

Briglauer, Wolfgang; Köppl-Turyna, Monika

**Research Report**

## Die Auswirkung der Digitalisierung auf CO<sub>2</sub>-Emissionen: Theoretische Einzeleffekte und empirische Abschätzung des Gesamteffekts

Policy Note, No. 46

**Provided in Cooperation with:**

EcoAustria – Institute for Economic Research, Vienna (Austria)

*Suggested Citation:* Briglauer, Wolfgang; Köppl-Turyna, Monika (2021) : Die Auswirkung der Digitalisierung auf CO<sub>2</sub>-Emissionen: Theoretische Einzeleffekte und empirische Abschätzung des Gesamteffekts, Policy Note, No. 46, EcoAustria - Institute for Economic Research, Vienna

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/234133>

**Standard-Nutzungsbedingungen:**

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

**Terms of use:**

*Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.*

*You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.*

*If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.*

# ECO

## AUSTRIA

INSTITUT FÜR  
WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Mai 2021

---

### **POLICY NOTE 46**

Die Auswirkung der Digitalisierung auf CO<sub>2</sub> Emissionen: Theoretische Einzeleffekte und empirische Abschätzung des Gesamteffekts

---



# POLICY NOTE 46

## Die Auswirkung der Digitalisierung auf CO<sub>2</sub> Emissionen

*Dr. habil. Wolfgang Briglauer*

*Priv.-Doz. Dr. Monika Köppl-Turyna*

Mai 2021

### Kurzdarstellung

Der „Megatrend“ Digitalisierung bietet auf Basis von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) erhebliche Potenziale für Effizienzverbesserungen und die Reduktion von Transaktionskosten in beinahe allen relevanten gesamtwirtschaftlichen Bereichen. Neben den bereits in der Literatur vielfach nachgewiesenen Innovations- und Effizienzpotenzialen kann Digitalisierung auch für den Umwelt- und Klimaschutz nutzbar gemacht werden. Der Klimaschutz und Maßnahmen zur Eindämmung des Klimawandels sind national wie international bestimmende Themen der öffentlichen Debatte.

In gegenständlicher Policy Note wird zunächst ein Überblick über die möglichen Auswirkungen der Digitalisierung im Hinblick auf die großen wirtschaftlichen Sektoren und deren Verflechtungen sowohl auf den Ressourcenverbrauch als auch auf die Potenziale der Ressourcen- und Energieeinsparung gegeben. Generell lässt sich beobachten, dass sektorenübergreifende Anwendungen auch durch für die reibungslose Datenübertragung verantwortlichen Telekommunikationsanbieter, ermöglicht werden können („Enabler-effekt“), jedoch besteht die Gefahr von Reboundeffekten, da die größeren Datenmengen, die in kürzerer Zeit übertragen werden können, zahlreiche neue Anwendungen ermöglichen, die dann wiederum den Datenaustausch ankurbeln und damit wiederum auch den Energiebedarf insgesamt erhöhen. Hinzu kommen sogenannte Obsoleszenzeffekte, durch vorzeitige Entsorgung noch funktionstüchtiger Komponenten infolge von Innovationen. Angesichts vielschichtiger und gegenläufiger Effekte lässt sich a priori nichts über den Gesamteffekt der Digitalisierung auf den Ressourcenverbrauch im Allgemeinen und den CO<sub>2</sub>-Emissionen im Speziellen sagen.

Aus diesem Grund wird im Rahmen einer empirischen Analyse der letztlich resultierende Gesamteffekt der Digitalisierung bzw. von IKT auf Basis geeigneter ökonomischer Schätzverfahren untersucht. Dabei wird ein umfangreicher und aktueller Paneldatensatz für die Gruppe der OECD Länder und den Zeitraum 2002-2019 verwendet. Hierin steht zudem eine große Anzahl an Kontrollvariablen zur Verfügung, deren Relevanz auf Grundlage einer ausführlichen Beschreibung zum Stand der empirischen Literatur abgeleitet wird. Unsere Resultate decken sich im Wesentlichen mit den bisherigen empirischen Untersuchungen, wonach die CO<sub>2</sub> senkenden Effekte die negativen, d.h. CO<sub>2</sub> erhöhenden Effekte im Durchschnitt zu überwiegen scheinen. Es zeigte sich, dass neben dem absenkenden Effekt für Basisbreitbanddienste auch ein absenkender Effekt für die Nutzung neuer glasfaserbasierter Breitbandzugangsdienste bzw. damit verbundener Diensteanwendungen in Höhe von insgesamt 7.09 Millionen Tonnen geringerer CO<sub>2</sub>-Emissionen für Österreich im Zeitraum 2002-2019 resultierte. Für mobiles Breitband im speziellen weisen die Regressionsmodelle hingegen insignifikante Schätzkoeffizienten aus. Dies lässt aber darauf schließen, dass mobiles Breitband in der Vergangenheit im Gesamteffekt zu keinem systematisch erhöhten CO<sub>2</sub>-Ausstoß geführt hat.

Somit lässt sich der Schluss ableiten, dass pauschale Politikmaßnahmen in Hinblick auf IKT-Anbieter und Digitalisierungsdienste nicht der identifizierten Heterogenität der zugrunde liegenden Einzeleffekte gerecht werden würden und somit mit Ineffizienzen einhergingen. Allfällige regulatorische Eingriffe in das komplexe IKT-Ökosystem müssten punktuell unter Berücksichtigung der vielseitigen sektoralen Wechselwirkungen abgestimmt sein. Neben Interventionen, die auf eine Reduktion von besonders ressourcenintensiven Anwendungsbereichen mit hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen abzielen, wäre umgekehrt auch eine Förderung von digitalen Diensten und IKT-Bereichen mit CO<sub>2</sub> senkenden Gesamteffekten denkbar.

# Inhalt

<b>1. Hintergrund und Motivation</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Theoretische Überlegungen</b> .....	<b>2</b>
2.1. Direkte Effekte.....	3
2.2. Energieeffizienz vs. Rebound- und Obszoleszenzeffekte.....	3
2.3. Wirtschaftliches und digitales Wachstum.....	4
2.4. Sektoraler Strukturwandel.....	4
<b>3. Determinanten der Emissionen</b> .....	<b>6</b>
3.1. Makroökonomische, institutionelle und politische Determinanten .....	6
3.2. IKT-spezifische Bestimmungsdeterminanten.....	10
<b>4. Daten und Methodik</b> .....	<b>13</b>
4.1. Empirisches Untersuchungsdesign.....	13
4.2. Daten.....	14
<b>5. Ergebnisse</b> .....	<b>15</b>
5.1. Interpretation der Ergebnisse anhand österreichischer Marktdaten .....	16
<b>6. Fazit und Handlungsempfehlungen</b> .....	<b>18</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>20</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>23</b>

## 1. Hintergrund und Motivation

Der Klimaschutz und Maßnahmen zur Eindämmung des Klimawandels sind national wie international bestimmende Themen der öffentlichen Debatte. Dazu haben unter anderem Expertenberichte wie etwa jene des IPCC („Intergovernmental Panel on Climate Change“) der Vereinten Nationen beigetragen. Zugleich bietet der „Megatrend“ Digitalisierung auf Basis von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT)<sup>1</sup> erhebliche Potenziale für Effizienzverbesserungen und die Reduktion von Transaktionskosten in beinahe allen relevanten gesamtwirtschaftlichen Bereichen. Als sogenannte „Schlüsseltechnologie“ bringen IKT-basierte digitale Anwendungen, aufgrund deren universellen Anwendbarkeit in unterschiedlichsten IKT-basierten Branchen aber auch in weniger IKT-intensiven Branchen sowie aufgrund zahlreicher weiterer technologischer Entwicklungen in Form von Produkt- und Prozessinnovationen, hohe Wohlfahrtsgewinne mit sich. Durch die Digitalisierung können aber auch positive gesamtwirtschaftliche Effekte für den Umwelt- und Klimaschutz entstehen. Gleichwohl werden in der öffentlichen und politischen Debatte häufig die negativen Effekte der Digitalisierung vor allem in Hinblick auf einen zunehmenden Energie- und Ressourcenverbrauch angeführt. Aufgrund des ständig steigenden Internetverkehrs aber auch der ständig steigenden Qualitätsanforderungen investieren Telekommunikationsunternehmen seit Jahren in einen massiven Ausbau digitaler Infrastrukturen (Glasfaser, 5G). Auch diese gehen einerseits mit Ressourcen- und Stromverbrauch, andererseits aber auch mit vielseitigen positiven Enabler-Effekten der Digitalisierung auf Anwendungsebene einher. Da Digitalisierung ein genereller Trend ist, der beinahe alle gesellschaftlichen Bereiche und wirtschaftlichen Sektoren umfasst, lässt sich angesichts vielschichtiger und gegenläufiger Effekte a priori nichts über den Gesamteffekt der Digitalisierung auf den Ressourcenverbrauch im Allgemeinen und den CO<sub>2</sub>-Emissionen im Speziellen sagen – letzteres ist daher eine rein empirische Frage.

Die gegenständliche Policy Note fasst die wesentlichsten Inhalte und Ergebnisse einer im Auftrag von A1 Telekom Austria AG von EcoAustria in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung durchgeführten Studie in kompakter Form zusammen. In Abschnitt 2 werden zunächst die wesentlichsten theoretischen Effekte von IKT auf Infrastrukturebene und Digitalisierung auf Anwendungsebene in Hinblick auf Energieverbrauch und resultierende CO<sub>2</sub>-Emissionen beschrieben. Abschnitt 3 beschäftigt sich sodann mit der empirischen Frage, ob die positiven Effekte der Digitalisierung, die durch Energieeffizienz, sektoralen Wandel und verschiedene Enablertechnologien entstehen, die negativen indirekten Rebound- und Obszoleszenzeffekte und den direkten Effekt in Verbindung mit erhöhten Energiebedarfen aufgrund verstärkter Herstellung von IKT Produkten überwiegen. Hierzu werden die empirische Spezifikation und die zugrunde gelegten Daten dargestellt. Abschnitt 4 enthält die wesentlichsten Ergebnisse der empirischen Untersuchung. Abschnitt 5 enthält neben einem Fazit konkrete Handlungsempfehlungen für politische Entscheidungsträger.

---

<sup>1</sup> IKT beinhaltet relevante Telekommunikationsinfrastrukturen sowie IKT-Hardware und IKT-Dienstleistungen.

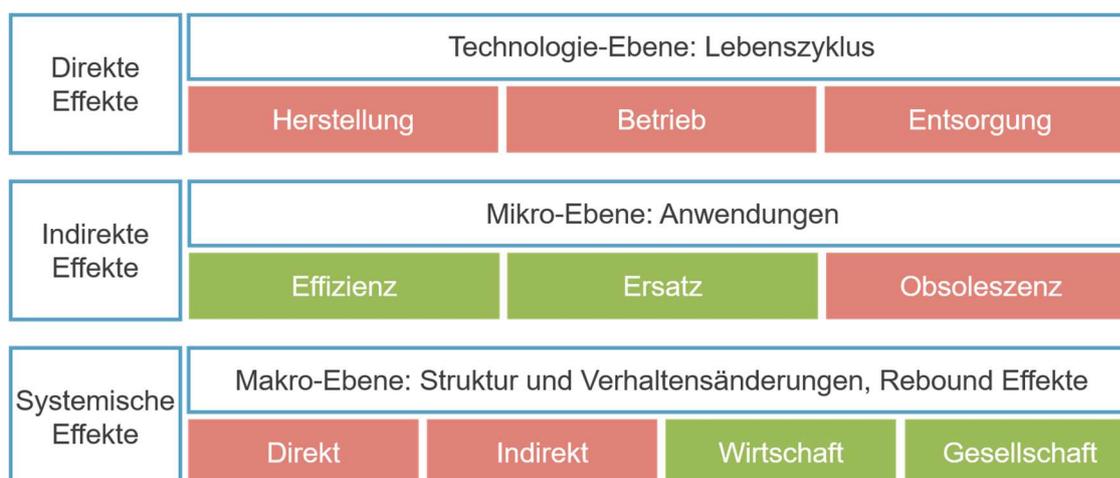
## 2. Theoretische Überlegungen

Wenn Digitalisierung und IKT zur Dekarbonisierung beitragen sollen, müssen ihre positiven indirekten Effekte auf Mikro- und Makroebene – wie die Senkung des Energieverbrauchs oder die Erleichterung des Umstiegs auf erneuerbare Energien – die direkten nachteiligen und anderen negativen indirekten und systemischen Effekten überwiegen. Auswirkungen der Digitalisierung auf den Energieverbrauch sind von folgenden zentralen Effekten abhängig:

- Direkte Effekte: Herstellung, Betrieb und Entsorgung von IKT-Komponenten
- Indirekte Effekte: Energieeffizienz- und Ersatzeffekte vs. Obsoleszenzeffekte
- Systemische Effekte: Reboundeffekte und interagierende Effekte auf Makroebene in Bezug auf Gesellschaft, Wirtschaftswachstum und sektoraler Wandel

Abbildung 1 zeigt in vereinfachter Form, welche Effekte die drei Wirkungsebenen erwarten lassen können.

