

# Direkte und indirekte Umwelteffekte der Informations- und Kommunikationstechnologie

Jan C. T. Bieser  
Institut für Informatik  
Universität Zürich  
Zürich, Schweiz  
jan.bieser@ifi.uzh.ch

<https://orcid.org/0000-0002-6791-6895>

Vlad C. Coroamă  
Departement Informatik  
ETH Zürich  
Zürich, Schweiz  
vcoroama@ethz.ch

<https://orcid.org/0000-0002-9292-3886>

## Zusammenfassung

Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) verursacht direkt, jedoch auch indirekt Umwelteffekte. Die direkten Effekte entstehen durch den Energie- und Ressourcenverbrauch entlang des Lebenszyklus von IKT-Hardware (Produktion, Betrieb und Entsorgung) und werden meist mit Lebenszyklusanalysen bestimmt. Indirekte Effekte sind Umweltauswirkungen, welche sich aus der Anwendung von IKT ergeben, beispielsweise durch veränderte Produktions- oder Konsummuster. Da IKT immer mehr Bereiche des Alltags durchdringt und durch verschiedenste Mechanismen sowohl positive wie auch negative Umweltauswirkungen herbeiführt, ist die Bestimmung indirekter Umweltauswirkungen konzeptuell herausfordernd. In diesem Artikel besprechen wir indirekte Umweltauswirkungen von IKT auf drei Ebenen: Auswirkungen einzelner Anwendungsfälle, Sektor-übergreifende Effekte und systemische Effekte. Wir zeigen, wie einzelne Telekommunikationsfirmen und Industrieverbände positive indirekte Auswirkungen von IKT postulieren und unterziehen diese Studien einer kritischen Betrachtung. Wir extrahieren daraufhin die inhärenten methodischen Schwierigkeiten derartiger Studien und zeigen anhand zweier Beispiele, wie IKT gleichzeitig sowohl positive als auch negative Umweltauswirkungen hervorrufen kann. Den Herausforderungen in deren Beurteilung bewusst, jedoch auch die prinzipiellen Wirkungsmechanismen indirekter Umweltauswirkungen von IKT verstehend, plädieren wir letztlich dafür, durch wirtschaftspolitische Maßnahmen Potenziale für den Umweltschutz durch IKT zu erschließen, auch wenn die genauen Effekte noch nicht in Zahlen erfasst werden können.

## Stichwörter

Digitalisierung, IKT, Nachhaltigkeit, Rebound-Effekt, indirekte Effekte, methodische Herausforderungen.

**This Accepted Author Manuscript is copyrighted by Springer.**

Cite this paper as: Bieser J.C.T., Coroamă V.C. Direkte und Indirekte Umwelteffekte der Informations- und Kommunikationstechnologie. NachhaltigkeitsManagementForum (2020).  
<https://doi.org/10.1007/s00550-020-00502-4>

# Direct and indirect environmental effects of information and communication technology

Jan C. T. Bieser

Department of Informatics  
University of Zurich  
Zurich, Switzerland  
jan.bieser@ifi.uzh.ch

<https://orcid.org/0000-0002-6791-6895>

Vlad C. Coroamă

Department of Computer Science  
ETH Zurich  
Zurich, Switzerland  
vcoroama@ethz.ch

<https://orcid.org/0000-0002-9292-3886>

## Abstract

Information and communication technology (ICT) causes direct and indirect environmental effects. The direct effects arise from the energy and resource consumption along the life cycle of ICT hardware (production, operation, and disposal) and are usually determined with life cycle assessments. Indirect effects are environmental impacts that result from the use of ICT, for example through changes in production or consumption patterns. As ICT penetrate more and more areas of everyday life and cause diverse positive and negative types of environmental impacts, the assessment of indirect environmental impacts is conceptually challenging. In this article, we discuss indirect environmental impacts of ICT on three levels: impact of individual ICT use cases, cross-sectoral effects, and systemic effects of ICT use. We show and critically discuss how telecommunication companies and industry associations postulate positive indirect effects of ICT. Based on these insights, we extract the inherent methodological difficulties of such studies and use two examples to show how ICT can have both positive and negative environmental impacts at the same time. Aware of the challenges in their assessment, but also understanding the mechanisms leading to their indirect environmental effects, we advocate to exploit the potential for environmental protection through ICT through policy measures, even if the exact magnitude of the effects cannot be yet assessed.

