^3 \gamma_{5,1} \Delta \ln(KH_{i,k,T}^{IKT,u}) + \theta_5 \Delta \ln(KH_{i,k,T}) + \delta_5 \Delta \ln(KL_{i,k,T}) + X_{i,k} \Pi_5 + \mu_{5,k} + \epsilon_{5,i,k}, \quad (5)$$

$$\Delta \ln(PROD_{i,k,T}) = \alpha_{6,i} + \beta_6 \Delta ROB_{i,k,T} + \sum_{u=1}^3 \gamma_{6,1} \Delta \ln(KH_{i,k,T}^{IKT,u}) + \theta_6 \Delta \ln(KH_{i,k,T}) + \delta_6 \Delta \ln(KL_{i,k,T}) + X_{i,k} \Pi_6 + \mu_{6,k} + \epsilon_{6,i,k}, \quad (6)$$

$$\Delta \ln(W_{i,k,T}) = \alpha_{7,i} + \beta_3 \Delta ROB_{i,k,T} + \sum_{u=1}^3 \gamma_{7,1} \Delta \ln(KH_{i,k,T}^{IKT,u}) + \theta_7 \Delta \ln(KH_{i,k,T}) + \delta_7 \Delta \ln(KL_{i,k,T}) + \eta_7 \Delta \ln(PROD_{i,k,T}) + X_{i,k} \Pi_7 + \mu_{7,k} + \epsilon_{7,i,k}, \quad (7)$$

$$\Delta \ln(H_{i,k,T}) = \alpha_{8,i} + \beta_8 \Delta ROB_{i,k,T} + \sum_{u=1}^3 \gamma_{8,1} \Delta \ln(KH_{i,k,T}^{IKT,u}) + \theta_8 \Delta \ln(KH_{i,k,T}) + \delta_8 \Delta \ln(KL_{i,k,T}) + \eta_8 \Delta \ln(PROD_{i,k,T}) + X_{i,k} \Pi_8 + \mu_{8,k} + \epsilon_{8,i,k}. \quad (8)$$

In den Spezifikationen (5) bis (8) sind die Wirtschaftsbrancheneffekten mit $\mu_{.,k}$ bezeichnet. Wie schon zuvor bei den Ländereffekten, bildet bspw. der Parameter $\mu_{6,5}$ aufgrund der Differenzierung aller Variablen den Wachstumstrend der Produktivität der fünften Wirtschaftsbranche ab. Dieser Trend wird über die Beobachtungen der Länder identifiziert und ist somit für alle Länder gleich.

für welche eine vollständige Datenbasis vorliegt. Daher gruppieren wir die Standardfehler auf der Ebene der Länder und Wirtschaftsbranchen, sofern genügend Beobachtungen pro Gruppe vorliegen.

¹¹ Man beachte, dass fixe Wirtschaftsbrancheneffekte, alle Variablen welche nur zwischen den Branchen, jedoch nicht über die Länder hinweg variieren, absorbieren und somit alle diese Variablen kollinear sind und aus den Spezifikationen fallen. Der Vorteil der fixen Wirtschaftsbrancheneffekte ist, dass diese alle auf Ebene der Wirtschaftsbranche unbeobachteten Effekte einfangen und somit das Problem der fehlenden Kontrollgrößen (*omitted variable bias*) minimiert wird.

¹² Die Ergebnisse für die Periode 1993-2007, mit Ausnahme der Lohnstückkosten, decken sich im Wesentlichen mit den Robustheitsanalysen im Anhang von Graetz und Michaels (2018) und werden daher nicht gesondert dargestellt.

Die Intensität der IKT-Nutzung wird über den realen Kapitalstock der drei Investitionskategorien Computer Hardware ($u = 1$), Telekommunikationsausrüstung ($u = 2$) und Software und Datenbanken ($u = 3$) pro Mio. geleistete Arbeitsstunden abgebildet. Um die qualitativen Aspekte dieser Kapitalstockkategorien besser einzufangen, enthalten diese Spezifikationen ebenfalls die reale Intensitätsentwicklung des gesamten Kapitalstocks ($KH_{i,k,t}$). Zusätzlich dazu kontrollieren wir für die Entwicklung des Verhältnisses zwischen Kapital- und Arbeitskompensation.

Kurzfristige Spezifikationen

Abseits der langfristigen Auswirkungen von Digitalisierung auf die Entwicklung der Lohnstückkosten und verwandter Größen, analysieren wir zudem die kurzfristigen Wirkungen. Hierzu spezifizieren wir ein Modell auf Basis von jährlichen Veränderungsdaten und kontrollieren für unbeobachtete Trends mittels umfangreicher fixer Effekte. Verglichen mit den langfristigen Spezifikationen ermöglicht die zusätzliche Dimension der Zeitperioden es drei spezifische unbeobachtete Trends abzufangen: (a) Länder-Wirtschaftsbranche, (b) Länder-Periode, (c) Wirtschaftsbranche-Periode. Bei den Länder-Wirtschaftsbranchen-Effekten wird ein Parameter pro Länder-Wirtschaftsbranchen Paar¹³ spezifiziert. Dieser Parameter fängt Trends in den jährlichen Wachstumsraten der Zielvariablen innerhalb einer bestimmten Branche eines bestimmten Landes (bspw. KFZ in der Slowakei) ein. Diese Effekte kontrollieren für Niveauunterschiede oder Initialwerte (bspw. F&E-Intensität im Ausgangsjahr 1995). Die Länder-Perioden-Effekte weisen einen Parameter pro Land-Perioden Paar auf und fangen damit gemeinsame Wachstumstrends aller Wirtschaftsbranchen innerhalb eines bestimmten Landes und bestimmten Jahres ein (bspw. 2009 in Deutschland). Effekte dieser Art kontrollieren bspw. für Inflation, Arbeitsmarkt oder Outputgap. Bei den Wirtschaftsbranchen-Periodeneffekt wird für jedes Branchen-Perioden Paar ein Parameter definiert, womit für Wachstumstrends einer bestimmten Wirtschaftsbranche für ein bestimmtes Jahr kontrolliert wird (bspw. Textilindustrie in 1997). Diese Effekte subsumieren bspw. Veränderungen in den Marktanteilen von China oder globale branchenspezifische Preisschocks.

Mittels dieser umfassenden Kontrolle entfällt die Notwendigkeit Kontrollvariablen welche nicht über alle der drei Dimensionen des Datensatzes (Länder, Jahre, Wirtschaftsbranchen) variieren zu inkludierten, da diese über jeweils einen der drei fixen Effekte abgebildet werden. Darunter fällt bspw. die Inflationsrate, der Output Gap oder die natürlich Arbeitslosenrate, welche als Kontrollgrößen für die Lohnstückkosten inkludiert werden könnten. Diese Variablen werden alle über die Länder-Perioden-Effekte abgebildet. Die entsprechenden ökonometrischen Spezifikationen zu den kurzfristigen Einflüssen der Digitalisierung sind wie folgt:

$$\Delta \ln(LSTK_{i,k,t}) = \beta_9 \Delta ROB_{i,k,t} + \sum_{u=1}^3 \gamma_{9,u} \Delta \ln(KH_{i,k,t}^{IKT,u}) + \theta_9 \Delta \ln(KH_{i,k,t}) + \delta_5 \Delta \ln(KL_{i,k,t}) \quad (9)$$

$$\varphi_{9,i,k} + \rho_{9,i,t} + \tau_{9,k,t} + \epsilon_{9,i,k},$$

$$\Delta \ln(PROD_{i,k,t}) = \beta_{10} \Delta ROB_{i,k,t} + \sum_{u=1}^3 \gamma_{10,u} \Delta \ln(KH_{i,k,t}^{IKT,u}) + \theta_{10} \Delta \ln(KH_{i,k,t}) + \delta_{10} \Delta \ln(KL_{i,k,t}) \quad (10)$$

$$\varphi_{10,i,k} + \rho_{10,i,t} + \tau_{10,k,t} + \epsilon_{10,i,k},$$

$$\Delta \ln(W_{i,k,t}) = \beta_{11} \Delta ROB_{i,k,t} + \sum_{u=1}^3 \gamma_{11,u} \Delta \ln(KH_{i,k,t}^{IKT,u}) + \theta_{11} \Delta \ln(KH_{i,k,t}) + \delta_{11} \Delta \ln(KL_{i,k,t}) \quad (11)$$

$$+ \eta_{11} \Delta \ln(PROD_{i,k,t}) + \varphi_{11,i,k} + \rho_{11,i,t} + \tau_{11,k,t} + \epsilon_{11,i,k},$$

$$\Delta XMA_{i,k,t} = \beta_{13} \Delta ROB_{i,k,t} + \sum_{u=1}^3 \gamma_{13,u} \Delta \ln(KH_{i,k,t}^{IKT,u}) + \theta_{13} \Delta \ln(KH_{i,k,t}) + \delta_{13} \Delta \ln(KL_{i,k,t}) \quad (12)$$

$$+ \pi_{13} \Delta \ln(LSTK_{i,k,t}) + \varphi_{13,i,k} + \rho_{13,i,t} + \tau_{13,k,t} + \epsilon_{13,i,k}.$$

¹³ Streng genommen ein Parameter pro Paar abzüglich eines Paares zur Vermeidung der Dummy-Variablen Falle (*dummy variable trap*).