Abbildung 1: Drei Wirkungsebenen von Digitalisierung auf CO<sub>2</sub> Emissionen



Quelle: Gotsch (2020).

Die Literatur deutet, den allgemeinen Zusammenhang zwischen IKT und Energieverbrauch ganzer Volkswirtschaften betrachtend, auf einen positiven Zusammenhang hin, d.h. mehr Digitalisierung bzw. mehr an IKT führen demnach zu mehr Stromverbrauch. Eine Paneldatenanalyse von Salahuddin und Alam (2016) für OECD Länder zeigt, dass langfristig ein Anstieg der Internetnutzer um 1% den Pro-Kopf-Stromverbrauch um 0.026% erhöht. Dieser positive Zusammenhang gilt jedoch weder für alle Länder noch alle Energieträger, vor allem weil es Unterschiede in dem „Energy-Mix“ gibt bzw. in den Anteilen des produzierten Stroms aus erneuerbaren Energiequellen. Schulte et al. (2016) untersuchen einzelne Sektoren in OECD Ländern und kommen zu dem Ergebnis, dass "eine 1%-ige Erhöhung des IKT-Kapitalstocks den Energiebedarf um 0.235% reduziert". Interessanterweise ist diese Reduktion nicht auf eine Verringerung des Stromverbrauchs zurückzuführen, sondern auf eine Verringerung des Verbrauchs anderer, nicht-elektrischer Energien. Eine mögliche Erklärung ist, dass die direkten Effekte von IKT und IKT-Dienstleistungen meist auf Strom beruhen, während IKT-Anwendungen in anderen Teilen der Wirtschaft andere Energieträger einsparen können. Sollten die

Erkenntnisse von Schulte et al. (2016) zutreffen, können auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Digitalisierung und den Einsatz von IKT reduziert werden, sofern der notwendige zusätzliche Strom durch erneuerbare Energien bereitgestellt wird und der Einsatz anderer Energieträger sinkt. Somit bleibt zu klären, wie die in Abbildung 1 identifizierten Effekte einzeln zur Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen.

## 2.1. Direkte Effekte

Die Entwicklung des direkten Energieverbrauchs des IKT-Sektors hängt von zwei Aspekten ab: dem Wachstum des Sektors allgemein und der Veränderung der Energieintensität des Sektors. Die Definition des IKT-Sektors ist von Studie zu Studie unterschiedlich, umfasst aber in der Regel die Produktion, Nutzung und Entsorgung von Hardware, die Software-Entwicklung, die Telekommunikations- sowie IT- und andere Informationsdienstleistungen.

Der IKT-Sektor ist in den letzten Jahren rasant gewachsen. Zum Beispiel dokumentieren Mas et al. (2017), dass die mittleren jährlichen Wachstumsraten der Wertschöpfung des IKT-Sektors in den meisten Ländern zwischen 2006 und 2015 höher als die mittleren jährlichen Wachstumsraten der gesamten Volkswirtschaft waren. Die immer größer werdende Bedeutung von IKT spiegelt sich auch in der wachsenden Rolle des IKT-Kapitals wider. Der IKT-Kapitalstock wuchs in den Jahren 1992 bis 2007 in den USA, Großbritannien, Deutschland, Italien und Spanien um mehr als 5% pro Jahr (Strauss und Samkharadze, 2011).

## 2.2. Energieeffizienz vs. Rebound- und Obszoleszenzeffekte

Parallel zum Kapitalstock steigt auch die Energieeffizienz im IKT-Sektor seit Jahrzehnten. Koomey et al. (2010) zeigen, dass Prozessoren effizienter geworden sind. Im Einklang hierzu besagt das Koomey'sche Gesetz, dass sich der Energieverbrauch pro Recheneinheit früher etwa alle 1.5 Jahre halbiert hat. In ähnlicher Weise ist der Energieverbrauch pro Datenübertragung, dem eine fortschreitende Entwicklung in zukünftigen Jahren zugesagt wird, gesunken (Coroama und Hilty, 2014). Ebenfalls haben Rechenzentren einen schnellen Anstieg der Energieeffizienz erfahren (Avgerinou et al., 2017).

Es gibt sowohl theoretische Argumente als auch immer mehr praktische Beispiele dafür, dass die Digitalisierung Umweltvorteile und Energieeinsparungen in allen großen sektoralen Anwendungsbereichen mit sich bringen kann. Neben sektorenübergreifenden Anwendungen der Telekommunikationsbranche und urbanen Anwendungen sind dies Potenziale der Digitalisierung in den großen wirtschaftlichen Sektoren (Verkehr, Industrie, Energie, Landwirtschaft) in Hinblick auf Ressourcenverbrauch und Energieeinsparung:

- Sektorenübergreifende Anwendungen (z.B. Telearbeit)
- Anwendungen im urbanen Raum (Smart City)
- Anwendungen im Verkehr (Smart Mobility)
- Anwendungen in der Industrie (Smart Manufacturing)
- Anwendungen in der Energie (Smart Energy)

- Anwendungen in der Landwirtschaft (Smart Farming)

In Summe ist der identifizierte Effekt, ob Digitalisierung die allgemeine Energieeffizienz signifikant steigern kann, nicht eindeutig. Jedoch wäre selbst bei positiven Energieeffizienzeffekten der Gesamteffekt auf den Energieverbrauch aufgrund von vielfältigen Reboundeffekten unklar. Neben möglichen Obsoleszenzeffekten, also vorzeitiger Entsorgung noch funktionstüchtiger Komponenten, stellen Reboundeffekten die negativen indirekten Effekte dar, die sich durch die Anwendung von neuen Technologien ergeben und den positiven indirekten Effekten aus Effizienzgewinne und Ersatzwirkungen sowie positive Enablereffekten auf der Anwendungsebene gegenüberstehen. Durch eine höhere Effizienz können Produkte hergestellt und Dienstleistungen mit weniger Ressourcen und häufig zu geringeren Kosten erbracht werden. Dies beeinflusst wiederum das Kaufverhalten und die Produktnutzung. Ein Reboundeffekt entsteht, wenn aufgrund steigender Effizienz durch geändertes Konsumverhalten in Summe mehr konsumiert wird, was zum Anstieg des Ressourcenverbrauches führt. In der allgemeinen Literatur zu Reboundeffekten wird diskutiert, warum Steigerungen der Energieeffizienz nicht zu einer anteiligen Senkung des Energieverbrauchs führen. Der Grund dafür ist, dass Steigerungen der Energieeffizienz den Energieverbrauch über verschiedene Mechanismen wieder fördern können. Hier wären beispielsweise die (Wieder-)Verwendung der eingesparten Mittel oder die Substitution anderer Produktionsfaktoren, wie Humankapital durch Energie zu nennen. Die Schätzungen zur gesamten mengenmäßigen Dimension der Reboundeffekte sind heterogen. Die meisten Untersuchungen mit Fokus auf Reboundeffekten kommen jedoch zu dem Schluss, dass diese Effekte groß genug sind, um eine ausreichende absolute Reduzierung der Energienachfrage zu verhindern (z.B. Sorrell, 2010).

### 2.3. Wirtschaftliches und digitales Wachstum

Je schneller die Wirtschaft wächst, desto stärker müssen Energieeffizienzsteigerungen und/oder sektorale Veränderungen sein, um eine absolute Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Emissionen zu erreichen. Eine zentrale Frage ist daher, wie Digitalisierung und IKT das Wirtschaftswachstum beeinflussen. Salahuddin und Alam (2016) identifizieren einen positiven Zusammenhang zwischen IKT und Wirtschaftswachstum in OECD Ländern. Katz und Koutroumpis (2013) finden, dass ein Anstieg von 10 Punkten in einem selbst konstruierten Digitalisierungsindex (von 0 bis 100) einen annualisierten Effekt von 0.5% auf das Bruttoinlandsprodukt (BIP) von 2004 bis 2010 hat. Farhadi et al. (2012) ermitteln für ein Panel von 159 Ländern von 2000 bis 2009, dass der Anstieg eines IKT-Index um 1% das Wirtschaftswachstum um 0.17% erhöht. Außerdem stellen sie fest, dass dieser Zusammenhang in Ländern mit hohem Einkommen stärker ausgeprägt ist.

### 2.4. Sektoraler Strukturwandel

Ein weiterer wesentlicher interagierender Effekt, um den Zusammenhang zwischen Digitalisierung und Energieverbrauch zu erklären, ist der sektorale Wandel, der mit der Digitalisierung einhergeht. Die Frage, die es hier zu beantworten gilt, ist, ob die Digitalisierung mit einer „Tertiarisierung“ einhergeht. Um Tertiarisierung handelt es sich, wenn der Anteil der Dienstleistungen am gesamten BIP zunimmt. Gleichzeitig ist es aber durchaus möglich, dass

auch die industrielle (Smart Manufacturing) und/oder landwirtschaftliche (Smart Farming) Produktion aufgrund von Digitalisierung weiterwächst, jedoch in geringerem Maße als die der Dienstleistungen. Ob diese Annahme zutrifft und ob Digitalisierung dadurch zu einem Rückgang des Energieverbrauchs beiträgt, hängt von drei Aspekten ab.

Erstens gilt es zu klären, inwiefern sich die Hypothese der Tertiarisierung bewahrheitet. In den OECD Ländern ist die Wertschöpfung aus IKT-Gütern (IKT-Herstellung und Telekommunikation) gesunken<sup>2</sup>, während die Wertschöpfung aus Dienstleistungen (Softwareveröffentlichung, IT- und andere Informationsdienstleistungen) gestiegen ist (OECD, 2017). In ähnlicher Weise stellt Eurostat (2019) fest, dass die Wertschöpfung in der IKT-Herstellung in etwa konstant geblieben ist, während die Wertschöpfung in den IKT-Dienstleistungen für 16 EU-Länder von 2010 bis 2016 um 18.3% gestiegen ist. Die Entwicklung innerhalb des IKT-Sektors begünstigt also eine Tertiarisierung. Die Frage, ob die Digitalisierung auch die Tertiarisierung in der übrigen Wirtschaft fördert, ist damit jedoch nicht abschließend beantwortet. In vielen Ländern findet eine Tertiarisierung statt, jedoch gibt es keine empirischen Untersuchungen zur Auswirkung der Digitalisierung auf die sektorale Gesamtzusammensetzung der Wirtschaft.

Der zweite Aspekt, ob die Digitalisierung über die Tertiarisierung zu weniger Energieverbrauch führt, den es zu klären gilt, betrifft die Energieintensität der neuen Dienste. Es ist zunächst naheliegend anzunehmen, dass eine Verlagerung vom Industrie- zum Dienstleistungssektor die Energieintensität der Wirtschaft verringern würde, allerdings sind Dienstleistungen, die sich aus der Anwendung von IKT ergeben, im Vergleich zu anderen Dienstleistungen relativ energieintensiv. Die zunehmende Rolle von IKT in Dienstleistungen ist daher ein wichtiger Faktor, der die Energieintensität von Dienstleistungen erhöht.

Drittens ist die Verlagerung auf Dienstleistungen oder Tertiarisierung intuitiv mit einem gewissen Grad an Entmaterialisierung („Dematerialisation“) verbunden, d. h. mit der Verringerung der Materialintensität von Produkten. Verfügbare Literatur ist dennoch unschlüssig was die Stärke dieses Effektes betrifft (z.B. Kander, 2005; Henriques und Kander, 2010; Mulder et al. 2014)

Um all die genannten Wirkungskanäle des IKT-Bereichs in Hinblick auf CO<sub>2</sub>-Emissionen korrekt in das Untersuchungsdesign zu implementieren und den tatsächlichen Gesamteffekt von IKT abschätzen zu können, ist es von Relevanz weitere wichtige Determinanten der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu identifizieren, um für diese Erklärungsfaktoren in späterer Folge in der empirischen Untersuchung „kontrollieren“ zu können.