## Keywords

Digitalization, ICT, sustainability, rebound effect, indirect effects, methodological challenges.

**This Accepted Author Manuscript is copyrighted by Springer.**

Cite this paper as: Bieser J.C.T., Coroamă V.C. Direkte und Indirekte Umwelteffekte der Informations- und Kommunikationstechnologie. NachhaltigkeitsManagementForum (2020). <https://doi.org/10.1007/s00550-020-00502-4>

## 1. Einleitung

Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) ist ein Überbegriff für Technologien zur Erfassung (z.B. mittels Sensoren), Speicherung, Übertragung und Verarbeitung von Informationen. Hieraus ergeben sich neue Möglichkeiten, welche viele Bereiche unseres sozialen Lebens und unserer Umwelt beeinflussen. Diese sogenannte *digitale Transformation* wirkt sich in zweierlei Weisen auf die Umwelt aus. Einerseits wird immer mehr IKT-Hardware (physische IKT-Geräte) produziert, während der Nutzung mit Elektrizität betrieben und schließlich entsorgt. Hierzu zählen IKT-Endgeräte (z.B. Laptops, Smartphones) sowie IKT-Infrastrukturen (z.B. Rechenzentren, Kommunikationsnetze). Über den gesamten Lebenszyklus benötigt dies Ressourcen und verursacht Emissionen (direkte Effekte). Andererseits stellt IKT auch unsere bestehenden Produktions- und Konsummuster in Frage und verändert diese, mit vielfältigen Konsequenzen für die Umwelt (indirekte Effekte) (Hilty & Bieser, 2017). Mit IKT können wir beispielsweise von zu Hause arbeiten und virtuelle Meetings abhalten und so reisebedingte Treibhausgas(THG)-Emissionen vermeiden.

Eine Vielzahl an Studien hat beide Effekte bereits untersucht – mit unterschiedlichen Ergebnissen. Zum Beispiel errechnet die Global e-Sustainability Initiative (GeSI), ein Interessensverband des IKT-Sektors, gemeinsam mit Accenture, dass global gesehen IKT-Anwendungen im Jahr 2030 bis zu 20% der jährlichen THG-Emissionen vermeiden könnten (indirekter Effekt), während die IKT-Sektor selbst nur ungefähr 2% der globalen THG-Emissionen (direkter Effekt) verursacht (GeSI & Accenture Strategy, 2015). Im Gegensatz dazu errechnet eine Studie zum Klimaschutzpotenzial der Digitalisierung in der Schweiz, dass in einem mittleren Szenario die THG-Reduzierenden Effekte von IKT-Anwendungen im Jahr 2025 leicht kleiner sind als der direkte THG-Fußabdruck des IKT-Sektors (Hilty & Bieser, 2017). Eine ältere Studie im Auftrag des „Institute for Prospective Technological Studies“ (IPTS) der Europäischen Kommission kommt zu dem Ergebnis, dass sich im Jahr 2020 IKT-Anwendungen sowohl reduzierend als auch steigernd auf THG-Emissionen auswirken und beide Effekte sich gegenseitig aufheben (Hilty et al., 2006).

Aufgrund solcher gegensätzlichen Aussagen ist es für Entscheidungsträger schwierig, direkte und indirekte Umweltauswirkungen der IKT bei Investitionsentscheidungen zu berücksichtigen. Um dieser Unsicherheit entgegenzuwirken, gibt dieser Artikel einen Überblick über die wichtigsten Effekte und Faktoren, welche die Umweltfreundlichkeit von IKT-Lösungen beeinflussen. Dies ist essentiell notwendig, denn die Digitalisierung „wirkt in allen wirtschaftlichen, sozialen und gesellschaftlichen Systemen tiefgreifend und entfaltet eine immer größere transformative Wucht, die den Menschen, die Gesellschaften und den Planeten zunehmend fundamental beeinflusst und daher gestaltet werden muss“ (WBGU, 2019, S. 1).