Die fixen Effekte auf Ebene der Länder-Wirtschaftsbranchen sind mit $\varphi_{i,k}$, die der Länder-Periode mit $\rho_{i,t}$ und jene der Wirtschaftsbranche-Periode mit $\tau_{k,t}$ bezeichnet. Das Periodensubskript t ist der Periodenindex $t = 1996, 1997, \dots, 2015$ wobei durch die Differenzbildung die erste Periode 1995 der Stichprobe der EU KLEMS 2017 Version entfällt.

Spezifikation (12) enthält als erklärende Größe das Wachstum des Exportmarktanteils in Prozentpunkten und kontrolliert zusätzlich für das Wachstum der Lohnstückkosten. Hierbei wird erwartet, dass die Lohnstückkosten negativ auf die Entwicklung der Marktanteile wirken. Darüber hinaus soll die Hypothese getestet werden ob die verwendeten Maße der Digitalisierung über die Lohnstückkosten hinaus Auswirkungen auf die Marktanteile haben. Dies könnte beispielsweise dann der Fall sein, wenn verstärkte Digitalisierung zu einer flexibleren und individualisierten Produktpalette führt, womit Wettbewerbsvorteile abseits von Kostenfaktoren lukriert werden könnten. Die Entwicklung der Exportmarktanteile wird nur innerhalb der kurzen Frist analysiert. Der Grund dafür liegt darin, dass langfristige Differenzen stark von der Wahl Anfangs- und Endperiode abhängig sind. Es wurden auch Schätzungen der entsprechenden langfristigen Spezifikationen zu den Exportmarktanteilen geschätzt, die Ergebnisse waren jedoch äußerst sensibel hinsichtlich der Auswahl der Perioden, tragen somit zu keinem Erkenntnisgewinn bei und werden aus Gründen der Übersichtlichkeit der Studie nicht gesondert ausgewiesen.

Bezüglich der Spezifikationen (9) bis (12) sei angemerkt, dass, wie auch für die Spezifikationen (5) bis (8), im engeren Sinne keine Interpretation der Koeffizienten als kausale Effekte erfolgen kann. Die Inklusion von fixen Effekten sollte zwar dazu führen, dass mögliche Verzerrungen der Effekte abgemildert werden, jedoch wird keine exogene Quelle an Variation genutzt um einen direktionalen Effektkanal zu identifizieren. Vor allem bei der Betrachtung von jährlichen Wachstumsraten ist das Problem der Simultanität allgegenwärtig. In der empirischen Literatur wurde dabei häufig der fehlerhafte Ansatz gewählt, zeitlich verzögerte erklärende Größen zu verwenden. Reed (2015) zeigte jedoch theoretisch und über Monte Carlo Simulationen, dass hierbei mit starken Verzerrungen und fehlgeleiteten Interpretation zu rechnen ist. Als Lösungsweg wird vorgeschlagen die kontemporären erklärenden Variablen durch deren verzögerte Werte zu instrumentieren. Da Wachstumsraten in den meisten Fällen keine Integration, also starke Korrelation mit ihren vergangenen Werten, aufweisen erweist sich dieser Ansatz in der vorliegenden Anwendung als wenig hilfreich.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin den kontemporären und eine bestimmte Anzahl an zeitlich verzögerten Werten gleichzeitig in die Spezifikation aufzunehmen. Die entsprechende Linearkombination der Koeffizienten kann dann als Gesamteffekt interpretiert werden. Ein großer Nachteil dabei besteht darin, dass die Auswahl Verzögerungsstruktur arbiträr ist und es Probleme bei der Interpretation der Koeffizienten bereitet wenn bspw. lediglich die Wachstumsrate der Roboterichte von $t - 5$ statistisch signifikant ist, oder ständig wechselnde Vorzeichen über die verzögerten Größen vorgefunden werden. Zudem lassen sich die Effekte einer Linearkombination von Koeffizienten ab einer gewissen zeitlichen Verzögerungen (bspw. $t - 3$) nicht mehr als kurzfristiger Effekt interpretieren. Aus diesen Gründen verbleiben wir bei einer Spezifikation von lediglich kontemporären (t) erklärenden Variablen und weisen auf das Problem der Simultanität und dessen Auswirkung auf die Interpretation der Ergebnisse hin. Eine Folge die sich daraus ergibt ist, dass keine kurzfristige Spezifikation über die geleisteten Arbeitsstunden geschätzt wird. Der Grund dafür ist, dass die geleisteten Arbeitsstunden jeweils im Zähler der Roboterichte und der IKT-Kapitalstockintensitäten vorkommen und kurzfristige Schwankungen in der Beschäftigung welche stärker als die kurzfristigen Veränderungen der Digitalisierung ausfallen zu einer (negativen) Scheinkorrelation führen können.

4 Daten

Die ökonometrischen Analysen benötigen Daten über die Nutzung von IKT-Kapitalgütern und Industrierobotern, Wertschöpfung, Löhne, gearbeitete Stunden, Kapitalstock und Exporte auf Wirtschaftszweigebene. Aus diesen Daten werden die Variablen Intensität des IKT-Kapitalstocks, Roboterichte, Produktivität, Lohnstückkosten, Marktanteil und Kapital/Arbeitsverhältnis abgeleitet.

EU KLEMS

Als Hauptquelle für internationale ökonomische Zeitreihen auf Ebene der Wirtschaftsbranchen dienen die EU KLEMS¹⁴ *Growth and Productivity Accounts*. Da der Betrachtungszeitraum der Studie die Periode 1993 bis 2015 umfasst verwenden wir die 2009 Version (1970-2007, Nace Rev. 1.1.) für die Analysen vor der Finanz- und Wirtschaftskrise und die 2017 Version (1995-2015, Nace Rev. 2) für die Jahre danach. In der 2009 Version ist ein an die OECD angelehntes Ländersample mit 25 Ländern der EU, den USA, Japan, Australien und Korea enthalten. Die aktuellere Version von 2017 umfasst die Länder der EU-28 und die USA. Jede Version der EU KLEMS Datenbank umfasst drei unterschiedliche Datendateien, wobei nicht für jedes Land und jede Periode Daten in jedem dieser drei Dateien enthalten sind.

Die größte Abdeckung besteht in den Basisdateien, welche pro Jahr, Land und Wirtschaftsbranche Daten zu Arbeitnehmerentgelten, Betriebsüberschüssen, Wertschöpfung, unselbständige und selbständige Beschäftigung bzw. gearbeitete Stunden und dem Gesamtkapitalstock (alle Investitionsgüterkategorien aggregiert) enthalten. Es sind nominelle, reale sowie die verwendeten Deflatoren verfügbar.

Der zweite Typ an Dateien enthält detailliertere Daten zu den Kategorien der Investitionen und Kapitalstöcke. Für die Periode 1970-2007 sind nur für wenige Länder diese detaillierten Daten verfügbar. In der aktuelleren Version für die Periode 1995-2015 werden die Investitionen und Kapitalstöcke gemäß dem ESVG 2010 klassifiziert. Die für diese Studie relevanten Kategorien sind Computer Hardware (N11321G), Telekommunikationsausrüstung (N11322G) und Software und Datenbanken (N1173G), wobei streng genommen nur die Güter der ersten beiden Kategorien unter Ausrüstungen der Informations- und Kommunikationstechnik (AN.1132) fallen. Zur Verfügung stehen nominelle und reale Daten über Bruttoanlageinvestitionen sowie ein mittels Kumulationsmethode berechneter nomineller und realer Kapitalstock.

Innerhalb der dritten Datendatei werden detailliertere Informationen zum Arbeitsinput bereitgestellt. Enthalten sind die Anteile der Arbeitsstunden bzw. Arbeitskompensation von Frauen und Männern nach drei Altersgruppen und drei Bildungskategorien. Die Wirtschaftsbranchen sind innerhalb dieser Quelle jedoch nur für die aggregierten Abschnitte der NACE 1.1 bzw. 2 und nicht nach detaillierteren Abteilungen enthalten.

Fehlende Daten wurden zum Teil interpoliert bzw. mittels gleichwertiger Daten aus der OECD STAN Datenbank (siehe weiter unten) ergänzt.

World Robotics

Daten über Lieferungen und Installationen von Industrierobotern pro Jahr, Land und Wirtschaftsbranchen entstammen der 2017 Version der Datenbank der *International Federation of Robotics* (IFR). Industrieroboter werden innerhalb der IFR definiert als:

¹⁴ Siehe Jäger (2017) für die September 2017 Version (NACE Rev. 2) und O'Mahony und Timmer (2009) für das März 2011 Update der November 2009 Version (NACE Rev. 1.1.).