---

<sup>2</sup> Eine Tertiarisierung entsteht zum gewissen Grad auch durch „carbon leakage“, das heißt Verlagerung der energieintensiven Tätigkeiten in die Länder mit niedrigeren Umweltstandards.

### 3. Determinanten der Emissionen

Treiber und Korrelate von CO<sub>2</sub>-Emissionen lassen sich grob in drei Kategorien einteilen: (sozio-)ökonomische, institutionelle und politische Determinanten (Abschnitt 3.1). Darüber hinaus sollen auch Studien zum direkten Einfluss von IKT-Determinanten (Abschnitt 3.2) in Ergänzung zu den bereits diskutierten interagierenden IKT-Effekten (Abschnitte 2.3 und 2.4) beschrieben und angesichts der zugrunde liegenden Forschungsfrage tabellarisch zusammengestellt werden.

#### 3.1. Makroökonomische, institutionelle und politische Determinanten

Das **BIP pro Kopf** gilt als einer der wichtigsten erklärenden Treiber der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dieser wird mit den CO<sub>2</sub>-Emissionen in der so genannten „Environmental Kuznets Curve“ (EKC) in Beziehung gesetzt. Die EKC fasst zusammen, was als umgekehrte U-förmige Beziehung zwischen Emissionen und BIP (pro Kopf) bekannt geworden ist. Ein linearer Zusammenhang zwischen CO<sub>2</sub>-Emissionen und BIP pro Kopf wurde in frühen Studien bestätigt (Shafik, 1994). Eine Entkopplung des Wachstums der CO<sub>2</sub>-Emissionen vom Wirtschaftswachstum scheint jedoch möglich zu sein, wenn entweder die CO<sub>2</sub>-Emissionen als Nebenprodukt anderer Vermeidungsaktivitäten zurückgehen (Holtz-Eakin und Selden, 1995) oder die Institutionen sowie die Umweltvorschriften an das steigende Pro-Kopf-Einkommen angepasst werden. Unter diesen und ähnlichen Annahmen wurden in Modellen umgekehrte U-förmige Funktionen identifiziert (De Bruyn et al., 1998, Holtz-Eakin und Selden, 1995, Moomaw und Unruh, 1997), gefolgt von N-förmigen (kubischen) Spezifikationen (z. B. Galeotti und Lanza, 2005, Friedl und Getzner, 2003). Dinda (2004) bietet einen Überblick über die Literatur zur EKC-Hypothese, und Shahbaz und Sinha (2019) bieten eine Analyse der EKC-Hypothese speziell für CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Eine weitere Determinante, die in der Literatur mit CO<sub>2</sub>-Emissionen in Verbindung gebracht wird, ist der **internationale Handel**. Dem Freihandel werden gegenläufige Effekte zugeschrieben. Einerseits erhöht ein Anstieg des Handelsvolumens die Umweltverschmutzung durch eine Zunahme der Produktion oder des Transports. Andererseits kann der Handel die Umweltqualität durch den Technologieeffekt (d.h. wenn das Einkommen durch den Handel steigt, werden die Umweltvorschriften verschärft, was die Reduzierung der Umweltverschmutzung durch zusätzliche Innovationen fördert) und/oder den Kompositionseffekt verbessern. Dieser Kompositionseffekt wird auf zwei miteinander verknüpfte Hypothesen zurückgeführt: Die „Verdrängungshypothese“ und die „Verschmutzungs-Hafen“-Hypothese, die besagen, dass sich die Zusammensetzung der Produktion sowohl in Industrie- als auch in Entwicklungsländern durch die Verlagerung von emissionsintensiven Betrieben ändert. Der „Verschmutzungs-Hafen“-Effekt kann dennoch durch den Abschluss von Freihandelsabkommen, die Umweltschutzmaßnahmen beinhalten, reduziert werden (Brandi et al., 2020). Weitere Arbeiten zeigen, dass der Effekt des Handels auf Emissionen insbesondere von der Art der Exporte abhängt. Eine (kausale) emissionsreduzierende Wirkung des Handels mit umweltfreundlichen Gütern wurde von Zugravu-Soilita (2018) gefunden. Einen weniger starken Zusammenhang in dieser Richtung zeigen auch Mealy und Teytelboym (2020), die einen Komplexitätsindex vorschlagen, der auf Exporten von umweltfreundlichen Produkten basiert.

Der Einfluss des **Bevölkerungswachstums** auf die Umweltqualität ist eindeutig positiv. Die genaue Größenordnung des Effekts, d.h. in welchem Verhältnis die Emissionen mit einer Zunahme der Bevölkerung (z.B. eins zu eins) zunehmen, ist jedoch weniger eindeutig. Forscher in der „Malthusianischen“ Tradition folgen der Annahme, dass die Ausbeutung natürlicher und mineralischer Energieressourcen mit dem Bevölkerungswachstum überproportional zunimmt. Andere Forscher in der „Boserupianischen“ Tradition argumentieren, dass die Entwicklung von Wissenschaft und technologischer Innovation und die daraus resultierende Fähigkeit der Menschheit, technologische Lösungen für Umweltprobleme bereitzustellen, umso stärker ist, je größer der Bevölkerungsdruck ist. Studien finden eine Elastizität der Emissionen in Bezug auf die Bevölkerung zwischen 0,32 (Martinez-Zarzoso und Maruotti, 2011) und 2,25 (Knight et al 2013).

Eng mit der Bevölkerung verbunden sind **Urbanisierung** und **Bevölkerungsdichte**. Diese Charakteristika können zu einem höheren Emissions-/Energieverbrauch führen, da die Verstädterung mit der Industrialisierung Hand in Hand geht. Dies impliziert außerdem eine Verlagerung weg vom Primärsektor hin zu Industrie und Dienstleistungen. So kann eine stärkere Verstädterung mit einem höheren Pro-Kopf- und Flächenverbrauch an fossilen Brennstoffen und Industriechemikalien verbunden sein. Andererseits kann die Verstädterung auch zu einem geringeren Energieverbrauch führen, da Städte von der Energieeffizienz profitieren, indem sie das Wohnen in Hochhäusern ermöglichen und die Entfernung zur Arbeit verkürzen, so dass man zu Fuß oder mit dem Fahrrad fahren kann. Die meisten Belege in der Literatur deuten dennoch auf einen positiven Zusammenhang zwischen Urbanisierung und Emissionen hin (z.B. Knight et al. 2013, Menz und Welsch 2012) oder einen nicht-linearen (Zhu et al. 2012, Martinez-Zarzoso und Maruotti, 2011).

Der Einfluss des **technischen Fortschritts** auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen ist a priori unsicher. Angesichts der positiven Auswirkungen von **F&E** auf Wachstum und Handel (Castellani und Pieri, 2013; Minniti und Venturini, 2017) könnten sie die Umweltqualität durch die mit höherem Wachstum und größerer Handelsoffenheit verbundenen Skaleneffekte einer größeren Produktion negativ beeinflussen. Trotz neuer Technologien, die das Potenzial haben, die Effizienz zu verbessern, kann die Steigerung der Produktion immer noch die Nutzung zusätzlicher natürlicher Ressourcen erfordern, was die CO<sub>2</sub>-Emissionen erhöhen könnte. Dieses potenzielle Problem wird durch abnehmende Erträge aus F&E im Laufe der Zeit noch verschärft. Wenn der Bestand an vorhandenem Wissen zunimmt, wird es schwieriger, neue Durchbrüche zu erzielen, was im Laufe der Zeit zu einem geringeren Niveau an induzierter F&E führt (Newell, 2009). Gleichzeitig erfordert das Wirtschaftswachstum aber immer mehr Input an natürlichen Ressourcen.

Ein besonders problematisches Merkmal, das die internationale Zusammenarbeit bei der Umweltqualität erheblich behindert, ist, dass die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen als ein globales Gemeinschaftsproblem mit zeitlichen und räumlichen Dimensionen betrachtet werden kann, was das „Trittbrettfahren“ besonders problematisch macht. Da es sich um ein politisches Problem handelt, ist es naheliegend, dass **politische Faktoren** die CO<sub>2</sub>-Emissionen beeinflussen werden. So sprechen sich z. B. ideologisch links orientierte Parteien in der Regel für eine starke Erhöhung der Steuern auf Kraftstoffe aus (Neumayer, 2004). Es ist jedoch möglich, dass andere politische Faktoren zwar nicht gegen die Reduktion sprechen, aber den Reduktionsprozess

verlangsamen können. Die Fragmentierung der Regierungen könnte zu einer geringeren Wirkung und zu Problemen bei der Umsetzung bestimmter Maßnahmen führen, da die Kosten für die Entscheidungsfindung mit der Anzahl der Entscheidungsträger in den Regierungen steigen. Generell sollte eine Demokratie jedoch mit einem höheren Umweltschutz verbunden sein, da Präferenzen für Umweltqualität effizienter offengelegt werden (Farzin und Bond, 2006).

Der Zusammenhang zwischen **Einkommensungleichheit** und Umweltqualität ist unklar. Einerseits wird argumentiert, dass Umweltqualität in erster Linie ein Anliegen der wohlhabenden Gruppen (obere und obere mittlere Einkommensgruppen) ist, die bereits ihre Grundbedürfnisse befriedigt haben und einen relativ hohen Lebensstandard genießen. Andererseits wird argumentiert, dass die Armut die Menschen dazu zwingt, der Beschäftigung Vorrang vor der Umweltqualität einzuräumen, was sich in der Wahl von Berufen und Wohnorten niederschlägt, die viel stärker toxischen Schadstoffen und Abfällen aus der Industrie ausgesetzt sind. Da das Wachstum dieser Industrien die Beschäftigung in den Städten erhöht und damit die Einkommensungleichheit verringert, ist demnach eine negative Korrelation zwischen der Einkommensungleichheit und der Messung bestimmter Arten von städtischer Umweltverschmutzung zu erwarten. Die empirische Evidenz zu dieser Frage ist gemischt (z.B. Scruggs 1998; Torras und Boyce 1998).

Schließlich scheint auch die Qualität von **Institutionen** einen Einfluss auf die Höhe der Emissionen zu haben. Panayotou (1996) befasst sich mit der Rolle von Politik und Institutionen und deren Beziehung zur Umweltqualität. Er kommt zu dem Ergebnis, dass eine integrativere und institutionell unabhängigere Regierungsführung und Politik die Umweltqualität deutlich verbessern kann. Dasgupta et al. (1999) betonen die Bedeutung von institutioneller Entwicklung und Umweltregulierung. Dennoch ist es auch möglich, dass die Qualität von Institutionen über den positiven Einfluss auf das Wirtschaftswachstum zu höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen führt. Zum Beispiel finden Goel et al. (2013), dass Korruption und „Schattenwirtschaft“ mit niedrigeren CO<sub>2</sub>-Emissionen korrelieren.

Tabelle 1 fasst die Vorhersagen aus der Literatur zusammen. Bei den meisten der relevanten Erklärungsfaktoren kann demnach keine eindeutige Voraussage über den zu erwartenden Effekt auf CO<sub>2</sub>-Emissionen aus theoretischen Überlegungen heraus abgeleitet werden.

*Tabelle 1: Determinanten der CO<sub>2</sub>-Emissionen*

<b>Variable</b>	<b>Voraussichtlicher Effekt auf Emissionen</b>
BIP pro Kopf	+/-/nicht-linear
Handelsintensität	+/-
Bevölkerung	+
Bevölkerungsdichte	+/-/nicht-linear
Urbanisierungsrate	+/-
F&E-Intensität	+/-
Linksgerichtete Regierung	-
Regierungsfragmentierung	+
Demokratie	-
Einkommensungleichheit	+/-
Institutionelle Qualität	+/-

Quelle: Eigene Darstellung. • Erstellt mit [Datawrapper](#)

**ECO AUSTRIA**  
INSTITUT FÜR  
WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

### 3.2. IKT-spezifische Bestimmungsdeterminanten

Neben den in Tabelle 1 zusammengefassten generellen Bestimmungsdeterminanten, enthalten die Tabellen 2 und 3 eine strukturierte Darstellung all derjenigen Literaturbeiträge, die einzelne IKT-relevante Variablen als weitere direkte Bestimmungsdeterminanten von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Stromverbrauch empirisch untersucht haben. Dies ist angesichts des gegenständlichen Untersuchungsgegenstandes von speziellem Interesse und dient auch zum Vergleich und zur Einordnung der eigenen Schätzergebnisse. Der tabellarische Überblick enthält Informationen in Hinblick auf Autoren und Erscheinungsjahr, verwendete Daten zur Messung der IKT-Größen, empirische Schätzmethode sowie die wesentlichsten Untersuchungsergebnisse. Des Weiteren werden die Tabelleneinträge nach CO<sub>2</sub>-Emissionen und Stromverbrauch gegliedert, um eine eindeutige Gegenüberstellung der empirisch identifizierten Effekte zu ermöglichen. Die letzte Spalte weist jeweils auf die Ergebnisse der einzelnen Studien in Hinblick auf CO<sub>2</sub> erhöhende (+), senkende (-) sowie insignifikante (~) Zusammenhänge hin.