Wir werden zunächst direkte und indirekte Umwelteffekte der IKT genauer erläutern und aufzeigen, wie diese Denkweise bereits Eingang in die IKT-Industrie gefunden hat und welche Herausforderungen bei der Bewertung der Effekte bestehen. Schließlich erläutern wir Chancen und Risiken einer umweltfreundlichen Digitalisierung anhand zweier Beispiele. Die Ausführungen in diesem Artikel beruhen auf einer Studie zu „Chancen und Risiken der Digitalisierung für den Klimaschutz in der Schweiz“ (Bieser & Hilty, 2018a; Hilty & Bieser, 2017), welche um weitere Erkenntnisse ergänzt wurden (Coroamă & Höjer, 2016; Bergmark et al., 2020; Coroamă et al., 2020;).

Die Unterscheidung verschiedener Typen von Effekten und die Offenheit für die Koexistenz von erwünschten und unerwünschten Effekten ist angelehnt an Ansätze aus der

Technikfolgenabschätzung (Banta, 2009; Hilty, 2015). Die notwendige Bewertung der Auswirkungen sollte dabei auf einer transparenten normativen Grundlage geschehen (Mader et al., 2019), die in unserem Fall aus den UN Sustainable Development Goals (SDGs) abgeleitet werden kann, insbesondere SDG12 „Responsible Production and Consumption“ und SDG13 „Climate Action“.

## **2. Direkte und indirekte Effekte der Informations- und Kommunikationstechnologie auf die Umwelt**

Im Folgenden werden direkte und indirekte Umwelteffekte der IKT diskutiert. Hilty und Aebischer (2015), Horner et al. (2016) und Williams (2011) geben weiterführende (und nicht in allen Details übereinstimmende) Überblicke dieser Effekte. Ein kürzlich erschienen wissenschaftliches Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2019) sowie eine kürzlich erschienene Kurzstudie zu Chancen und Risiken der Digitalisierung für den Klimaschutz (Bieser et al., 2020) geben weitere Einblicke zu Einflüssen der Digitalisierung auf die Gesellschaft und Umwelt, auf globaler Ebene und in Deutschland.

### **2.1 Direkte Effekte**

Über den gesamten Lebenszyklus (Produktion, Betrieb, Entsorgung) verursacht IKT-Hardware Umweltauswirkungen: Durch den Abbau von Rohstoffen für die Produktion, die Bereitstellung der Energie in allen Phasen und die Prozesse nach der Entsorgung (Hilty & Bieser, 2017). Diese werden meist mit sog. Lebenszyklusanalysen (oder Ökobilanzen, engl. „Life Cycle Assessments“) untersucht (Bieser & Hilty, 2018b).

Für die Herstellung von IKT-Hardware sind mehr als 50 chemische Elemente erforderlich, darunter seltene Erden und Konfliktmineralien, deren Abbau toxische Auswirkungen auf Mensch und Ökosystem haben können (Wäger et al., 2015).

In der Nutzungsphase benötigt IKT-Hardware Elektrizität. Die Auswirkungen hängen daher vom verwendeten Strommix ab, welcher in vielen Ländern auf fossilen Brennstoffen basiert. Insbesondere für Rechenzentren, die rund um die Uhr in Betrieb sind, verursacht der Stromverbrauch die größten Energieverbräuche und THG-Emissionen des gesamten Lebenszyklus (Hilty & Bieser, 2017). Trends wie Big Data, künstliche Intelligenz und Kryptowährungen erhöhen das Datenvolumen und den Bedarf an Rechenleistung weiter, während Cloud Computing und On-demand-Videostreaming essentiell zu einer Zunahme des Datenverkehrs beitragen.

Am Ende des Lebenszyklus kann IKT-Hardware einem formellen oder einem informellen Entsorgungsprozess zugeführt werden. Selbst unter optimalen Bedingungen beim formellen Recycling kann nur eine Teilmenge der in IKT-Hardware enthaltenen Elemente wiedergewonnen werden (Wäger et al., 2015). Ein wesentlicher Anteil der IKT-Endgeräte landet jedoch weltweit im Restmüll oder verbleibt in den Schubladen der Verbraucher, wodurch die Ressourcen nicht wiedergewonnen werden können (Thiébaud et al., 2017). Schließlich durchläuft IKT-Hardware häufig auch informelle Recyclingprozesse, in denen nur wenige Elemente unter kritischen Bedingungen wiedergewonnen werden. Beispielsweise wird in Ghana Elektroschrott zur Gewinnung von Metallen ohne Verwendung geeigneter Schutzeinrichtungen für Mensch und Umwelt verbrannt (Schneider, 2019). Teilweise ist der Export von IKT-Hardware in diese Länder verboten und findet illegal statt (Daum et al., 2017).