„Industrial robot as defined by ISO 8373:2012: An automatically controlled, reprogrammable, multipurpose manipulator programmable in three or more axes, which can be either fixed in place or mobile for use in industrial automation applications.“ (siehe IFR, 2017, Seite 32)

Die IFR erhebt die Lieferungen eines Großteils der weltweiten Industrieroboterproduzenten und berechnet unter der Annahme einer 12-jährigen Lebensdauer¹⁵ Bestandsdaten. Aufgrund von Umstellungen in den Erhebungsmethoden und Ausweitungen des Erfassungsgrades hinsichtlich Länder und Branchen, variiert die Qualität der Daten¹⁶ je nach Land und Periode. Zudem werden in einigen Ländern erst beginnend mit späteren Perioden Daten nach Wirtschaftsbranche aufgeschlüsselt ausgewiesen. So bestehen bspw. für Österreich beginnend mit dem Jahr 2003 Daten nach Wirtschaftsbranchen.

Die Rohdaten der IFR können daher nicht unmittelbar für ökonometrische Analysen herangezogen werden, sondern müssen erst umfassend bereinigt und aufbereitet werden. Dazu übernehmen wir gänzlich die Datenbereinigung von Graetz und Michaels (2018), welche als Software-Code frei verfügbar ist. Darin werden die Daten zu Nordamerika auf die einzelnen Länder disaggregiert, fehlende Wirtschaftsbranchendaten früherer Perioden mittels später beobachteter Anteile interpoliert und abschließend die Industrieroboterbestände mittels der Kumulationsmethode (Perpetual-Inventory-Method) und einer unterstellten Abschreibungsrate von 10 Prozent berechnet. Weiters übernehmen wir die Zuordnung der Branchenklassifikation der IFR zu jener der NACE Rev. 1.1 bzw. ISIC aus Graetz und Michaels (2018). Adaptionen und Abweichungen vom der Bereinigungs- und Berechnungsroutinen betreffen die Ausweitung der Stichprobe auf das Jahr 2016 und die Länder Slowakei und Tschechien. Zudem wurde auch eine eigene Zuordnung der Wirtschaftsbranchenklassifikation der IFR auf die neuere NACE Rev. 2 bzw. ISIC Rev. 4 Klassifikation vorgenommen.

OECD

Aus den Datenbeständen der OECD wurde zu den EU KLEMS Daten die Wirtschaftsbranchen Datenbank STAN (Structural Analysis) ergänzt. Fehlende Werte zu Wertschöpfung und Beschäftigung wurden mittels der Wachstumsraten der gleichwertigen Zeitreihen der STAN Datenbank interpoliert.

Als zweite Datenbank wurde die Bilateral Trade in Goods by Industry and End-use (BTDIxE), ISIC Rev.4 herangezogen. Darin enthalten sind direktionale Exporte und Importe nach NACE Rev. 2 über die Zeit. Als Berichtsländer stehen die Länder der OECD zur Verfügung während als Handelspartner fast alle Länder der Welt zur Verfügung stehen. Da der weltweite Marktanteil im Zentrum des Interesses steht wurde vereinfachend das Aggregat „Welt“ gewählt.

Stichproben

In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind die jeweils betrachteten Wirtschaftsbranchen der Stichproben 1970-2007 und 1995-2015. Im Kern der Analysen stehen stets die einzelnen Wirtschaftsbranchen der Warenherstellung, wobei hier elf Branchen in der ersten und zehn in der zweiten Hälfte des Beobachtungszeitraums zur Verfügung stehen. Graetz und Michaels (2018) berücksichtigten in ihren Analysen darüber hinaus noch die in roter Schrift enthaltenen fünf Branchen, da hierfür zuordenbare Industrieroboterdaten verfügbar sind.

¹⁵ Allerdings erachtet die IFR diese Lebensdauer in ihren Berichten selbstkritisch als zu niedrig. Die Ergebnisse einer Studie der UNECE/IFR des Jahres 2000 deuten auf Nutzungsdauern von etwa 15 Jahren hin.

¹⁶ Bis 2011 wurden die Daten für USA, Mexiko und Kanada als Aggregat „Nordamerika“ ausgewiesen. Für Japan wurden bis inklusive 2000 auch Roboter welche über die Definition der IFR hinausgehen erfasst. Beginnend mit 2014 wurden aufgrund neuer Datenschutzbestimmungen keine Lieferungen für die Länder Australien, Bulgarien, Estland, Griechenland, Irland, Litauen, Lettland und Malta mehr verzeichnet. Siehe hierzu auch IFR (2017) Kapitel 1.

Tabelle 1: Verwendete Wirtschaftsbranchen EU KLEMS 1970-2007 Stichprobe

| | NACE 1.1 / ISIC 3 | Bezeichnung |
|----|--------------------------|--|
| 1 | 15t16 | Herstellung von Nahrungs- und Genussmitteln, Tabakverarbeitung |
| 2 | 17t19 | Herstellung von Textilien und Bekleidung |
| 3 | 20 | Herstellung von Holz sowie Holz-, Kork- und Flechtwaren (ohne Herstellung von Möbeln) |
| 4 | 21t22 | Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, Verlags- und Druckerzeugnissen |
| 5 | 23t25 | Kokerei, Mineralölverarbeitung, Herstellung und Verarbeitung von Spalt- und Brutstoffen, chemische Erzeugnisse, Gummi- und Kunststoffwaren |
| 6 | 26 | Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden |
| 7 | 27t28 | Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen |
| 8 | 30t33 | Herstellung von Büromaschinen, Datenverarbeitungsgeräten und -einrichtungen; Elektrotechnik, Feinmechanik und Optik |
| 9 | 34t35 | Fahrzeugbau |
| 10 | AtB | Land-, Forstwirtschaft, Fischerei und Fischzucht |
| 11 | C | Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden |
| 12 | E | Energie- und Wasserversorgung |
| 13 | F | Bau |
| 14 | M | Erziehung und Unterricht |

Quelle: Eigene Darstellung.

Die erste Stichprobe für die ökonomischen Schätzungen zu den langfristigen Effekte zwischen 1993-2007 (EU KLEMS 2009 Version) enthält die 15 Länder Australien, Österreich, Belgien, Dänemark, Spanien, Finnland, Frankreich, Deutschland, Ungarn, Irland, Italien, die Niederlande, Schweden, das Vereinigte Königreich und die USA. Die mit dieser Stichprobe korrespondierenden 14 bzw. für die Warenherstellung 9 Wirtschaftsbranchen sind Tabelle 1 dargestellt. Die auf Basis der ökonomischen Spezifikation vergleichbare zweite Stichprobe für die langfristige Periode 2008-2015 (EU KLEMS Version 2017) umfasst die 14 Länder Österreich, Belgien, Tschechien, Deutschland, Dänemark, Spanien, Finnland, Frankreich, Italien, die Niederlande, Schweden, Slowakei, das Vereinigte Königreich und die USA. Die 13 bzw. für die Warenherstellung 8 inkludierten Wirtschaftsbranchen sind in Tabelle 2 aufgelistet. Diese zwei Stichproben werden auf die Spezifikationen (1) bis (4) angewandt.

Die dritte Stichprobe für die Periode 2008-2015 umfasst mit Ausnahme Belgiens, für das keine Kapitalinputdatei der EU KLEMS Version 2017 zur Verfügung stand, die gleichen Länder und Wirtschaftsbranchen. Spezifikationen (5) bis (8) greifen auf die dritte Stichprobe zurück.

Die vierte Stichprobe, welche für die ökonomischen Schätzungen auf Basis der jährlichen Veränderungsraten – kurze Frist – herangezogen wird, beinhaltet die 13 Länder der zweiten Stichprobe, beschränkt sich jedoch auf die 8 Wirtschaftsbranchen der Warenherstellung.

Es wurde bei allen Stichproben darauf geachtet, dass die inkludierten Länder und Wirtschaftsbranchen für alle Zielvariablen (Lohnstückkosten, Produktivität, Reallöhne, Arbeitsstunden, Exportmarktanteile) gleich verbleiben, sodass sich keine Sondereffekte aufgrund der konkreten Stichprobenauswahl ergeben können. Dies hat zur Folge, dass bspw. die Anteile von mittel- und hochqualifizierten Arbeitskräften nicht als Kontrollgröße für die zweite Stichprobe herangezogen werden können, da keine Daten für die USA verfügbar waren. Zudem wurde innerhalb jeder Stichprobe eine idente Methode zur Berechnung von robusten Standardfehlern angewandt, damit auch statistische Signifikanzniveaus vergleichbar sind.

Tabelle 2: Verwendete Wirtschaftsbranchen EU KLEMS 1995-2015 Stichprobe

| | NACE 2 / ISIC 4 | Bezeichnung |
|----|------------------------|---|
| 1 | 10-12 | Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln, Getränke, Tabak |
| 2 | 13-15 | Herstellung von Textilien, Bekleidung, Leder, Lederwaren und Schuhen |
| 3 | 16-18 | Herstellung von Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren (ohne Möbel), Papier, Pappe und Waren daraus, Druckerzeugnissen; Vervielfältigung von bespielten Ton-, Bild- und Datenträgern |
| 4 | 20-21 | Herstellung von chemischen Erzeugnissen und pharmazeutischen Erzeugnissen |
| 5 | 22-23 | Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren, Glas, Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden |
| 6 | 24-25 | Metallerzeugung und -bearbeitung und Herstellung von Metallerzeugnissen |
| 7 | 26-27 | Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen und elektrischen Ausrüstungen |
| 8 | 29-30 | Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen und sonstiger Fahrzeugbau |
| 9 | A | Land- und Forstwirtschaft, Fischerei |
| 10 | B | Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden |
| 11 | DE | Energie-, Wasserversorgung; Abwasser- und Abfallentsorgung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen |
| 12 | F | Baugewerbe/Bau |
| 13 | P | Erziehung und Unterricht |

Quelle: Eigene Darstellung.