Die in Tabelle 2 aufgelisteten Studien, die sich auf Entwicklungs-, Schwellen- oder Transformationsländer spezialisieren, finden einen positiven Zusammenhang zwischen dem Stromverbrauch und den verwendeten IKT-Variablen, wie Internetnutzer, IKT-Importe oder Anzahl der Computer. Somit führt eine Zunahme der jeweiligen IKT-Determinante zu einer Erhöhung des Stromverbrauchs (Afzal und Gow, 2016; Chimbo, 2020 und Sardorsky, 2012). Im Gegensatz dazu weisen die Arbeiten von Bernstein und Madlener (2017), Schulte et al. (2016), Ishida (2015) und Collard et al. (2005), welche auf Daten zu IKT-Investments und des IKT-Kapitalstocks aus entwickelten Ländern basieren, bei den relevanten Koeffizienten negative Vorzeichen auf. Hingegen finden wiederum Salahuddin und Alam (2016), welche ebenfalls ein Panel aus OECD Ländern verwenden, dass eine Erhöhung der Internetnutzer um 1% den Stromverbrauch pro Kopf um 0.026% steigen lässt. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu den zuletzt genannten Studien und spiegelt die kontroverse Rolle des IKT-Bereichs in Bezug auf die Umweltqualität wider.

Die in Tabelle 3 aufgelisteten Studien, welche den Fokus auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen als Ergebnisvariable legen, zeigen ein eindeutigeres Bild: Lediglich die Arbeiten von Khan et al. (2018) und Zhang et al. (2019) identifizieren positive Zusammenhänge. Allerdings liegt in diesen Untersuchungen der Fokus auf Entwicklungsländer. Zhang et al. (2019) finden negative Koeffizienten für Länder mit hohem und mittlerem Einkommen und positive Koeffizienten für Entwicklungsländer bzw. Länder mit niedrigem Einkommen. Diese Ergebnisse bestätigen somit die obig dargestellten Ergebnisse in Zusammenhang mit dem Stromverbrauch. Alle anderen Studien beschreiben den Zusammenhang zwischen IKT-Variablen und den CO<sub>2</sub>-Emissionen als negativ signifikant (Godil et al., 2020; Kopp und Lange, 2019; Zhang und Liu 2015 und Zhang et al., 2019) oder als insignifikant (Amri, 2018).

Tabelle 2: Empirische Studien zur Auswirkung von IKT auf Stromverbrauch

Autoren	Daten	IKT-Variablen	Methodik	Hauptergebnisse	+/-
Chimbo -2020	21 Transformations-Ökonomien 1995-2014	Internetnutzer (in % der Bevölkerung)	Pooled OLS, Fixed Effects, Random Effects	Eine Zunahme der Internetnutzer um 1% erhöht den Stromverbrauch um 0.031%. Insignifikante Ergebnisse bei Pooled OLS.	+
Bernstein & Madlener -2017	8 europäische Länder, 5 Sektoren 1991-2005	IKT-Kapitalstock	Fixed Effects	Bei einer Ausweitung des Kapitalstocks der Telekommunikationsgeräte um 1% sinkt in allen analysierten Sektoren der Stromverbrauch (von 0.114% bis 0.564%).	-
Afzal & Gow -2016	11 Entwicklungsländer 1990-2014	Internetnutzer pro 100 Menschen Mobilfunkanschlüsse pro 100 Menschen IKT-Importe in % der Gesamtimporte	(Pooled) Mean Group Regression, Fixed Effects	Die IKT-Variablen weisen langfristig insgesamt einen positiven Koeffizienten (Internetnutzer 0.05%, Mobilfunkanschlüsse 0.06% & IKT-Importe insignifikant) auf, somit erhöht eine Steigerung dieser um 1% den Stromverbrauch um den entsprechenden Wert. Kurzfristig sind lediglich die Mobilfunkanschlüsse, in der Höhe von 0.02%, signifikant von Null verschieden.	+
Salahuddin & Alam -2016	26 OECD Länder 1985-2012	Internetnutzer pro 100 Menschen Mobilfunkanschlüsse pro 100 Menschen	Pooled Mean Group Regression	Eine Erhöhung der Anzahl an Internetnutzern um 1% erhöht den pro Kopf Stromverbrauch um 0.026%. Eine Erhöhung der Anzahl an Mobilfunkanschlüssen hat eine Erhöhung des Stromverbrauchs pro Kopf um 0.01% zur Folge.	+
Schulte et al. -2016	10 OECD Länder, 27 Industrien 1995-2007	IKT-Kapitalstock	Pooled OLS	Eine 1%-Erhöhung des IKT-Kapitals bringt eine Reduzierung der gesamten Energienachfrage von 0.235% mit sich. Aufgespalten für reine Elektrizität ist der Koeffizient insignifikant und für andere Energien -0.319%.	-
Ishida -2015	Japan 1980-2010	IKT-Investment	Autoregressive Distributed Lag	Eine 1%-Erhöhung des langfristigen IKT-Investments reduziert den primären Energieverbrauch um 0.155%.	-
Sardorsky -2012	19 Schwellenländer 1993-2008	Internetnutzer pro 100 Menschen Mobilfunkanschlüsse pro 100 Menschen Computer pro 100 Menschen	Fixed Effects	Eine Erhöhung der Internetnutzer um 1% erhöht den kurzfristigen Stromverbrauch um 0.027%. Langfristig wäre dieser Effekt bei 0.108%. Ähnliche Ergebnisse für Mobilfunkanschlüsse und Anzahl der Computer.	+
Collard et al. -2005	Frankreich, 6 Sektoren 1986-1998	IKT-Kapitalstock	Fixed Effects	Ein 1%iger Anstieg im IKT-Kapital führt zu einer Reduktion der elektrischen Energieintensität um 0.058%.	-

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 3: Empirische Studien zur Auswirkung von IKT auf CO<sub>2</sub>-Emissionen

Autoren	Daten	IKT-Variablen	Methodik	Hauptergebnisse	+/-
Godil et al.	Pakistan	Internetnutzer pro 100 Menschen	Quantile Autoregressive Distributed Lag	Die untersten zwei und die obersten drei Quantile weisen ein signifikant negatives Vorzeichen auf, somit werden in Pakistan ungeachtet vom Emissionslevel, die CO <sub>2</sub> -Emissionen durch eine Erhöhung der Internetnutzer verringert.	-
-2020	1995-2018 (Quartale)	Mobil-Internetnutzer pro 100 Menschen			
Kopp & Lange	37 OECD Länder	IKT-Investment	Fixed Effects	Eine 1%-Erhöhung des IKT-Investments würde ceteris paribus die CO <sub>2</sub> -Emissionen um 0.56% senken.	-
-2019	1990-2009 (Produktionsseite)	Personen, die das Internet in den letzten 3 Monaten für Käufe (Güter und Dienstleistungen) genutzt haben		Eine Ausweitung des Online-Shoppings um 1% würde die CO <sub>2</sub> -Emissionen um 0.34% senken.	
	2008-2014 (Verbraucherseite)				
Zhang et al.	73 Länder	Mobil- und Festnetzanschlüsse	Fully Modified & Dynamic OLS	Beide IKT-Variablen weisen im Zusammenhang mit den CO <sub>2</sub> -Emissionen in Ländern mit hohem und mittlerem Einkommen signifikant negative Ergebnisse auf. In Ländern mit niedrigem Einkommen sind die Ergebnisse signifikant positiv.	-
-2019	1990-2015				+
Amri	Tunesien	Mobil- und Festnetzanschlüsse pro 100 Menschen	Autoregressive Distributed lag	Insignifikante Ergebnisse in Bezug auf die IKT-Variable	~
-2018	1975-2014				
Khan et al.	11 Entwicklungsländer	Internetnutzer pro 100 Menschen	(Augmented) Mean Group Estimator	Der Koeffizient der Internetnutzer weist einen signifikant positiven Zusammenhang mit CO <sub>2</sub> -Emissionen auf, was bei einer Ausweitung der IKT-Variable die CO <sub>2</sub> -Emissionen in den untersuchten Entwicklungsländern erhöht.	+
-2018	1990-2014	Mobil-Internetnutzer pro 100 Menschen			
Zhang & Liu	29 Provinzen in China	Bruttoproduktion der Elektronik- und Informationsindustrie	Fixed Effects, FGLS	CO <sub>2</sub> -Emissionen in China sinken um 0.024%, wenn die IKT-Industrie um 1% wächst.	-
-2015	2000-2010				

Quelle: Eigene Darstellung • Erstellt mit Datawrapper

## 4. Daten und Methodik

### 4.1. Empirisches Untersuchungsdesign

In dieser Untersuchung wird auf panelökonometrische Methoden zurückgegriffen. In der empirischen Schätzgleichung wird konkret auf ein lineares Panelmodell mit länderspezifischen festen Effekten zur Kontrolle sämtlicher zeitinvarianter Faktoren auf Länderebene sowie mit Periodeneffekten zur Kontrolle sämtlicher Einflussfaktoren, die alle Untersuchungseinheiten (OECD Länder) zu einem bestimmten Zeitpunkt zugleich (in ähnlicher Form) beeinflussen, verwendet. Dieser Ansatz wird in der panelökonometrischen Literatur auch als „two-way Fixed Effects“-Modell bezeichnet. Zur Identifikation von kausalen Effekten wird darüber hinaus neben der Basisspezifikation in Gleichung (1) im Rahmen der Robustheitsanalyse auch ein dynamisches Modell spezifiziert, worin durch Hinzunahme der zeitlich um eine Periode verzögerten abhängigen Variablen neben den sonstigen erklärenden Variablen auch für nicht beobachtbare zeitvariante Heterogenität kontrolliert wird (Gleichung (2), worin der hochgestellte Index  $d$  für „dynamisch“ steht). Die resultierenden Schätzgleichungen für OECD Land  $i$  im Jahr  $t$  lauten wie folgt:

$$\ln(CO2_{it}) = \alpha_0 + \mathbf{IKT}_{it}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{X}_{it}\boldsymbol{\gamma} + \alpha_i + \alpha_t + [\alpha_{2i}t] + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

$$\ln(CO2_{it}) = \alpha_0^d + \alpha_1^d \ln(CO2_{it-1}) + \mathbf{IKT}_{it}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{X}_{it}\boldsymbol{\varphi} + \alpha_i^d + \alpha_t^d + [\alpha_{2i}^d t] + \mu_{it} \quad (2)$$

Die abhängige Variable, die die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Land  $i$  im Jahr  $t$  misst, wird gemäß den Gleichungen (1) und (2) in logarithmierter Form angegeben,  $\ln(CO2_{it})$ .  $\mathbf{IKT}$  bezeichnet einen Vektor von Variablen, die mehrere IKT-spezifische Indikatoren mit Fokus auf Kommunikationsinfrastrukturen messen. Der Vektor  $\mathbf{X}$  umfasst verschiedenste makroökonomische und institutionelle Kontrollvariablen, welche gemäß den Ausführungen zum Stand der empirischen Literatur in Abschnitt 3 als relevant identifiziert wurden. Der zeitunabhängige Koeffizient  $\alpha_i$  stellt die länderspezifischen festen Effekte, der länderunabhängige Koeffizient  $\alpha_t$  die zeitspezifischen Effekte dar; letztere messen insbesondere alle in der Schätzgleichung nicht aufgenommenen (unbeobachteten) makroökonomischen „Schocks“, die alle OECD Länder zu einem bestimmten Zeitpunkt in gleicher bzw. zumindest sehr ähnlicher Weise betreffen. Neben generellen Periodeneffekten werden auch länderindividuelle Trendeffekte ( $\alpha_{2i} t$ ) in einzelnen Regressionen geschätzt.  $\varepsilon_{it}$  beschreibt schließlich in additiver Form sonstige unbekanntes zeitpunktspezifische Eigenschaften auf Länderebene (idiosynkratischer Fehlerterm).