Studien zum THG-Fußabdruck des IKT-Sektors kommen zu dem Ergebnis, dass dieser bei ungefähr 2% der globalen THG-Emissionen liegt (GeSI & Accenture Strategy, 2015; Malmodin & Lundén, 2018). Ein Großteil davon wird durch Endgeräte (z.B. Laptops oder Smartphones), speziell deren Produktion verursacht (Hilty & Bieser, 2017). Daher sollten sich Bemühungen in diesem Bereich auf die Verlängerung der Lebensdauer der Geräte konzentrieren, zum Beispiel durch modulares Design und die damit verbundene Verbesserung der Reparaturfähigkeit oder Vermeidung geplanter Obsoleszenz (welche beispielsweise durch Softwareupdates, welche Systeme verlangsamen, hervorgerufen wird) (Hilty & Bieser, 2017).

IKT-Infrastrukturen, wie zum Beispiel Rechenzentren sowie Telekommunikationsnetze, verursachen weniger THG-Emissionen in der Produktion und mehr im Betrieb. Hier fallen THG-Emissionen vor allem aufgrund des hohen Stromverbrauchs im Betrieb an, da sie rund um die Uhr betrieben werden. Daher spielt hier vor allem die Energieeffizienz der Geräte eine Rolle. Zusätzlich sind der Einsatz von Elektrizität aus erneuerbaren Energien sowie die geteilte Nutzung von Infrastrukturen, zum Beispiel durch Cloud Computing, wichtige Hebel zur Reduktion des Fußabdrucks (Hilty & Bieser, 2017; Hintemann & Hinterholzer, 2019).

Zur Vermeidung von Umweltbelastungen sollten die Energieeffizienz in der Produktion erhöht werden sowie erneuerbare Energien zur Energiebereitstellung entlang des ganzen Lebenszyklus eingesetzt werden. Zudem können durch die Senkung des Bedarfs an seltenen Metalle in der Produktion und die Erhöhung der Sammlungs- und Wiedergewinnungsrate am Ende des Lebenszyklus weitere Umweltbelastungen, über THG-Emissionen hinaus (z.B. Abbau der Ozonschicht oder Schadstoffbelastung der Umwelt), reduziert werden (Ercan et al., 2016).

## 2.2 Indirekte Effekte

Indirekte Effekte sind IKT-bedingte Veränderungen bestehender Konsum- und Produktionsmuster und können daher in allen Sektoren auftreten. Börjesson Rivera et al. (2014) geben einen Überblick über indirekte IKT-Umwelteffekte. Studien zur Bewertung der indirekten Umweltauswirkungen von IKT konzentrieren sich entweder auf *einzelne Anwendungsfälle von IKT* (z.B. mobiles Arbeiten, intelligente Heizungssteuerung) oder schätzen die *Sektor-übergreifenden indirekten Umwelteffekte von IKT* ab und gehen dabei teilweise auch auf *systemische Umwelteffekte der IKT Nutzung* ein (Bieser et al., 2020; Bieser & Hilty, 2018b).

### *Beispiele für Studien einzelner Anwendungsfälle*

Moberg et al. (2011) vergleichen anhand einer Lebenszyklusanalyse E-Book-Reader mit herkömmlich gedruckten Büchern und zeigen, dass bei der Produktion eines E-Book-Readers etwa 30-40 Mal mehr THG-Emissionen anfallen als bei der Herstellung eines herkömmlichen Buches. Das bedeutet, dass sich die Anschaffung eines E-Book-Readers aus Sicht des Klimas erst lohnt, wenn hierdurch die Herstellung von 30-40 Büchern vermieden werden kann. Bei geteilt genutzten Büchern, wie zum Beispiel in Bibliotheken, fällt diese Anzahl entsprechend höher aus.