5 Ergebnisse

Die Ergebnisse der in Abschnitt 3 dargestellten ökonomischen Spezifikationen sind in Tabelle 3 bis Tabelle 6 zusammengefasst.

Betrachten wir zunächst die Ergebnisse der langfristigen Effekte der Periode 1993-2007 in Tabelle 3. Die Spaltennummerierung bezieht sich auf die jeweilige in Abschnitt 3 dargestellte Spezifikation, während der Zusatz a) bedeutet, dass in der Stichprobe alle Wirtschaftsbranchen und b), dass nur Branchen der Warenherstellung inkludiert wurden. In allen Spezifikationen wurde die Roboterdichte instrumentiert, wobei die F-Statistik (höhere Werte deuten auf ein stärkeres Instrument hin; F-Statistiken unter dem Wert 10 deuten auf ein schwaches Instrument hin) der ersten Stufe auf ein starkes Instrument hindeutet, wenngleich auch in geringerem Maße für die auf die Warenherstellung eingeschränkte Stichprobe.

Hinsichtlich der Produktivität und Reallöhne zeigen sich bei Betrachtung aller Wirtschaftsbranchen erwartungsgemäß ähnliche Ergebnisse wie in Graetz und Michaels (2018). Branchen, welche aufgrund ihres Anteils an automatisierbaren Arbeitsstunden eine höhere Industrieroboterpenetration aufgewiesen haben, hatten eine signifikant schwächere Lohnstückkostenentwicklung (1a). Dieser Effekt ergibt sich daraus, dass die zusätzlichen Roboter je Beschäftigungsstunde die Produktivität (2a) stärker erhöhten als die Reallöhne (3a). Es zeigt sich kein statistisch signifikanter Effekt der Automatisierung (Industrieroboter) auf die geleisteten Arbeitsstunden (4a).

Ähnlich verhält es sich bei unserem zweiten Maß der Digitalisierung, der IKT-Nutzung. Diese weist die gleichen Vorzeichen wie die Industrieroboterdichte auf. Die Ergebnisse deuten auf statistisch signifikante positive Effekte für die Produktivität (2a) und Reallöhne (3a), und negative Effekte auf die geleisteten Arbeitsstunden (4a) hin. Bei der Interpretation sollte darauf geachtet werden, dass die IKT-Kapitalkompensation je geleisteter Arbeitsstunde nicht instrumentiert wurde und daher keine kausale Interpretation vorliegt. Für die Stichprobe mit allen Wirtschaftsbranchen zeigt sich zudem eine positive Korrelation zwischen Produktivitäts- und Reallohnentwicklung (3a) und eine statistisch nicht signifikante negative Korrelation zwischen Produktivitäts- und Beschäftigungsentwicklung (4a). Das Verhältnis von Kapital- zu Arbeitskompensation ist hingegen signifikant positiv mit der Entwicklung der Beschäftigung (4a) assoziiert. Abseits davon finden sich keine signifikanten Einflüsse dieser Kontrollgröße.

Richten wir nun den Fokus auf die Ergebnisse auf Basis der Stichprobe mit ausschließlich Wirtschaftsbranchen der Warenherstellung (WH). Die Stichprobengröße verringert sich merkbar, da fünf Wirtschaftsbranchen wegfallen. Durch die geringere Beobachtungsanzahl steigen auch die mit den geschätzten Koeffizienten korrespondierenden Standardfehler, wodurch tendenziell mit einer geringeren statistischen Kraft und Schwierigkeiten in der Bestimmung statistisch signifikanter Effekte zu rechnen ist. Die Vorzeichen der Roboterdichte und der IKT-Intensität verbleiben für die Lohnstückkosten (1b) und die Produktivität (2b), jedoch ist nur mehr der IKT-Koeffizient der Produktivitätsgleichung statistisch signifikant. Dabei ist auffällig, dass die Effektgröße des Einflusses der Industrieroboter in Branchen der Warenherstellung deutlich geringer ausfällt, während die Effektgröße der IKT-Nutzung merkbar ansteigt. Weiter verändern sich die Vorzeichen der Effekte auf Reallöhne und Arbeitsstunden beider Digitalisierungsmaße, mit einem schwach-signifikanten positiven Effekt der Roboterdichte auf die langfristige Beschäftigungsentwicklung der Warenherstellungsbranchen.

Tabelle 3: Langfristige Effekte 1993-2007

| | Lohnstückkosten | | Produktivität | | Reallöhne | | Arbeitsstunden (h) | |
|---|---------------------|----------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| | (1a) alle | (1b) WH | (2a) alle | (2b) WH | (3a) alle | (3b) WH | (4a) alle | (4b) WH |
| Roboter / h (Perzentil) | -0.859** (0.436) | -0.326 (0.569) | 1.013** (0.452) | 0.545 (0.635) | 0.051* (0.027) | -0.044 (0.029) | -0.159 (0.291) | 0.994* (0.599) |
| IKT Kompensation real / h | -0.005 (0.035) | -0.084 (0.075) | 0.092** (0.040) | 0.176* (0.104) | 0.007* (0.003) | -0.006 (0.010) | -0.096* (0.053) | 0.044 (0.093) |
| Kapitalkompensation/Arbeitskompensation | -0.054 (0.056) | -0.577*** (0.157) | 0.034 (0.042) | 0.594*** (0.182) | -0.001 (0.002) | -0.013 (0.010) | 0.044** (0.021) | 0.288*** (0.096) |
| Produktivität | | | | | 0.018** (0.008) | 0.032*** (0.007) | -0.210 (0.129) | -0.007 (0.094) |
| Beobachtungen | 210 | 135 | 210 | 135 | 210 | 135 | 210 | 135 |
| Länder | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Sektoren | 14 | 9 | 14 | 9 | 14 | 9 | 14 | 9 |
| F-Statistik Instrument (erste Stufe) | 24.93 | 11.61 | 24.93 | 11.61 | 19.93 | 10.80 | 19.93 | 10.80 |

Quelle: Eigene Darstellung. Anmerkungen: Alle Variablen sind in Wachstumsraten bzw. dem Perzentil des Wachstums (Roboterichte) spezifiziert. Alle Spezifikationen enthalten fixe Ländereffekte, sowie die Kontrollvariablen aus Graetz und Michaels (2018): Logarithmus der Löhne und Logarithmus des Kapital-/Arbeitskompensationsverhältnisses des Jahres 1993, und bei Spezifikationen über alle Wirtschaftsbranchen zusätzlich die Anteile der Beschäftigungsstunden von mittel- und hochqualifizierten Arbeitskräften. Auf Länder- und Wirtschaftsbranche gruppierte robuste Standardfehler sind in Klammern enthalten. In allen Regressionen wurden die Beobachtungen mit dem Wertschöpfungsanteil der Wirtschaftsbranche aus dem Jahr 1993 gewichtet. * p < 0.10, ** p < 0.05, *** p < 0.01.

In dieser auf die handelbaren Branchen restringierten Stichprobe zeigt sich zudem ein starker und statistisch hoch signifikanter Effekt des Kapital-/Arbeitskompensationsverhältnisses auf Lohnstückkosten, Produktivität und Arbeitsstunden. In den Branchen der Warenherstellung war somit die generelle Steigerung der Produktivität des Gesamtkapitals, ausgedrückt über das Verhältnis der Entlohnung bzw. Grenzprodukte der Faktoren, wichtiger für die Entwicklung dieser Zielgrößen als die Qualität des Kapitalstocks (Digitalisierung). Schließlich zeigt sich im Vergleich von Spalte (3a) und (3b), dass in der Warenherstellung Produktivitätsfortschritte in stärkerem Ausmaß mit der Reallohnentwicklung einhergehen.

Betrachten wir nun die Ergebnisse für die Periode 2008-2015, welche in Tabelle 4 zusammengefasst sind. Über alle Spezifikationen der gesamten Stichprobe (1a, 2a, 3a, 4a) zeigt sich, dass der Anteil der automatisierbaren Stunden der Wirtschaftsbranchen ein deutlich stärkeres Instrument, gemessen an der F-Statistik der ersten Stufe, darstellt als für die Periode 1993-2007. Schränkt man jedoch die Stichprobe auf die Branchen der Warenherstellung ein, liegt die Stärke unter jener der vergleichbaren Spezifikationen der Periode 1993-2007. Die Stichproben der beiden Perioden sind wegen der Neuklassifizierung der Wirtschaftsbranchen und einer leicht abweichenden Länderauswahl aufgrund von Datenrestriktionen nicht gänzlich vergleichbar. Die verwendeten Variablen, Spezifikationen und ökonomischen Methoden sind jedoch überwiegend gleich.¹⁷

Diskutieren wir zunächst wieder die Ergebnisse über alle Wirtschaftsbranchen. Wie zuvor zeigt sich ein statistisch signifikanter, negativer Effekt der Industrieroboter auf die Lohnstückkosten (1a) und ein positiver auf die Produktivitätsentwicklung (2a). Im Gegensatz zur Vorkrisenperiode zeigen sich keine signifikanten Korrelationen der IKT-Kapitalnutzung auf diese Zielgrößen. Auch bezüglich der Reallohnentwicklung (3a) zeigen sich keine statistisch signifikanten Wirkungen der beiden Digitalisierungsmaße. Dafür lässt sich aus Spalte (4a) ersehen, dass sowohl eine steigende Roboterichte, als auch IKT-Intensität dämpfend auf die Beschäftigungsentwicklung der Periode 2008-2015 wirkte. Im Gegensatz zur Vorkrisenperiode zeigen sich in der Nachkrisenperiode für alle Wirtschaftsbranchen hoch-signifikante Korrelationen des Kapital-/Arbeitskompensationsverhältnisses mit der Lohnstückkosten- und Produktivitätsentwicklung.