## 4.2. Daten

Um die Auswirkungen der Digitalisierung auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen gemäß Gleichung (1) (und Gleichung (2)) empirisch schätzen zu können, werden analog zum Großteil der Literatur auch in dieser Untersuchung Paneldaten verwendet. Unser Datensatz beinhaltet Beobachtungen der Jahre 2002 bis 2019 und umfasst 34 OECD Länder.<sup>3</sup> Insgesamt stehen damit maximal  $NT = 34 \times 18 = 612$  Beobachtungen zur Verfügung.<sup>4</sup> Informationen zu den einzelnen Definitionen und Quellen der verwendeten Variablen finden sich in Tabelle 4 im Anhang.

Für die Messung der CO<sub>2</sub>-Emissionen werden Daten des Global Carbon Atlas genutzt. Diese wenden, um die CO<sub>2</sub>-Gesamtemissionen pro Land und Jahr zu messen, die Methode von Friedlingstein et al. (2020) an. Die CO<sub>2</sub>-Gesamtemissionen pro Land setzen sich demnach zusammen aus den CO<sub>2</sub>-Emissionen, welche bei der Oxidation von Kohle, Erdöl und Erdgas sowie bei der Verbrennung von Gasen, die durch das Arbeiten mit zuvor genannten Stoffen entstehen; aber auch die Verarbeitung von Zement spielt eine nicht zu vernachlässigende Rolle.<sup>5</sup>

Die Untersuchung beinhaltet im Vektor **IKT** mehrere IKT spezifische Messgrößen. Sie unterscheidet bei glasfaserbasierten (FTTx) Anschlüssen zum einen für den Indikator der Verfügbarkeit dieser Infrastrukturen, wie diese von Netzbetreibern angebotsseitig bereitgestellt werden („homes passed“). Zum anderen bringt die so genannte Adoption zum Ausdruck, inwieweit die zur Verfügung gestellten Anschlüsse auch entsprechend von Haushalten und Unternehmen nachgefragt werden („homes connected“). Da diese Anschlüsse aufgrund von Kosten und verfügbarer Kapazität typischerweise nur als Einzelanschluss pro Haushalt nachgefragt werden, wurden hier jeweils Anschlüsse je Haushalt ausgewiesen. Bei den Basisbreitbandanschlüssen sind sämtliche Anschlüsse mit  $\geq 256$  kbit/s inkludiert und ebenfalls auf Haushaltsebene gewichtet. Neben den Breitband- und Mobilfunkanschlüssen können folgende zusätzlich IKT-relevante Bestimmungsgrößen zur umfassenderen Beschreibung des IKT-Ökosystems in die Schätzgleichungen aufgenommen werden: Telekomgesamtausgaben, die Anzahl von Laptops, Tablets und (sicherer) Internetserver sowie IKT-Importe und -Exporte.

Im Vektor  $X_{it}$  in Gleichung (1) und Gleichung (2) sind folgende Kontrollvariablen, die auch in der empirischen Literatur als Bestimmungsgrößen von CO<sub>2</sub>-Emissionen verwendet wurden, enthalten: das BIP pro Kopf, der Industrieanteil, der Handel in Prozent des BIPs, die Bevölkerung, die Beschäftigungsrate, F&E-Intensität, das Wahlverhalten, der Gini-Index (als Maß für Ungleichheit) sowie die institutionelle Qualität (das Ausmaß der Korruption).

---

<sup>3</sup> Dies sind alle OECD Mitglieder des Jahres 2010. Mit Stand 2021 sind im Panel die OECD Mitglieder Lettland, Litauen und Kolumbien nicht enthalten, da hierfür aufgrund des späteren Mitgliedsstatus keine entsprechenden Zeitreihen zur Verfügung stehen. Für die tatsächlichen politischen Bestimmungsfaktoren des Zeitpunkts der OECD Mitgliedschaft dieser Länder gibt es aber keinerlei offenkundigen Bezug weder zu unserer Ergebnisvariablen, den CO<sub>2</sub>-Emissionen, noch zu den hauptsächlich interessierenden Erklärungsvariablen, den IKT-Indikatoren. Von daher ist auch von keinerlei Stichprobenverzerrung („sample selection bias“) auszugehen, zumal unser Datensatz keine Stichprobe repräsentiert als vielmehr eine beinahe vollständige Erhebung der Gruppe der entwickelten Länder im Zeitraum des Ausbaus moderner Breitbandkommunikationsnetze.

<sup>4</sup> In der Aufbereitung der Daten mussten einzelne fehlende Datenpunkte durch lineare Interpolation sowie, wenn die fehlenden Datenwerte am Anfang oder Ende der Zeitreihe aufgetreten sind, durch konstante Fortschreibung ergänzt werden. Insgesamt basieren rund 1.5% aller Datenpunkte auf eigenen Berechnungen.

<sup>5</sup> Eine genaue Definition ist online abrufbar unter <https://essd.copernicus.org/articles/12/3269/2020/>.

## 5. Ergebnisse

Tabelle 5 im Anhang beinhaltet die Hauptergebnisse der statischen Basisspezifikation in Schätzgleichung (1). Unter Berücksichtigung von allen Erklärungsgrößen zeigen die Regressionsmodelle in (1)-(5) einen insgesamt hoch signifikanten Erklärungsgehalt (F-Test Statistiken auf Gesamtsignifikanz der Regressionsmodelle) und es wird jeweils zwischen 60 und 66% der erklärbaren Variation ( $R^2(\textit{within})$ ) erklärt.

Die inkludierten Regressoren sind zum einen unterteilt in IKT-spezifische Variablen für die Messung der Adoption für leitungsgebundene und mobile Breitbandanschlüsse; bei den FTTx basierten Anschlüssen sind zudem auch die zur Verfügung gestellten Kapazitäten ausgewiesen. Dies deshalb, da hier zum einen eine wesentliche Lücke zwischen Angebot („*homes passed*“) und Nachfrage („*homes connected*“) besteht. Zum anderen erlaubt dies die empirische Abschätzung in Hinblick auf die oben beschriebenen direkten und indirekten Effekte in Verbindung mit der angebotsseitigen zur Verfügung Stellung von Kommunikationsinfrastrukturen bzw. der nachfrageseitigen Nutzung von den darauf basierenden Anschlüssen und Diensten. Während der direkte Effekt in Verbindung mit der Bereitstellung von Infrastrukturen zunächst ausschließlich zur Erhöhung von Stromverbrauch und damit einhergehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen führt, zeitigen die mit der Nutzung induzierten indirekten Effekte potenziell eine entgegengerichtete Wirkung. Es ist jedoch a priori nicht klar, ob letztgenannte die direkten Effekte dominieren, zum anderen gibt es die in Abschnitt 2 beschriebenen gegenläufigen indirekten und systemischen Effekte („Reboundeffekte“, „Obsoleszenzeffekte“). Der Schätzkoeffizient für die Variable *FTTx (homes passed)* bestätigt zum einen den positiven, d.h. (Stromverbrauch und) CO<sub>2</sub>-Verbrauch erhöhenden Effekt der angebotsseitigen Versorgung mit FTTx Infrastruktur. Der Schätzkoeffizient der Variablen *FTTx (homes passed)* ist jedoch insignifikant, dh. statistisch nicht von Null verschieden. Der Schätzkoeffizient für die nutzungsseitige Variable *FTTx (homes connected)* ist hingegen negativ und marginal signifikant in den einzelnen Regressionsmodellen. In Bezug auf die beiden inkludierten FTTx Variablen dominieren also insgesamt die CO<sub>2</sub> senkenden indirekten Effekte. Letzteres gilt auch für die Variable *Basisbreitbandnutzung*. Diese misst zwar sämtliche leitungsgebundenen Breitbandanschlüsse (mit Bandbreiten  $\geq 256$  kbit/s, auf Basis unterschiedlicher Technologien und Infrastrukturen gemäß der Definition in Tabelle 4), da jedoch in den einzelnen Regressionsmodellen (1)-(5) jeweils auch für den Effekt von schnellen FTTx basierten Anschlüssen kontrolliert wird, lässt sich der Effekt der Variable *Basisbreitbandnutzung* tatsächlich auch als solcher interpretieren. In der Größenordnung liegt dieser substanziell über dem Koeffizienten der Variablen *FTTx (homes connected)*, was angesichts der in der Vergangenheit deutlich höheren Adoption für Basisbreitbanddienste durchaus plausibel erklärt werden kann. Hingegen ist der Effekt für die Nutzung von Mobilfunkbreitbanddiensten in allen Modellspezifikationen insignifikant. Das durchgängig positive Vorzeichen lässt sich plausibel durch den zum Betrieb von Mobilfunknetzen vergleichsweise höheren Stromverbrauch erklären.

Neben den unterschiedlichen statischen Robustheitsspezifikationen in den Regressionsmodellen (1)-(5) finden sich in Tabelle 6 im Anhang noch weitere Robustheitsanalysen in Form der dynamischen Spezifikation von Schätzgleichung (2). Die Aufnahme der verzögerten abhängigen

Variablen als weitere Erklärungsvariable in der Schätzgleichung kontrolliert zwar für weitere nicht beobachtete zeitvariante Heterogenität, geht jedoch auch mit einem Effizienzverlust bei einzelnen inkludierten Erklärungsvariablen einher; so bleibt zwar die Struktur der Vorzeichen der einzelnen Schätzkoeffizienten unverändert, es kommt jedoch zu einem Effizienzverlust bei den FTTx bezogenen Variablen ebenso wie für die Variable zur Basisbreitbandnutzung; während erstere im dynamischen Modell nicht mehr signifikant sind, bleibt der Schätzkoeffizient für die Basisbreitbandnutzung auch im dynamischen Modell signifikant, jedoch fällt der marginale Effekt in allen dynamischen Regressionsmodellen deutlich geringer aus als in den statischen Regressionsmodellen. Dennoch bleiben die grundlegenden Ergebnisse auch im dynamischen Modell gegenüber dem statischen Modell robust: Es findet sich in den meisten IKT-Variablen ein insignifikanter Einfluss auf die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen, bei der, die Basisbreitbandnutzung betreffenden, Variable zudem auch ein negativ signifikanter Effekt in beiden Modellspezifikationen.

### 5.1. Interpretation der Ergebnisse anhand österreichischer Marktdaten

Nachfolgend werden die relevanten marginalen Effekte der Nutzung von Breitbandinfrastrukturen auf Basis der Schätzergebnisse von Regressionsmodell (4) in Tabelle 5 anhand österreichischer Marktdaten interpretiert. Sowohl der Effekt der Nutzung von leitungsgebundenem Basisbreitband als auch derjenige von FTTx basierten Anschlüssen sind signifikant bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $< 5\%$ . Die Schätzkoeffizienten der Variablen *Basisbreitbandnutzung* bzw. von *FTTx (homes connected)* haben im gemäß Gleichung (1) log-linearen Schätzmodell die Interpretation einer Semi-Elastizität. Die exakte prozentuale Veränderung in der abhängigen Variablen für größere Änderungen in den unabhängigen Variablen ist für die entsprechenden Schätzkoeffizienten aus Regressionsmodell (4) (-0.198; -0.055) gegeben mit:

$$\begin{aligned} \% \Delta \text{CO}_2 &\equiv \left( \frac{\Delta \text{CO}_2}{\text{CO}_2} \right) \times 100 = \left[ e^{(-0.198 \times \Delta \text{Basisbreitbandnutzung})} - 1 \right] \times 100 \\ & \\ \% \Delta \text{CO}_2 &\equiv \left( \frac{\Delta \text{CO}_2}{\text{CO}_2} \right) \times 100 = \left[ e^{(-0.055 \times \Delta \text{FTTx (homes connected)})} - 1 \right] \times 100 \end{aligned} \quad (3)$$

Der Anstieg in der Basisbreitbandnutzung im Analysezeitraum lag für Österreich bei 0.4419 p.p. ( $\text{Basisbreitbandnutzung}_{2019}^{AT} - \text{Basisbreitbandnutzung}_{2002}^{AT} = 0.6293 - 0.1874$ ). Der im Analysezeitraum (2002-2019) beobachtete Anstieg in der pro Haushalt gemessenen Nutzung von FTTx Anschlüssen lag bei 0.2942 p.p. ( $\text{FTTx (homes connected)}_{2019}^{AT} - \text{FTTx (homes connected)}_{2002}^{AT} = 0.2942 - 0$ ). Die durchschnittlichen jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen sind für Österreich mit  $\overline{\text{CO}_2}^{AT} = 70.9873$  Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> gegeben.