Lenken wir nun das Augenmerk auf die Ergebnisse für die Branchen der Warenherstellung. Hier zeigen sich weder für die Lohnstückkosten- (1b), Produktivitäts- (2b) noch Beschäftigungsentwicklung (4b) signifikante Effekte der beiden Digitalisierungsmaße. Die langfristige Reallohnentwicklung (3b) der Warenherstellung zwischen 2008 und 2015 scheint jedoch höher in Wirtschaftsbranchen mit intensiverem Industrierobotereinsatz ausgefallen zu sein. Dieser statistisch hoch-signifikante Effekt besteht trotz der hoch-signifikanten Korrelation der Produktivitätsentwicklung. Wie auch in den Ergebnissen der Vorkrisenperioden festgestellt wurde, steigt in den Jahren nach der Finanzkrise der Einfluss des Kapital-/Arbeitsverhältnisses für die Branchen der Warenherstellung relativ zu allen Branchen.

¹⁷ In den Spezifikationen (1a), (2a), (3a), (4a) wird in der Periode 1993-2007 (Tabelle 3) im Gegensatz zur Periode 2008-2015 (Tabelle 4) die Veränderung der Anteile an hoch- und mittelqualifizierten Beschäftigten als Kontrollvariable verwendet. Diese Variablen standen für 2008-2015 für die USA nicht zur Verfügung und wurden daher nicht berücksichtigt.

Tabelle 4: Langfristige Effekte 2008-2015

| | Lohnstückkosten | | Produktivität | | Reallöhne | | Arbeitsstunden (h) | |
|------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| | (1a) alle | (1b) WH | (2a) alle | (2b) WH | (3a) alle | (3b) WH | (4a) alle | (4b) WH |
| Roboter / h (Perzentil) | -0.342*** (0.105) | 0.063 (0.076) | 0.351*** (0.099) | -0.010 (0.085) | -0.003 (0.028) | 0.054*** (0.017) | -0.316** (0.137) | -0.027 (0.142) |
| IKT Kompensation real / h | 0.004 (0.044) | 0.024 (0.054) | 0.005 (0.042) | -0.029 (0.063) | 0.009 (0.013) | -0.002 (0.004) | -0.036*** (0.014) | -0.017 (0.034) |
| Kapital-/Arbeitskompensation | -0.104*** (0.028) | -0.129*** (0.038) | 0.108*** (0.023) | 0.133*** (0.041) | 0.000 (0.011) | -0.009 (0.011) | 0.021 (0.025) | 0.124*** (0.015) |
| Produktivität | | | | | 0.032 (0.024) | 0.093*** (0.023) | -0.095 (0.124) | -0.029 (0.047) |
| Beobachtungen | 176 | 110 | 176 | 110 | 176 | 110 | 176 | 110 |
| Länder | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| Sektoren | 13 | 8 | 13 | 8 | 13 | 8 | 13 | 8 |
| F-Stat. | 132.88 | 9.44 | 132.88 | 9.44 | 144.75 | 9.29 | 144.75 | 9.29 |

Quelle: Eigene Darstellung. Anmerkungen: Alle Variablen sind in Wachstumsraten bzw. dem Perzentil des Wachstums (Roboterichte) spezifiziert. Alle Spezifikationen enthalten fixe Ländereffekte, sowie die Kontrollvariablen aus Graetz und Michaels (2018): Logarithmus der Löhne und Logarithmus des Kapital-/Arbeitskompensationsverhältnisses des Jahres 2008. Auf Länder- und Wirtschaftsbranche gruppierte robuste Standardfehler sind in Klammern enthalten. In allen Regressionen wurden die Beobachtungen mit dem Wertschöpfungsanteil der Wirtschaftsbranche aus dem Jahr 2008 gewichtet. * p < 0.10, ** p < 0.05, *** p < 0.01.

Wenden wir uns nun den Ergebnissen der Stichprobe mit den detaillierteren IKT-Kapitalstöcken und Wirtschaftsbrancheneffekten in Tabelle 5 zu. Die Spaltennummern beziehen sich wiederum auf die in Abschnitt 3 dargestellten Spezifikationen, während a) alle Wirtschaftsbranchen und b) nur Wirtschaftsbranchen der Warenherstellung umfasst. Durch die Inklusion der neuen IKT-Maße fällt das Land Belgien aus der Stichprobe. Zudem wurde die Entwicklung der Roboterdichte nicht mehr instrumentiert. Stattdessen wurden fixe Wirtschaftsbrancheneffekte inkludiert, was eine zusätzliche Kontrolle für branchenspezifische Wachstumstrends ermöglicht. Dadurch sollen mögliche Verzerrungen der Koeffizienten abgemildert werden, mit dem Nachteil, dass die Effekte der Industrieroboter nicht mehr kausal zu interpretieren sind.

Betrachten wir zunächst wieder die Stichprobe aller Wirtschaftsbranchen. Bedingt auf Wirtschaftsbrancheneffekte und ohne Instrumentierung lassen sich keine statistisch signifikanten Korrelationen der Roboterdichte mit den Zielvariablen mehr feststellen. Die Vorzeichen der Koeffizienten deuten auf eine negative Korrelation mit der Lohnstückkosten- (5a), Reallohn- (7a) und Arbeitsstundenentwicklung (8a) und auf eine positive Korrelation mit der Produktivität (6a) hin. Branchen mit verstärkter Intensivierung des IT-Kapitalstocks, welcher Computer- und Hardwareequipment umfasst, weisen eine signifikant höhere Lohnstückkostenentwicklung auf. Dieser Effekt ergibt sich zum Teil aus dem signifikant negativen Effekt auf die Produktivität und einem nicht signifikanten, positiven Effekt auf die Reallöhne. Ein ähnliches Bild ergibt sich für den Kapitalstock von Software und Datenbanken. Eine Intensivierung des Kommunikationsausrüstungs-Kapitalstocks ist hingegen mit signifikant geringeren Lohnstückkosten assoziiert, ein Effekt der zum Teil auf die negative Korrelation mit den Reallöhnen zurückzuführen sein wird. In Summe wirkt eine stärkere Entwicklung des gesamten Kapitalstocks pro Beschäftigungsstunde jedoch auf Lohnstückkosten dämpfend, durch positive Produktivitäts- und Reallohneffekte, wobei ersterer Effekt den letzteren übersteigt. Diese Effekte gehen mit einer negativen signifikanten Korrelation der realen Kapitalstockintensivierung mit den Beschäftigungsstunden einher. Darüber hinaus wirkt das Kapital-/Arbeitskompensationsmaß dämpfend auf die Lohnstückkosten und produktivitätssteigernd.

Lenken wir nun die Aufmerksamkeit auf die Stichprobe der Branchen der Warenherstellung. Hier zeigt sich ebenfalls keine signifikante Korrelation der Roboterdichte mit den zu erklärenden Größen. Die kontraintuitiven Korrelationen des IT- und SD-Kapitalstocks verbleiben, jedoch steigt die Unsicherheit um die geschätzten Koeffizienten. Letztlich verbleiben ein schwach signifikanter negativer Einfluss der IT-Intensivierung auf die Produktivität (6b) und ein positiver Effekt der SD-Intensivierung auf die Reallöhne (7b). Die Vorzeichen der Effekte des KT-Kapitalstocks verbleiben ebenfalls, jedoch verlieren alle Koeffizienten statistische Signifikanz auf gängigen Niveaus. Auch innerhalb der Stichprobe der Warenherstellungsbranchen behält die Intensivierung des Gesamtkapitalstocks ihren positiven Effekt auf die Reallohn- und negativen auf die Beschäftigungsstundenentwicklung. Eine weitere signifikante Einflussgröße auf diese beiden Zielvariablen ist innerhalb der Warenherstellung wiederum die Produktivität. Zudem zeigt sich eine hoch-signifikante positive Korrelation des Kapital/Arbeitskompensationsverhältnisses auf die Entwicklung der geleisteten Arbeitsstunden (8b). Daraus ergibt sich, dass sich eine Erhöhung der physischen Kapitalintensität ceteris paribus beschäftigungsreduzierend aber eine Steigerung der relativen Kapitalproduktivität beschäftigungssteigernd verhält. Ergänzend hierzu kann eine schwach signifikante, positive Korrelation einer Intensivierung des SD-Kapitalstocks mit der Beschäftigungsentwicklung festgestellt werden.

Tabelle 5: Langfristige Effekte 2008-2015, detaillierter IKT-Kapitalstock und Wirtschaftsbrancheneffekte

| | Lohnstückkosten | | Produktivität | | Reallöhne | | Arbeitsstunden (h) | |
|---|----------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| | (5a) alle | (5b) WH | (6a) alle | (6b) WH | (7a) alle | (7b) WH | (8a) alle | (8b) WH |
| Roboter / h (Perzentil) | -0.117 (0.085) | -0.055 (0.085) | 0.093 (0.081) | 0.078 (0.088) | -0.028 (0.022) | 0.015 (0.027) | -0.066 (0.051) | -0.005 (0.043) |
| IT Kapitalstock real / h | 0.051** (0.020) | 0.041 (0.028) | -0.045** (0.022) | -0.050* (0.029) | 0.008 (0.006) | -0.003 (0.007) | 0.016 (0.024) | -0.006 (0.016) |
| KT Kapitalstock real / h | -0.041** (0.021) | -0.033 (0.025) | 0.028 (0.021) | 0.036 (0.025) | -0.014** (0.006) | -0.001 (0.007) | -0.015 (0.022) | -0.009 (0.015) |
| SD Kapitalstock real / h | 0.111*** (0.037) | 0.081 (0.052) | -0.087** (0.043) | -0.078 (0.059) | 0.027** (0.011) | 0.010* (0.006) | -0.012 (0.022) | 0.040* (0.021) |
| Kapitalstock insgesamt real / h | -0.173* (0.094) | -0.043 (0.147) | 0.228** (0.101) | 0.116 (0.174) | 0.047* (0.028) | 0.061* (0.034) | -0.638*** (0.120) | -0.411*** (0.071) |
| Kapital-/Arbeitskompensation | -0.085*** (0.027) | -0.091* (0.055) | 0.096*** (0.020) | 0.084 (0.056) | 0.008 (0.012) | -0.015 (0.014) | 0.003 (0.016) | 0.076*** (0.024) |
| Produktivität | | | | | 0.036 (0.036) | 0.101*** (0.024) | -0.009 (0.060) | 0.096** (0.044) |
| Beobachtungen | 159 | 100 | 159 | 100 | 159 | 100 | 159 | 100 |
| Länder | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 |
| Sektoren | 13 | 8 | 13 | 8 | 13 | 8 | 13 | 8 |
| Fixe Effekte: Länder und Wirtschaftsbranche | JA | JA | JA | JA | JA | JA | JA | JA |

Quelle: Eigene Darstellung. Anmerkungen: Alle Variablen sind in Wachstumsraten bzw. dem Perzentil des Wachstums (Roboterdichte) spezifiziert. Alle Spezifikationen enthalten fixe Länder- und Wirtschaftsbrancheneffekte, sowie die Kontrollvariablen aus Graetz und Michaels (2018): Logarithmus der Löhne und Logarithmus des Kapital-/Arbeitskompensationsverhältnisses des Jahres 2008. Heteroskedastizitäts-robuste Standardfehler sind in Klammern enthalten. In allen Regressionen wurden die Beobachtungen mit dem Wertschöpfungsanteil der Wirtschaftsbranche aus dem Jahr 2008 gewichtet. * p < 0.10, ** p < 0.05, *** p < 0.01.

Eine wesentliche Restriktion der langfristigen Effektanalysen stellt die geringe Stichprobengröße dar. Aufgrund fehlender Daten und dem Fokus auf Wirtschaftsbranchen der Warenherstellung, kann nur eine geringe Anzahl an Ländern und Branchen verwendet werden. Die geringe Anzahl an Beobachtungen kann zu stark schwankenden bzw. statistisch insignifikanten Ergebnissen führen. Zur Behebung dieses Problems und um mögliche kurzfristige Auswirkungen der Digitalisierung abbilden zu können, wurden ergänzend zu den Querschnittsanalysen der langfristigen Wachstumsraten, auch datenintensivere Panelmodelle geschätzt. Die Analyse von jährlichen Wachstumsraten über den Zeitraum 1995-2015 resultiert in einer vergleichsweise hohen Anzahl von fast 2000 Beobachtungen. Auch nach Abzug der Vielzahl an Modellfreiheitsgraden, welche durch die fixen Effekte entstehen, verbleiben etwas über 1500 Freiheitsgrade. Aus diesem Grund beschränken wir die Analysen sogleich auf die im Fokus stehenden Branchen der Warenherstellung. Um die Sensibilität der Ergebnisse gegenüber statistischen Ausreißern zu schwächen wurden die Residuen der Modell visuell inspiziert und stark abweichende Beobachtungen mittels Dummy-Variablen¹⁸ modelliert.

Tabelle 6 fasst die Ergebnisse der kurzfristigen Spezifikationen zusammen. Wie zuvor sind die mit den Spaltenbezeichnungen korrespondierenden detaillierten ökonometrischen Spezifikationen in Abschnitt 3 dargestellt. Kurzfristig zeigt sich eine schwach signifikante negative Korrelation der Industrieroboterintensivierung bzw. der Intensivierung des realen Kapitalstocks von Kommunikationsequipment mit der Lohnstückkostenentwicklung (9). Als weiteren, jedoch hoch-signifikanten, kostendämpfenden Faktor kann das Verhältnis zwischen Kapital- und Arbeitskompensation identifiziert werden. Der negative Effekt der Roboterintensität auf die Lohnstückkosten kann auf den signifikanten positiven Effekt auf die Produktivität (10) zurückgeführt werden. Weitere hoch-signifikante kurzfristige produktivitätssteigernde Impulse gehen von der physischen Kapitalstockintensität und der relativen Kapitals-/Arbeitsproduktivität aus.

Die negative Korrelation des KT-Kapitalstocks mit der Lohnstückkostenentwicklung kann vermutlich auf den negativen Effekt des KT-Kapitals auf die Reallöhne (11) zurückzuführen sein. Eine weitere hoch-signifikante lohndämpfende Determinante ist das Kapital-/Arbeitskompensationsverhältnis. Im Gegensatz dazu ist in der kurzen Frist mit positiven Reallohneffekten durch physische Kapitalstockintensitätssteigerungen bzw. steigende Produktivitätsentwicklungen zu rechnen.

In der Spezifikation zum Exportmarktanteil, Spalte (12), sind lediglich das Kapital-/Arbeitskompensationsverhältnis und die Lohnstückkostenentwicklung signifikant. Diese Ergebnisse bieten daher keine Unterstützung für die Hypothese, dass Digitalisierung über ihren Einfluss auf Produktivität und damit die Lohnstückkosten hinaus wettbewerbsfördernd wirkt.

¹⁸ Insgesamt betrifft das, je nach zu erklärender Größe, nur 2 bis 3 Beobachtungen.

Tabelle 6: Kurzfristige Ergebnisse 1995-2015, Warenherstellung

| | Lohnstückkosten (9) | Produktivität (10) | Reallöhne (11) | Exportmarktanteil (12) |
|------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|
| Roboter / Mio. h (Perzentil) | -0.010* (0.006) | 0.012** (0.006) | 0.002 (0.002) | 0.016 (0.021) |
| IT KS real / h | 0.013 (0.011) | -0.015 (0.010) | 0.000 (0.004) | 0.037 (0.026) |
| KT KS real / h | -0.015* (0.008) | 0.008 (0.008) | -0.008** (0.003) | 0.010 (0.020) |
| SD KS real / h | -0.009 (0.017) | 0.014 (0.018) | 0.003 (0.002) | 0.014 (0.012) |
| KS insgesamt real / h | -0.042 (0.046) | 0.180*** (0.049) | 0.114*** (0.023) | -0.305 (0.200) |
| Kapital-/Arbeitskompensation | -0.186*** (0.021) | 0.167*** (0.020) | -0.033*** (0.007) | 0.063* (0.033) |
| Produktivität | | | 0.100*** (0.015) | |
| Lohnstückkosten | | | | -0.220** (0.091) |
| Beobachtungen | 1909 | 1909 | 1909 | 1909 |
| Freiheitsgrade | 1538 | 1538 | 1537 | 1536 |
| R ² | 0.36 | 0.33 | 0.61 | 0.32 |

Quelle: Eigene Darstellung. Anmerkung: Robuste Standardfehler (Cluster auf Wirtschaftsbranchen*Länder-Ebene) in Klammern. * p < 0.10, ** p < 0.05, *** p < 0.01. Alle Variablen sind in Wachstumsraten bzw. dem Perzentil des Wachstums (Roboterdichte) spezifiziert. Alle Spezifikationen enthalten fixe Wirtschaftsbranchen*Länder-, Länder-Perioden- und Wirtschaftsbranchen-Perioden-Effekte. Beobachtungen der Spalten (1) bis (4) sind mit dem Wertschöpfungsanteil der Branchen von 1995 gewichtet, Beobachtungen der Spalte (5) mit dem Exportanteil der Wirtschaftsbranche in 1995. Beobachtungen welche residuale Ausreißer [2 für (1), (2), (3) und 3 für (5)] darstellen, wurden mit Dummy-Variablen modelliert. KS...Kapitalstock, IT...Computer/Hardware, KT...Kommunikationsausrüstung, SD...Software/Datenbanken, h...Millionen Arbeitsstunden (unselbständig).