Evaluert man den durchschnittlichen marginalen Effekt für Basisbreitband anhand der genannten österreichischen Marktdaten, so resultiert für den Zeitraum 2002-2019 eine Gesamtreduktion in Höhe von 5.9471 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> in Österreich aufgrund des Anstiegs der Basisbreitbandadoption pro Haushalt von 0.1874 auf 0.6293. Analog dazu resultiert für den

Zeitraum 2002-2019 eine Gesamtreduktion in Höhe von 1.1394 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> in Österreich aufgrund des Anstiegs der FTTx Adoption pro Haushalt von 0 auf 0.2942.

Zur Einordnung der errechneten Größenordnungen der resultierenden CO<sub>2</sub>-Gesamtreduktionen von rund 7.09 Millionen Tonnen seien diese abschließend in Relation zu den durchschnittlichen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Kopf gesetzt; diese lagen in Österreich im Jahr 2019 bei rund 7.7 Tonnen.<sup>6</sup> Demnach entspräche die für Österreich errechnete IKT-induzierte Gesamtreduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zeitraum 2002-2019 rund 920.331 „Personen-CO<sub>2</sub>“ Verbrauchswerten im gesamten Zeitraum bzw. einem durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Verbrauch von rund 51.129 Personen pro Jahr.

---

<sup>6</sup> Informationen online abrufbar unter: <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions> sowie <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL?end=2019&start=2002>.

## 6. Fazit und Handlungsempfehlungen

Theoretische Überlegungen zeigen, dass die Digitalisierung in einigen Bereichen durchaus als treibende Kraft und große Chance für den Weg zu einer nachhaltigeren Gesellschaft mit mehr Klimaschutz gesehen werden kann. Jedoch wird auch vermehrt vor einer zu großen Hoffnung, verbunden mit dem Verweis auf mögliche Risiken durch nicht vorhersehbare bzw. nicht berücksichtigte Reboundeffekte gewarnt. Ebenfalls wurde auf den stark steigenden Verbrauch von Ressourcen, die zur Herstellung und dauerhaften Betrieb der IKT-Technologie notwendig sind, verwiesen. Grundsätzlich führen die direkten Effekte der Digitalisierung immer zunächst zu einem Material- und Energiebedarf und damit zu einer höheren Umweltbelastung. Ihnen gegenüber stehen jedoch die indirekten Effekte der Effizienzgewinne und positiven Ersatzwirkungen, die in unterschiedlichem Maße Relevanz entfalten können, sowie der Enabler-effekt, der komplett neue und innovative Anwendungen, die vorher schlichtweg nicht denkbar waren, erst ermöglicht. Jedoch können hier auch teilweise negative Rebound- und Obsoleszenzeffekte von Bedeutung sein. Die Gesamtwirkung aller Mechanismen lässt sich allein aufgrund der theoretischen Überlegungen daher nicht feststellen.

Die empirischen Ergebnisse dieser Studie entsprechen im Wesentlichen auch den bisherigen empirischen Untersuchungen, wonach die CO<sub>2</sub> senkenden indirekten Effekte die CO<sub>2</sub> erhöhenden direkten, indirekten und systemische Effekte im Durchschnitt überwiegen. Für schnelle glasfaserbasierte (FTTx) Breitbandverbindungen konnten diese unterschiedlichen Wirkungskanäle durch Aufnahme von angebots- (homes passed) und nachfrageseitigen (homes connected) Messgrößen zudem explizit überprüft werden. Es zeigte sich, dass neben dem absenkenden Effekt für Basisbreitbanddienste auch ein absenkender Effekt für die Nutzung neuer glasfaserbasierter Breitbandzugangsdienste bzw. damit verbundener Dienstanwendungen resultierte. Der Anstieg in der Basisbreitbandnutzung in Österreich im Zeitraum 2002-2019 in Höhe von 0.4419 p.p sowie für die FTTx Adoption im selben Zeitraum in Höhe von 0.2942 p.p. führte zu einer Absenkung in Höhe von insgesamt 7.09 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Im Gegensatz zum indirekten Effekt weist der direkte Effekt in Verbindung mit schnellen Breitbandinfrastrukturen (homes passed) ein positives Vorzeichen aus, ist jedoch insignifikant. Diese Schätzergebnisse erweisen sich in verschiedenen statischen Regressionspezifikationen als robust. Für mobiles Breitband im speziellen weisen die Regressionsmodelle insignifikante Schätzkoeffizienten aus. Dies lässt aber darauf schließen, dass mobiles Breitband in der Vergangenheit im Gesamteffekt zu keinem systematisch erhöhten CO<sub>2</sub>-Ausstoß geführt hat.

Aus der empirischen Analyse lässt sich – in weitestgehender Übereinstimmung mit der vorliegenden relevanten empirischen Literatur – der Schluss ableiten, dass pauschale Politikmaßnahmen in Hinblick auf IKT-Anbieter oder Digitalisierungsdienste nicht der identifizierten Heterogenität der zugrunde liegenden Effekte gerecht werden würden und somit mit Ineffizienzen einhergingen. So gehen von bestehenden IKT-Diensten – wie insbesondere den Breitbandzugangsdiensten – insgesamt leicht absenkende CO<sub>2</sub>-Effekte aus, bei anderen Bereichen des IKT-Ökosystems entstehen hingegen auch künftig hohe Stromverbräuche und entsprechende negative Externalitäten in Bezug auf resultierende CO<sub>2</sub>-Emissionen. In sehr hohem Maße kam es in den vergangenen Jahren etwa zu einem massiven Anstieg des

Internetdatenverkehrs in Verbindung mit sogenannten Video-streaming Diensten. Der Anteil bekannter Video-streaming Dienste (insbesondere Video-on-Demand Dienste von Anbietern wie Netflix, Amazon Prime, Disney+, Youtube, live-streaming Videos sowie Videos auf großen sozialen Netzwerkplattformen) an der gesamten Internutzung ist in den letzten Jahren sehr stark gestiegen und in der Folge auch die Energie- und Stromverbräuche im Zusammenhang mit der Bereitstellung dieser Dienste. Die gesamten Video-streaming Dienste sowie Video downloads stellen gegenwärtig Industrieexpertisen zufolge schon weit mehr als die Hälfte des gesamten globalen Internetverkehrs dar und dieser Anteil wird in den nächsten Jahren noch deutlich zunehmen (Cisco, 2019). Mit besonders stromverbrauchsintensiven Streamingdiensten gingen also auch entsprechende hohe CO<sub>2</sub>- Emissionen in der Vergangenheit einher, was mittelfristig noch stärker ausgeprägt sein wird.

Allfällige regulatorische Eingriffe in das komplexe IKT-Ökosystem müssten zudem punktuell unter Berücksichtigung der vielseitigen sektoralen Wechselwirkungen abgestimmt sein. Neben Interventionen, die auf eine Reduktion von besonders ressourcenintensiven Anwendungsbereichen mit hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen abzielen, wäre umgekehrt auch eine Förderung von digitalen Diensten und IKT-Bereichen mit CO<sub>2</sub> senkenden Gesamteffekten denkbar. Nationale Fördermaßnahmen wären hier auch für jene CO<sub>2</sub> senkenden Bereiche und Diensteanwendungen denkbar, wo die Entwicklung generell oder speziell für Österreich noch am Anfang steht, aber mittelfristig besonders hohes Potenzial zu CO<sub>2</sub>-Reduktionen entfalten könnte.

## Literaturverzeichnis

- Afzal, M. N. I., & Gow, J. (2016). Electricity consumption and information and communication technology in the next eleven emerging economies. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 6(3), 381-388.
- Amri, F. (2018). Carbon dioxide emissions, total factor productivity, ICT, trade, financial development, and energy consumption: testing environmental Kuznets curve hypothesis for Tunisia. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(33), 33691-33701.
- Avgerinou, M., Bertoldi, P., & Castellazzi, L. (2017). Trends in data centre energy consumption under the european code of conduct for data centre energy efficiency. *Energies*, 10(10), 1470.
- Bernstein, R., & Madlener, R. (2010). Impact of disaggregated ICT capital on electricity intensity in European manufacturing. *Applied Economics Letters*, 17(17), 1691-1695.
- Brandi, C., Schwab, J., Berger, A., & Morin, J. F. (2020). Do environmental provisions in trade agreements make exports from developing countries greener? *World Development*, 129, 104899.
- Castellani, D., & Pieri, F. (2013). R&D offshoring and the productivity growth of European regions. *Research Policy*, 42(9), 1581-1594.
- Chimbo, B. (2020). Information and communication technology and electricity consumption in transitional economies. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(3), 296.
- CISCO. (2019). Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017--2022. Retrieved from: <https://davidellis.ca/wp-content/uploads/2019/12/cisco-vni-mobile-data-traffic-feb-2019.pdf>.
- Collard, F., Fève, P., & Portier, F. (2005). Electricity consumption and ICT in the French service sector. *Energy Economics*, 27(3), 541-550.
- Coroama, V. C., & Hilty, L. M. (2014). Assessing Internet energy intensity: A review of methods and results. *Environmental impact assessment review*, 45, 63-68.
- Dasgupta, S., Wheeler, D., Mody, A., & Roy, S. (1999). Environmental regulation and development: A cross-country empirical analysis. The World Bank.
- De Bruyn, S. M., van den Bergh, J. C., & Opschoor, J. B. (1998). Economic growth and emissions: reconsidering the empirical basis of environmental Kuznets curves. *Ecological Economics*, 25(2), 161-175.
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey. *Ecological economics*, 49(4), 431-455.
- Eurostat. (2019). available at: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=ICT\\_sector\\_-\\_value\\_added,\\_employment\\_and\\_R%26D](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=ICT_sector_-_value_added,_employment_and_R%26D)
- Farhadi, M., Ismail, R., & Fooladi, M. (2012). Information and communication technology use and economic growth. *PloS one*, 7(11), e48903.
- Farzin, Y. H., & Bond, C. A. (2006). Democracy and environmental quality. *Journal of Development Economics*, 81(1), 213-235.
- Friedl, B., & Getzner, M. (2003). Determinants of CO2 emissions in a small open economy. *Ecological economics*, 45(1), 133-148.
- Galeotti, M., & Lanza, A. (2005). Desperately seeking environmental Kuznets. *Environmental Modelling & Software*, 20(11), 1379-1388.
- Godil, D. I., Sharif, A., Agha, H., & Jermisittiparsert, K. (2020). The dynamic nonlinear influence of ICT, financial development, and institutional quality on CO2 emission in Pakistan: new insights from QARDL approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(19), 24190-24200.
- Goel, R. K., Herrala, R., & Mazhar, U. (2013). Institutional quality and environmental pollution: MENA countries versus the rest of the world. *Economic Systems*, 37(4), 508-521.
- Gotsch, M. (2020). Auswirkungen des digitalen Wandels auf Umwelt und Klimaschutz - Entwicklung eines analytischen Bewertungsschemas. In: JAHRBUCH ÖKOLOGIE - Die Ökologie der digitalen Gesellschaft. (Hrsg.: Göpel et al.), S. 99-109