6 Synthese und Schlussfolgerungen

In diesem Abschnitt sollen abschließend die in Abschnitt 5 dargestellten Ergebnisse in einem gesamtheitlichen Kontext interpretiert und dabei die jeweilige statistische Aussagekraft der einzelnen Resultate berücksichtigt werden. Ein grundsätzliches Problem stellt die Interpretation vieler Koeffizienten hinsichtlich ihrer Kausalität dar. Da nur für die Entwicklung der Industrieroboterdichte in den langfristigen Analysen ein Instrument (Anteil automatisierbarer Arbeitsstunden je Wirtschaftsbranchen in den USA 1980) zur Verfügung stand, können nur diese Koeffizienten, unter dem Vorbehalt der Akzeptanz der Validität des Instruments, als kausal aufgefasst werden. Die nachfolgenden Ausführungen sollten daher weniger in Richtung einer kausalen Auslegung denn eines empirischen Musters aufgenommen werden.

Generell lässt sich festhalten, dass die geringen Stichprobengrößen der ökonometrischen Schätzungen zu den langfristigen Effekten die Aussagekraft dieser Analysen deutlich einschränken. Graetz und Michaels (2018) argumentieren über diverse ergänzende Berechnungen, dass der von ihnen identifizierte positive Einfluss der Industrieroboterdichte auf die Produktivität robust ist. Wie man anhand der Ergebnisse der vorliegenden Studie sieht, verbleiben jedoch keine signifikanten Effekte der Roboter auf die Produktivität in den Perioden 1993-2007 (welche de facto eine Replikation der Resultate in Graetz und Michaels (2018) darstellt) sowie 2008-2015 sobald man die Wirtschaftsbranchen der Stichprobe auf die Warenherstellung beschränkt.

Ähnlich verhält es sich bei den Lohnstückkosten, welche im Fokus der vorliegenden Studie standen. Nun kann vor allem für die langfristigen Effekte vor der Finanz- und Wirtschaftskrise argumentiert werden, dass die Vorzeichen der nach der Einschränkung auf die Warenherstellung deutlich geringer ausfallenden Effekte, verbleiben und die starke Streuung um den Punktschätzer durch die geringe Anzahl an verbleibenden Beobachtungen zu Stande kommt. Jedoch zeigt der Fokus auf die Warenherstellung die zentrale, hoch-signifikante Rolle des generellen Kapital-/Arbeitskompensationsverhältnisses auf, welche in Graetz und Michaels (2018) lediglich eine Kontrollvariable unter vielen darstellte, die in der Publikation nicht gesondert ausgewiesen wurde. Da aber gerade der sich von der generellen Kapitalintensivierung abhebende Effekt der Digitalisierung die qualitativen Aspekte von Investitionen in diese Technologien abbildet, scheint es sich in der langen Frist bei Industrierobotern für die Wirtschaftsbranchen der Warenherstellung um ein gängiges Kapitalgut zu handeln. Vielmehr könnten Branchen der Warenherstellung, welche eine stärkere Automatisierungsentwicklung verzeichneten, erfolgreicher dabei gewesen sein Beschäftigung zu halten. Die Ergebnisse der Analysen liefern eine leichte Evidenz hierfür. Eine stärkere empirische Unterstützung besteht für das Argument, dass Branchen mit einer positiven Kapital-/Arbeitskompensationsentwicklung einen stärkeren Beschäftigungszuwachs erfuhren.

Abseits davon deuten die Ergebnisse daraufhin, dass eine Intensivierung des IKT-Kapitalstocks in den Vorkrisenjahren, langfristig die Produktivität erhöhte. Die Betrachtungsperiode spricht dafür, da die gesamtwirtschaftliche Produktivität in den meisten entwickelten Ländern vor der Krise eine deutlich bessere Entwicklung als nach der Krise aufwies. So argumentieren Aum, Lee und Shin (2018), dass die gesamtwirtschaftliche Produktivitätsflaute bereits in den 1970er Jahren einsetzte, jedoch in den 80er und 90er Jahren vom außergewöhnlichen Produktivitätswachstum der IKT-produzierenden Sektoren überlagert wurde. Die Ergebnisse deuten aber auch daraufhin, dass der schwach signifikante Effekt der IKT auf die Produktivität zu keiner signifikanten Reduktion der Lohnstückkosten in den Branchen der Warenherstellung geführt hat.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Vorkrisenjahre, zeigen die vergleichbaren Analysen für die Periode 2008-2015 für die Branchen der Warenherstellung keine kostendämpfenden und produktivitätssteigernden Effekte zunehmender Digitalisierung. Die Effekte der Roboterichte und IKT-Intensität weisen dabei sogar die falschen Vorzeichen auf. Auch nach der Krise kommt langfristig der Intensivierung des gesamten Kapitalstocks eine tragende Rolle für Lohnstückkosten, Produktivität und Beschäftigung in der Warenherstellung zu. An den Ergebnissen der Nachkrisenjahre zeigt sich auch, dass die Aussagekraft des Instruments für die Branchen der Warenherstellung deutlich sinkt. Die Ursache könnte darin liegen, dass der Anteil automatisierbarer Arbeitsstunden einen guten Erklärungsgehalt für die frühen Automatisierungsentwicklungen darstellt, jedoch später erfolgende Intensivierungen des Roboterbestands nicht hinreichend erklären kann.

Die Ergebnisse deuten aber auch darauf hin, dass die zunehmende Automatisierung durch Industrieroboter der späteren 2000er Jahre zu stärkeren Reallohnentwicklungen in den Branchen der Warenherstellung geführt hat. Akzeptiert man die Validität des Instruments so kann dieser statistisch hoch-signifikante Effekt als kausal interpretiert werden. Da auch für die Produktivität kontrolliert wurde, und diese ebenfalls einen hoch-signifikanten positiven Effekt auf die Reallöhne aufweist, würde dieses Resultat Evidenz für die Forschungshypothese liefern, dass eine stärkere Entwicklung der Roboterintensität, abseits des Produktivitätskanals, zu einer positiven Reallohnentwicklung führt. Auch theoretisch ist dieses Ergebnis nachvollziehbar, da sich argumentieren lässt, dass bspw. vermehrt höher-qualifizierte Mitarbeiter benötigt werden oder auch geringer-qualifizierte und damit schlechter entlohnte Mitarbeiter abgebaut bzw. nicht neu eingestellt werden. In manchen der Fallstudien über den Einsatz von Industrierobotern geht jedoch auch hervor, dass die einfache Handhabung der neueren Generationen von Robotern keine spezifischen zusätzlichen Kenntnisse erfordert, was tendenziell für die letztere Hypothese sprechen würde.

Die ergänzenden Analysen für die Periode 2008-2015, welche auf eine Instrumentierung der Entwicklung der Roboterintensität verzichten und dafür für unbeobachtete Branchenentwicklungen kontrollieren, weisen aufgrund einer geringeren Anzahl an Beobachtungen und einer höheren Anzahl an Parametern nur wenige statistisch aussagekräftige Ergebnisse für die Branchen der Warenherstellung auf. Als robuste Ergebnisse verbleiben die Relevanz der Produktivität und der generellen Kapitalstockintensivierung für Löhne, Beschäftigung und Lohnstückkosten. Daneben liefern die Resultate schwache Evidenz dafür, dass Wirtschaftsbranchen mit einer stärkeren Entwicklung der realen Kapitalstockintensität von Computern und Hardware in den Nachkrisenjahren eine langfristig geringere Produktivität aufgewiesen haben. Die Ergebnisse geben auch geringfügige Anzeichen auf eine stärkere Reallohnentwicklung von Wirtschaftsbranchen mit stärkeren Entwicklungen in der realen Kapitalstockintensität von Software und Datenbanken. Im Gegensatz zur IKT-Nutzung zeigen sich auf keine der Zielgrößen mehr signifikante Effekte der Roboterintensität. Die Gründe dafür könnten in der geringen statistischen Kraft der Stichprobe oder der fehlenden Berücksichtigung der Endogenität liegen.

Das Problem der geringen Stichprobengröße besteht nicht mehr bei den Analysen zu den kurzfristigen, jährlichen Einflüssen der Digitalisierung auf die Zielgrößen der Studie. Die Ergebnisse der Periode 1995 bis 2015 deuten darauf hin, dass ein höheres Wachstum der Roboterichte in Wirtschaftsbranchen der Warenherstellung mit einer signifikant höheren Produktivität und geringeren Lohnstückkosten in Verbindung steht. Weiters weisen Branchen mit wachsender Telekommunikationsausrüstungsintensität ein geringeres Lohnstückkosten- und Reallohnwachstum auf. Wie auch in den langfristigen Analysen unterstützen die Resultate der kurzen Frist die zentrale Rolle der Kapitalstockvertiefung für Lohnstückkosten, Produktivität und Reallöhne. Bezüglich der Reallöhne zeigt sich, dass diese mit einer

Intensivierung des physischen Bestands je Arbeitsstunde zunehmen und daher das Grenzprodukt der Arbeit steigt. Steigt hingegen das Kompensationsverhältnis, also die Verteilung der Wertschöpfung der Branche zugunsten des Kapitals, wirkt dies lohnämpfend.

Die Ergebnisse über die Entwicklung der Exportmarktanteile deuten auf eine signifikante Rolle der Lohnstückkosten in der kurzen Frist hin. Dieses Resultat steht im Einklang mit den langfristigen Ergebnissen aus den Analysen früherer Perioden von Carlin et al. (2001). Über die Lohnstückkosten hinweg lassen sich keine signifikanten Auswirkungen der Digitalisierung auf die kurzfristige Entwicklung der Exportmarktanteile feststellen. Sowohl die Roboterdichte, als auch alle IKT-Kapitalintensitätsmaße weisen positive Vorzeichen auf, jedoch ist keiner der Koeffizienten auf gängigen statistischen Niveaus signifikant. Die Ergebnisse deuten wiederum in Richtung eines positiven Effekts einer generellen Kapitalintensivierung, im Sinne eines höheren Kapital-/Arbeitskompensationsverhältnisses.

Die Ergebnisse der Studie deuten auf folgende Zusammenhänge hin:

- Es zeigt sich sowohl kurz- wie auch langfristig, dass Branchen der Warenherstellung, die ihren Kapitaleinsatz relativ zum Arbeitseinsatz erhöhen, geringere Lohnstückkosten, eine höhere Produktivität und damit eine höhere Wettbewerbsfähigkeit aufweisen.
- Über diese generelle Intensivierung des Kapitalstocks hinausgehend zeigen sich auch zum Teil zusätzliche Impulse durch eine Intensivierung von Kapitalgütern, welche mit der Digitalisierung in Verbindung gebracht werden können. Bei diesen Digitalisierungseffekten muss aufgrund differenzierter Effekte zwischen der Automatisierung durch eine Erhöhung der Industrieroboterintensität und einer Intensivierung des IKT-Kapitalstocks unterschieden werden.
- In den frühen Jahren der Digitalisierung, vor der Finanz- und Wirtschaftskrise, wiesen IKT-intensivere Branchen der Warenherstellung langfristig Produktivitätsvorteile auf, während ein verstärkter Einsatz von Industrierobotern beschäftigungsstützend wirkte.
- Nach der Krise lassen sich keine generellen langfristigen Impulse der IKT-Intensität feststellen. Es zeigen sich jedoch signifikante Reallohnimpulse durch die Automatisierung. Branchen mit einer steigenden realen Kapitalstockintensität in Software und Datenbanken wiesen ebenfalls eine stärkere Reallohnentwicklung auf.
- Längerfristig finden wir keine Evidenz, dass eine Intensivierung des IKT-Kapitalstocks oder der Industrieroboter pro Beschäftigungsstunde zu einem Beschäftigungsrückgang in den Branchen der Warenherstellung führte.
- Steigende Lohnstückkosten gehen bereits in der kurzen Frist mit sinkenden Exportmarktanteilen einher. Branchen mit stärkerem Einsatz von Industrierobotern weisen in der kurzen Frist eine höhere Produktivität und geringere Lohnstückkosten auf. Über ihre Assoziation mit den Lohnstückkosten hinaus, weisen stärker digitalisierte Branchen aber keine zusätzlichen Wettbewerbsvorteile auf.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Investitionen in Digitalisierung langfristig eine ähnliche Wirkung auf die Wettbewerbsfähigkeit von Branchen entfalten, wie herkömmliche Kapitalstockintensivierungen. Kurzfristig geht eine stärkere Digitalisierung mit höherer Produktivität und geringeren Lohnstückkosten einher. Diese Wettbewerbsvorteile können sich in der Folge in höheren Exportmarktanteilen niederschlagen. Im Rahmen der Studien wurden keine negativen Auswirkungen der Digitalisierung auf die langfristige Beschäftigungsentwicklung, jedoch aber Anzeichen auf positive Impulse für die Reallohnentwicklung gefunden. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Digitalisierung, ähnlich zu vergangenen technologischen Entwicklungen, zu einer höherwertigen Produktion führt ohne dabei langfristig in großem Maße Beschäftigung freizusetzen.

Literaturverzeichnis

- Abadie, A., Athey, S., Imbens, G. W. und Wooldridge, J. (2017): When Should You Adjust Standard Errors for Clustering? Working Paper: <https://arxiv.org/abs/1710.02926>
- Acatech (2013): Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern - Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0.
- Acemoglu, D. und Restrepo, P. (2017b): Robots and Jobs: Evidence from US Labour Markets. NBER Working Paper No. 23285. March 2017.
- Aum, S., Lee, S. Y., Shin, Y. (2018): Computerizing industries and routinizing jobs: Explaining trends in aggregate productivity. *Journal of Monetary Economics* (forthcoming).
- Autor, D. und Salomons, A. (2018): Is automation labor-displacing? Productivity growth, employment, and the labor share. *Brookings Papers on Economic Activity (BPEA) Conference Drafts*, March 8–9, 2018.
- Autor, D., Dorn, D., Katz, L. F., Patterson, C. und Van Reenen, J. (2017): Concentrating on the Fall of the Labor Share. *American Economic Review: Papers & Proceedings 2017*, 107(5): 180–185.
- Bartel, A., Ichniowski, C. and Shaw, K. (2007): “How Does Information Technology Affect Productivity? Plant-Level Comparisons of Product Innovation, Process Improvement, and Worker Skills.” *Quarterly Journal of Economics*, 122(4): 1721–58.
- Brynjolfsson, E., McAfee, A., Sorell, M. and Zhu, F. (2008): “Scale without Mass: Business Process Replication and Industry Dynamics.” *Harvard Business School Working Paper 07-016*.
- Cardona, M., Kretschmer, T. and Strobel, T. (2013): ICT and productivity: conclusions from the empirical literature. *Information Economics and Policy* 25, 109-125.
- Carlin, W., Glyn, A. und Van Reenen, J. (2001): Export Market Performance of OECD Countries: An Empirical Examination of the Role of Cost Competitiveness. *The Economic Journal* 111:128-162.
- Chiacchio, F., Petroboulos, G. und Pichler, D. (2018): The Impact of Industrial Robots on EU Employment and Wages: A Local Labour Market Approach. *Bruegel WORKING PAPER | ISSUE 02 | 18 APRIL 2018*.
- Dauth, W., Findeisen, S. Suedekum, J. und Woessner, N. (2017): German Robots – The Impact of Industrial Robots on Workers. *CEPR Discussion Paper 12306*.
- Graetz, G. und Michaels, G. (2018) Robots at work. *Review of Economics and Statistics* (In Press).
- Hölzl, W. und Leoni, T. (2017): Internationale Lohnstückkostenposition der Warenherstellung verschlechtert sich 2016. *WIFO-Monatsberichte*, 2017, 90(10), S. 783-795.
- Hubbard, T. N. (2003): “Information, Decisions, and Productivity: On-Board Computers and Capacity Utilization in Trucking.” *American Economic Review*, 93(4): 1328–53.
- IFR (2017): *World Robotics Industrial Robots Report 2017*. International Federation of Robotics, Germany.
- Jäger, K. (2017): *EU KLEMS Growth and Productivity Accounts 2017 release - Description of Methodology and General Notes*, The Conference Board September 2017.
- Jorgenson, D. W., Ho, M. S., and Stiroh, K. J. (2005): *Productivity. Volume 3. Information Technology and the American Growth Resurgence*. Cambridge and London: MIT Press.

- Jorgenson, D. W., Ho, M. S., and Stiroh, K. J. (2008): "A Retrospective Look at the U.S. Productivity Growth Resurgence." *Journal of Economic Perspectives*, 22(1): 3–24.
- Marterbauer, M. und Walterskirchen, E. (2003): Bestimmungsgründe der Lohnquote und der realen Lohnstückkosten, *WIFO Monatsberichte* 2/2003.
- O'Mahony, M. und Timmer, M. P. (2009), "Output, Input and Productivity Measures at the Industry Level: the EU KLEMS Database", *Economic Journal*, 119(538):F374-F403.
- Oliner, S. D., Sichel, D. E. and Stiroh, K. J. (2007): "Explaining a Productive Decade." *Brookings Papers on Economic Activity*, 1: 81–137.
- Reed, W. R. (2015): On the Practice of Lagging Variables to Avoid Simultaneity. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics* 77(6): 897-905.
- Schibany, A., Reiner, C. und Sellner, R. (2014): Vom unternehmerischen Produktivitätswachstum zur internationalen Wettbewerbsfähigkeit. *Schwerpunkt Außenwirtschaft 2013/2014*, Hrsg. Gnan, E. und Kronberger, R. facultas, Wien.
- Syverson, C. (2011): What Determines Productivity? *Journal of Economic Literature* 49 (2), 326-365.
- ZEW (2015): *Industrie 4.0: Digitale (R)Evolution der Wirtschaft*, IKT-Report Oktober 2015.

Autoren: Benjamin Bittschi und Richard Sellner; Wissenschaftliche Assistenz: Marliese Wolf

Titel: Wettbewerbsfähigkeit und Digitalisierung

Endbericht

© 2018 Institute for Advanced Studies (IHS),
Josefstädter Straße 39, A-1080 Vienna • ☎ +43 1 59991-0 • Fax +43 1 59991-555 • <http://www.ihs.ac.at>