- Henriques, S. T., & Kander, A. (2010). The modest environmental relief resulting from the transition to a service economy. *Ecological Economics*, 70(2), 271-282.
- Hilty, L. M., Arnfalk, P., Erdmann, L., Goodman, J., Lehmann, M., & Wäger, P. A. (2006). The relevance of information and communication technologies for environmental sustainability—a prospective simulation study. *Environmental Modelling & Software*, 21(11), 1618-1629.
- Holtz-Eakin, D., & Selden, T. M. (1995). Stoking the fires? CO<sub>2</sub> emissions and economic growth. *Journal of public economics*, 57(1), 85-101
- Horner, N. C., Shehabi, A., & Azevedo, I. L. (2016). Known unknowns: Indirect energy effects of information and communication technology. *Environmental Research Letters*, 11(10), 103001.
- Ishida, H. (2015). The effect of ICT development on economic growth and energy consumption in Japan. *Telematics and Informatics*, 32(1), 79-88.
- Kander, A. (2005). Baumol's disease and dematerialization of the economy. *Ecological economics*, 55(1), 119-130.
- Katz, R. L., & Koutroumpis, P. (2013). Measuring digitization: A growth and welfare multiplier. *Technovation*, 33(10-11), 314-319.
- Khan, N., Baloch, M. A., Saud, S., & Fatima, T. (2018). The effect of ICT on CO<sub>2</sub> emissions in emerging economies: does the level of income matters? *Environmental Science and Pollution Research*, 25(23), 22850-22860.
- Knight, K. W., Rosa, E. A., & Schor, J. B. (2013). Could working less reduce pressures on the environment? A cross-national panel analysis of OECD countries, 1970–2007. *Global Environmental Change*, 23(4), 691-700.
- Koomey, J., Berard, S., Sanchez, M., & Wong, H. (2010). Implications of historical trends in the electrical efficiency of computing. *IEEE Annals of the History of Computing*, 33(3), 46-54.
- Kopp, T., & Lange, S. (2019). The climate effect of digitalization in production and consumption in OECD countries. In *CEUR Workshop Proc* (Vol. 2382, pp. 1-11).
- Martínez-Zarzoso, I., & Maruotti, A. (2011). The impact of urbanization on CO<sub>2</sub> emissions: evidence from developing countries. *Ecological Economics*, 70(7), 1344-1353.
- Mas, M., de Guevara, J. F., Robledo, J. C., & López-Cobo, M. (2017). *The 2017 PREDICT Key Facts Report. An analysis of ICT R&D in the EU and beyond* (No. JRC106658). Joint Research Centre (Seville site).
- Mealy, P., & Teytelboym, A. (2020). Economic complexity and the green economy. *Research Policy*, 103948.
- Menz, T., & Welsch, H. (2012). Population aging and carbon emissions in OECD countries: Accounting for life-cycle and cohort effects. *Energy Economics*, 34(3), 842-849.
- Minniti, A., & Venturini, F. (2017). The long-run growth effects of R&D policy. *Research Policy*, 46(1), 316-326.
- Moomaw, W. R., & Unruh, G. C. (1997). Are environmental Kuznets curves misleading us? The case of CO<sub>2</sub> emissions. *Environment and development economics*, 451-463.
- Mulder, P., De Groot, H. L., & Pfeiffer, B. (2014). Dynamics and determinants of energy intensity in the service sector: A cross-country analysis, 1980–2005. *Ecological Economics*, 100, 1-15.
- Neumayer, E. (2004). The environment, left-wing political orientation and ecological economics. *Ecological economics*, 51(3-4), 167-175.
- Newell, R. G. (2009). Literature review of recent trends and future prospects for innovation in climate change mitigation.
- OECD (2017), OECD Digital Economy Outlook 2017, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264276284-en>.
- Panayotou, T. (1997). Demystifying the environmental Kuznets curve: turning a black box into a policy tool. *Environment and development economics*, 465-484.
- Rattle, R. (2010). *Computing Our Way to Paradise? The Role of Internet and Communication Technologies in Sustainable Consumption and Globalization*. Rowman & Littlefield.

- Sadorsky, P. (2012). Information communication technology and electricity consumption in emerging economies. *Energy Policy*, 48, 130-136.
- Salahuddin, M., & Alam, K. (2016). Information and Communication Technology, electricity consumption and economic growth in OECD countries: A panel data analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 76, 185-193.
- Schulte, P., Welsch, H., & Rexhäuser, S. (2016). ICT and the Demand for Energy: Evidence from OECD Countries. *Environmental and resource economics*, 63(1), 119-146.
- Scruggs, L. A. (1998). Political and economic inequality and the environment. *Ecological economics*, 26(3), 259-275.
- Shafik, N. (1994). Economic development and environmental quality: an econometric analysis. *Oxford economic papers*, 757-773.
- Shahbaz, M., & Sinha, A. (2019). Environmental Kuznets curve for CO2 emissions: a literature survey. *Journal of Economic Studies*.
- Sorrell, S. (2010). Energy, economic growth and environmental sustainability: Five propositions. *Sustainability*, 2(6), 1784-1809.
- Strauss, H., & Samkharadze, B. (2011). ICT capital and productivity growth. *EIB papers*, 16(2), 8-28.
- Torras, M., & Boyce, J. K. (1998). Income, inequality, and pollution: a reassessment of the environmental Kuznets curve. *Ecological economics*, 25(2), 147-160.
- Williams, E. (2011). Environmental effects of information and communications technologies. *Nature*, 479(7373), 354-358.
- Zhang, C., & Liu, C. (2015). The impact of CT industry on CO2 emissions: a regional analysis in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 12-19.
- Zhang, J., Wang, B., & Latif, Z. (2019). Towards cross-regional sustainable development: The nexus between information and communication technology, energy consumption, and CO2 emissions. *Sustainable Development*, 27(5), 990-1000.
- Zhu, H. M., You, W. H., & Zeng, Z. F. (2012). Urbanization and CO2 emissions: A semi-parametric panel data analysis. *Economics Letters*, 117(3), 848-850.
- Zugravu-Soilita, N. (2018). The impact of trade in environmental goods on pollution: what are we learning from the transition economies' experience? *Environmental Economics and Policy Studies*, 20(4), 785-827.

## Anhang

Tabelle 4: Variablendefinitionen und Quellenangaben

Variablen	Definition	Quelle
CO2	CO2 beinhaltet die Verbrennung fossiler Brennstoffe aus verschiedensten Aktivitäten, die Produktion von Zement und den Emissionen anderer Vorgänge sowie die CO2-Aufnahme während der Zement-Carbonatisierung (Friedlingstein et al., 2020)	Global Carbon Atlas
FTTx (abs.) (homes passed)	Summe der angeschlossenen Haushalte durch FTTx. FTTx steht als Übergriff für alle relevanten Typen von glasfaserbasierten Breitbandnetzen, die auf den Netzarchitekturen FTTC (Fiber-to-the-cabinet), FTTP (Fiber-to-the distribution point), FTTLA (Fiber-to-the last amplifier), FTTB (Fiber-to-the building) und FTTH (Fiber-to-the home) basieren. „Angeschlossene Haushalte“ ist die absolute Anzahl aus Wohn- und Arbeitsstätten (gewichtet je Haushalt = homes passed).	IDATE FTTx Database
FTTx (abs.) (homes connected)	Anzahl der nachfrageseitig subscribierten FTTx	IDATE FTTx Database
Basisbreitbandnutzung	Summe der Breitbandservice-Verträge die FTTx, xDSL und Coaxial-Kabel Technologien verwenden.	Euromonitor
Mobilfunkbreitbandnutzung	Pro Kopf Anteil der Nutzer mobiler Breitbanddienste (>3G)	Euromonitor
TK-Gesamtausgaben	Geldmenge (in mio. USD), die für Telekommunikationsdienste von Kunden im Land i im Jahr t ausgegeben wird.	Euromonitor
Laptop	Prozentueller Anteil aller Haushalte, die einen Laptop besitzen.	Euromonitor
Tablet	Prozentueller Anteil aller Haushalte, die ein Tablet besitzen.	Euromonitor
IKT-Importe	IKT-Güter-Importe in Prozent der gesamten Güter-Importe; dies beinhaltet Computer und peripheres -, Kommunikations-, elektrisches Kunden-Equipment, sowie elektronische Komponenten und andere Informations- und Technologiegüter.	WorldBank
IKT-Exporte	IKT-Güter-Exporte in Prozent der gesamten Güter-Exporte; dies beinhaltet Computer und peripheres -, Kommunikations-, elektrisches Kunden-Equipment, sowie elektronische Komponenten und andere Informations- und Technologie-Güter.	WorldBank
Server	Sichere Internet Server, die Verschlüsselungstechnologie verwenden, um Internet-Transaktionen durchzuführen, Anzahl pro 1 Million Personen.	WorldBank
BIP_pc	BIP in konstanten 2010-USD pro Kopf	WorldBank
Handel	Handel beschreibt die Summe der Ex- und Importe von Gütern und Dienstleistungen, gemessen als Anteil des BIP.	WorldBank
Arbeitsbevölkerung	Verhältnis der abhängigen Menschen (jünger als 15 oder älter als 65) zu 100 Menschen im erwerbsfähigen Alter.	WorldBank
Gini-Koeffizient	Der GINI-Index ist ein Maß für Einkommensungleichheit (von 0 – minimale Ungleichheit bis 100 – maximale Ungleichheit).	Euromonitor
Industrieanteil	Gesamtproduktion des Industriesektors. Der Sektor Industrie beinhaltet die Wertschöpfung aus Bergbau, verarbeitendem Gewerbe, Bauwesen, Strom-, Wasser- und Gas-Versorgung.	Market Line Advantage
Bev.dichte	Bevölkerungsdichte eines Landes in Personen pro km2.	Market Line Advantage
F&E	F&E-Ausgaben beinhalten Zahlungen für F&E geleistet im Inland, sowie Zahlungen aus dem Ausland für F&E geleistet im Inland.	Euromonitor
Korruption	Der Index beinhaltet sechs verschiedene Maße, die unterschiedliche Bereiche und Ebenen der Politik abdecken.	QoG Data
Linke Regierung	Anteil der Bevölkerung eines Landes i im Jahr t die eher linke Parteien wählen.	Eigene Erhebung
Stromverbrauch	Stromverbrauch bezieht sich auf den Nettoverbrauch. Dieser setzt sich aus Produktion plus Importe minus Exporte minus Übertragungs- und Verteilungsverluste.	Market Line Advantage

Tabelle 5: Ergebnisse für die statische Schätzgleichung (abhängige Variable:  $\ln(\text{CO}_2)$ )

Regr.modell	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Schätzer	FE	FE	FE	FE	FEIS
<b>IKT-Infrastruktur- und -Nutzungsvariablen</b>					
FTTx (homes connected)	-0.064***		-0.072***	-0.055**	-0.063***
	(-3.01)		(-3.25)	(-2.43)	(-3.13)
FTTx (homes passed)	0.072		0.099	0.061	0.081
	(1.07)		(1.20)	(0.82)	(1.22)
Basisbreitbandnutzung	-0.176		-0.175*	-0.198**	-0.172
	(-1.68)		(-1.70)	(-2.08)	(-1.64)
Mobilfunkbreitbandnutzung	0.005		0.005	-0.008	0.003
	(0.07)		(0.07)	(-0.13)	(0.04)
Lag FTTx (homes connect.)		-0.051***			
		(-2.80)			
Lag FTTx (homes passed)		0.035			
		(0.54)			
Lag Basisbreitbandnutzung		-0.195*			
		(-1.72)			
Lag Mobilfunkbreitband.		-0.004			
		(-0.06)			
<b>IKT (sonstige Variablen)</b>					
TK-Gesamtausgaben				0.000	
				(1.00)	
Laptop				-0.000	
				(-0.11)	
Tablet				-0.000	
				(-0.02)	
IKT-Importe				-0.005	
				(-0.75)	
IKT-Exporte				0.007	
				(1.52)	
Server				-0.000***	
				(-4.62)	

Die Anzahl an Beobachtungen reduziert sich in Regr. (2) gegenüber der maximalen Anzahl (612) um 34 aufgrund der um eine Periode verzögerten ("Lag") erklärenden FTTx Variablen sowie der Variablen zur leitungsgelassenen Breitbandnutzung und der Mobilfunknutzung. Die Regressionsmodelle (3) und (4) beinhalten 576 Beobachtungen, da jeweils 2 Länder und somit insgesamt 36 Beobachtungen ausgeschlossen sind. In Regr. (3) sind die OECD Länder Island und die USA mit den jeweils mit Abstand niedrigsten bzw. höchsten CO<sub>2</sub>-Werten (in absoluter als auch in logarithmierter Form) ausgeschlossen. In Regr. (4) fehlen für Luxemburg und Island für alle Jahre Werte zu den sonstigen IKT-Variablen TK-Gesamtausgaben, Tablet und Laptop. Die in Regr. (5) ausgewiesene Spezifikation basiert auf einem von einem Benutzer (Ludwig, 2019) geschriebenen Stata Befehl ("xtfeis"), welcher keinen Schätzkoeffizienten für die Konstante ( $\alpha_0$ ) und ebenso keinen Wert für den F-Test auf Gesamtsignifikanz des Regressionsmodells ausweist. Die Standardfehler in den Regressionsmodellen (1)-(5) sind jeweils panelrobust geschätzt, womit Heteroskedastizität und Autokorrelation unbestimmter Art innerhalb der Panels zugelassen sind. t Statistiken sind in Klammern ausgewiesen; \*  $p < 0.10$ , \*\*  $p < 0.05$ , \*\*\*  $p < 0.01$

Quelle: Eigene Berechnungen. • Erstellt mit [Datawrapper](#)

Tabelle 5 (Fortsetz.)

<b>Makroökonomische Variablen</b>					
BIP p.c.	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**
	(2.48)	(2.36)	(2.48)	(2.58)	(2.49)
Handel	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002*	-0.001
	(-1.37)	(-1.48)	(-1.49)	(-1.77)	(-1.26)
Arbeitsbevölkerung	-0.017***	-0.017***	-0.016***	-0.011**	-0.017***
	(-3.19)	(-3.17)	(-3.10)	(-2.30)	(-3.22)
Gini-Koeffizient	-0.011**	-0.008*	-0.012**	-0.014***	-0.011**
	(-2.27)	(-1.72)	(-2.53)	(-3.39)	(-2.31)
Industrieanteil	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
	(0.66)	(0.59)	(0.62)	(0.61)	(0.58)
Bev.dichte	-0.006	-0.007*	-0.005	-0.008*	-0.006
	(-1.45)	(-1.72)	(-1.14)	(-1.92)	(-1.39)
Bev.dichte quad.	0.000*	0.000*	0.000	0.000*	0.000
	(1.74)	(2.00)	(1.37)	(1.97)	(1.67)
F&E	0.010	-0.001	0.021	0.039	0.009
	(0.29)	(-0.03)	(0.61)	(1.32)	(0.28)
<b>Politökon. Variablen</b>					
Korruption	0.542*	0.534*	0.563*	0.760**	0.515
	(1.74)	(1.71)	(1.83)	(2.57)	(1.66)
Linke Regierung	-0.000	-0.000	-0.001	-0.000	-0.000
	(-0.35)	(-0.27)	(-0.74)	(-0.20)	(-0.34)
Feste Ländereffekte ( $\alpha_i$ )	JA	JA	JA	JA	JA
Feste Periodeneffekte ( $\alpha_t$ )	JA	JA	JA	JA	JA
Individ. Periodeneffekte ( $\alpha_{2it}$ )	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	JA
Konstante ( $\alpha_0$ )	6.004***	6.165***	5.928***	6.158***	
	(9.01)	(9.27)	(8.41)	(9.66)	
R2 (within)	0.610	0.603	0.624	0.664	0.643
F-Test (Gesamtsignifikanz)	64.619	47.608	559.278	n.a.	n.a.
# Länder	34	34	32	32	34
# Beobachtungen	612	578	576	576	612

Die Anzahl an Beobachtungen reduziert sich in Regr. (2) gegenüber der maximalen Anzahl (612) um 34 aufgrund der um eine Periode verzögerten ("Lag") erklärenden FTTx Variablen sowie der Variablen zur leitungsgebundenen Breitbandnutzung und der Mobilfunknutzung. Die Regressionsmodelle (3) und (4) beinhalten 576 Beobachtungen, da jeweils 2 Länder und somit insgesamt 36 Beobachtungen ausgeschlossen sind. In Regr. (3) sind die OECD Länder Island und die USA mit den jeweils mit Abstand niedrigsten bzw. höchsten CO2-Werten (in absoluter als auch in logarithmierter Form) ausgeschlossen. In Regr. (4) fehlen für Luxemburg und Island für alle Jahre Werte zu den sonstigen IKT-Variablen TK-Gesamtausgaben, Tablet und Laptop. Die in Regr. (5) ausgewiesene Spezifikation basiert auf einem von einem Benutzer (Ludwig, 2019) geschriebenen Stata Befehl ("xtfeis"), welcher keinen Schätzkoeffizienten für die Konstante ( $\alpha_0$ ) und ebenso keinen Wert für den F-Test auf Gesamtsignifikanz des Regressionsmodells ausweist. Die Standardfehler in den Regressionsmodellen (1)-(5) sind jeweils panelrobust geschätzt, womit Heteroskedastizität und Autokorrelation unbestimmter Art innerhalb der Panels zugelassen sind. t Statistiken sind in Klammern ausgewiesen; \*  $p < 0.10$ , \*\*  $p < 0.05$ , \*\*\*  $p < 0.01$

Quelle: Eigene Berechnungen. • Erstellt mit [Datawrapper](#)

Tabelle 6: Ergebnisse für die dynamische Schätzgleichung (abhängige Variable:  $\ln(\text{CO}_2)$ )

Regr.modell	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Schätzer	POLS	FEC	FE	FE	FE	FE	FE	FEIS
<b>Verzögerte abhängige Variable</b>								
Lag $\ln(\text{CO}_2)$	0.787*** (22.69)	0.858*** (25.47)	0.787*** (18.85)	0.785*** (17.67)	0.767*** (16.16)	0.751*** (15.98)	0.773*** (17.07)	0.726*** (25.07)
<b>IKT-Infrastruktur- und -Nutzungsvariablen</b>								
FTTx (homes connected)	-0.004 (-0.48)	0.001 (0.10)	-0.004 (-0.44)	-0.009 (-1.12)	-0.007 (-1.06)	-0.008 (-1.14)	-0.007 (-1.05)	0.000 (0.01)
FTTx (homes passed)	0.008 (0.37)	0.009 (0.38)	0.008 (0.36)	0.031 (1.24)	0.021 (0.73)	0.018 (0.62)	0.016 (0.53)	0.016 (0.54)
Basisbreitbandnutzung	-0.062** (-2.10)	-0.057 (-1.59)	-0.062* (-1.98)	-0.065** (-2.12)	-0.080** (-2.58)	-0.069** (-2.23)	-0.079** (-2.53)	-0.080*** (-2.80)
Mobilfunkbreitbandnutzung	-0.000 (-0.02)	0.001 (0.03)	-0.000 (-0.02)	-0.000 (-0.01)	-0.007 (-0.31)	-0.010 (-0.48)	-0.008 (-0.35)	-0.003 (-0.15)
IKT (sonstige Variablen)								
TK-Gesamtausgaben					0.000 (1.33)	0.000 (1.41)	0.000 (1.28)	0.000 (0.98)
Laptop					0.000 (0.56)	0.000 (0.47)	0.000 (0.43)	-0.000 (-0.13)
Tablet					-0.000 (-0.09)	0.000 (0.12)	-0.000 (-0.22)	0.000 (0.67)
IKT-Importe					-0.001 (-0.47)	-0.002 (-0.81)	-0.001 (-0.34)	0.002 (0.97)
IKT-Exporte					0.001 (0.56)	0.001 (0.59)	0.001 (0.50)	-0.001 (-0.33)
Server					-0.000*** (-3.00)	-0.000** (-2.50)	-0.000*** (-2.85)	-0.000*** (-4.14)
<b>Makroökonomische &amp; politökonomische Variablen</b>								
BIP p.c.	0.000* (1.68)	0.000 (1.16)	0.000 (1.64)	0.000 (1.28)	0.000 (1.64)	0.000** (2.72)	0.000 (0.23)	0.000** (2.23)
BIP p.c. quad.						-0.000** (-2.14)		
BIP p.c. * Dienstleist.							0.000 (0.41)	

Anmerkungen: Die Anzahl an Beobachtungen reduziert sich gegenüber der maximalen Anzahl (612) um 34 aufgrund der Aufnahme der verzögerten abhängigen Variablen. Die Regressionsmodelle (5)-(8) beinhalten 544 Beobachtungen aufgrund der Aufnahme weiterer IKT-Erklärungsgrößen, für die nicht alle Beobachtungspunkte verfügbar sind. Die in Regr. (2) und (8) ausgewiesene Spezifikation basiert auf von Benutzern geschriebenen Stata Befehlen („xtlsdvc“ (Bruno, 2005a,b) bzw. „xtfeis“, Ludwig, 2019), welche keinen Schätzkoeffizienten für die Konstante ausweisen. Die Standardfehler in den Regressionsmodellen (1)-(8) sind jeweils panelrobust geschätzt, womit Heteroskedastizität und Autokorrelation unbestimmter Art innerhalb der Panels zugelassen sind. † Statistiken sind in Klammern ausgewiesen; \*  $p < 0.10$ , \*\*  $p < 0.05$ , \*\*\*  $p < 0.01$

Quelle: Eigene Berechnungen. • Erstellt mit [Datawrapper](#)

Tabelle 6: (Fortsetz.)

Handel	-0.000 (-1.02)	-0.0001 (-0.81)	-0.0002 (-0.86)	-0.0003 (-0.66)	0.000 (0.13)	0.0001 (0.02)	0.0002 (0.27)	0.0003 (0.69)
Arbeitsbevölkerung	-0.004*** (-3.97)	-0.003* (-1.65)	-0.004** (-2.69)	-0.004** (-2.61)	-0.004** (-2.27)	-0.004** (-2.57)	-0.004** (-2.22)	-0.005*** (-3.36)
Gini-Koeffizient	0.000 (0.07)	0.001 (0.44)	0.000 (0.07)	-0.001 (-0.66)	-0.001 (-0.86)	0.000 (0.05)	-0.001 (-0.83)	-0.002 (-1.12)
Industrieanteil	0.004*** (2.59)	0.003 (1.61)	0.004** (2.30)	0.004** (2.50)	0.003* (1.93)	0.003* (1.92)		0.004** (2.53)
Dienstleistungsanteil							-0.003 (-1.33)	
Bev.dichte	-0.003*** (-2.97)	-0.002** (-1.98)	-0.003** (-2.69)	-0.002** (-2.50)	-0.003** (-2.55)	-0.002* (-1.72)	-0.003** (-2.43)	-0.003** (-2.46)
Bev.dichte2	0.000*** (3.03)	0.000* (1.96)	0.000** (2.72)	0.000** (2.47)	0.000*** (2.80)	0.000* (1.88)	0.000** (2.71)	0.000*** (2.60)
F&E	-0.009 (-0.91)	-0.008 (-0.71)	-0.009 (-1.05)	-0.008 (-0.89)	-0.010 (-1.03)	-0.012 (-1.28)	-0.009 (-0.98)	-0.015 (-1.37)
Korruption	0.107** (1.97)	0.085 (1.12)	0.107* (1.76)	0.108* (1.74)	0.137** (2.11)	0.094 (1.44)	0.139** (2.17)	0.142* (1.89)
Linke Regierung	-0.000 (-1.54)	-0.000 (-1.12)	-0.000 (-1.45)	-0.000 (-1.40)	-0.000 (-1.30)	-0.000 (-1.38)	-0.000 (-1.23)	-0.000 (-1.27)
Feste Ländereffekte ( $\alpha_i$ )	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Feste Periodeneffekte ( $\alpha_t$ )	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Individ. Periodeneffekte ( $\alpha_{it}$ )	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	JA
Konstante	1.360*** (5.23)		1.337*** (5.22)	1.390*** (5.33)	1.508*** (5.68)	1.394*** (5.17)	1.773*** (5.33)	
R2 (overall)	0.999	0.9997						
R2 (within)			0.863	0.866	0.870	0.872	0.870	0.856
F-Test (Gesamtsignifikanz)	25.177		1.100	15.888	.	.	.	
# Länder	34	34	34	32	32	32	32	32
# Beobachtungen	578	578	578	544	544	544	544	544

Anmerkungen: Die Anzahl an Beobachtungen reduziert sich gegenüber der maximalen Anzahl (612) um 34 aufgrund der Aufnahme der verzögerten abhängigen Variablen. Die Regressionsmodelle (5)-(8) beinhalten 544 Beobachtungen aufgrund der Aufnahme weiterer IKT-Erklärungsgrößen, für die nicht alle Beobachtungspunkte verfügbar sind. Die in Regr. (2) und (8) ausgewiesene Spezifikation basiert auf von Benutzern geschriebenen Stata Befehlen („xtlsdvc“ (Bruno, 2005a,b) bzw. „xtfeis“, Ludwig, 2019), welche keinen Schätzkoeffizienten für die Konstante ausweisen. Die Standardfehler in den Regressionsmodellen (1)-(8) sind jeweils panelrobust geschätzt, womit Heteroskedastizität und Autokorrelation unbestimmter Art innerhalb der Panels zugelassen sind. t Statistiken sind in Klammern ausgewiesen; \*  $p < 0.10$ , \*\*  $p < 0.05$ , \*\*\*  $p < 0.01$

Quelle: Eigene Berechnungen. • Erstellt mit [Datawrapper](#)