Weber et al. (2010) vergleichen das Streamen von Musik über das Internet mit der Herstellung und dem Vertrieb einer CD. Dabei stellen sie fest, dass das Streaming etwa 40-80% weniger THG-Emissionen verursacht als der Vertrieb über CDs.

Warland und Hilty (2016) vergleichen die THG-Emissionen einer Dienstreise von Zürich nach Paris mit dem Flugzeug, Zug und Auto mit den THG-Emissionen einer Videokonferenz. Demnach verursacht eine Flugreise 366 kg CO<sub>2e</sub>, eine Fahrt mit dem Auto 382 kg CO<sub>2e</sub>, eine Bahnfahrt 35 kg CO<sub>2e</sub> (jeweils hin- und zurück, pro Person) und eine Videokonferenz für 4 Stunden lediglich 1,2 kg CO<sub>2e</sub>. Zusätzlich kann bei der Videokonferenz Reisezeit gespart und für andere Zwecke verwendet werden (Bieser & Hilty, 2020).

Coroama et al. (2012) schlagen ein innovatives Modell der Konferenzorganisation vor, bei dem die Konferenz gleichzeitig an zwei Tagungsorten auf zwei unterschiedlichen Kontinenten stattfindet, welche über mehrere hochqualitative Live-Video- und Audio-Streams verbunden sind. Dadurch kann eine Vielzahl der Teilnehmer zu einer Tagungsstätte auf dem gleichen Kontinent anreisen und muss nicht interkontinental fliegen. Die Autoren vergleichen anhand dieses Fallbeispiels die reisebedingten THG-Emissionen der zwei Veranstaltungsmodi. Diese sind im innovativen Fall mit verteilten Tagungsstätten trotz deutlich höherer Teilnehmerzahlen bedeutend geringer als im traditionellen Fall. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass Langstreckenflüge überproportional mehr THG-Emissionen verursachen als Kurzstreckenflüge.

#### *Beispiele für Sektor-übergreifende Studien*

Das in solchen Studien untersuchte System wird in der Regel durch die Auswahl mehrerer IKT-Anwendungsfälle sowie durch geografische Grenzen bestimmt.

Die wohl prominenteste quantitative Studienreihe zu indirekten Umweltauswirkungen der IKT (SMART 2020, SMARTer 2020 und SMARTer 2030) wurde von GeSI durchgeführt (GeSI et al., 2008; GeSI & Accenture Strategy, 2015; GeSI & BCG, 2012). Die Studie SMARTer 2030 berücksichtigt ausdrücklich die Auswirkungen der IKT auf Mobilität, Produktion, Landwirtschaft, Gebäude und Energie und schätzt, dass IKT-Anwendungen im Jahr 2030 9,7-mal mehr THG-Emissionen vermeiden können (indirekter Effekt) als der IKT-Sektor selbst verursacht (direkter Effekt); 9,7 wird dabei als „Enablement-Faktor“ bezeichnet (GeSI & Accenture Strategy, 2015). Auch einzelne Telekommunikationsunternehmen führen vergleichbare Studien durch, welche wir in Abschnitt 3 beschreiben.

Die in der Einleitung erwähnte IPTS-Studie (Hilty et al., 2006) berechnet die direkten und indirekten Umweltauswirkungen der IKT in der Europäischen Union. Die Studie verwendet ein Simulationsmodell, um die Auswirkungen der IKT-Produktion, -Nutzung und -Entsorgung auf die Sektoren Energie, Verkehr, Waren, Dienstleistungen und Abfall zu bestimmen. Die Simulation von 2000 bis 2020 zeigt, dass sich IKT, je nach Anwendungsfall, steigernd wie auch reduzierend auf Energieverbrauch und THG-Emissionen auswirken kann. Nur durch gezielte Förderung von THG-senkenden Anwendungsfällen (wie intelligentes Heizen) und Vermeidung unerwünschter Effekte wäre eine allgemeine Reduzierung der THG-Emissionen möglich (Hilty et al., 2004, 2006).

Der World Wide Fund for Nature (WWF) führte mehrere Studien durch, um das Potenzial für eine Reduzierung der THG-Emissionen durch IKT-Anwendungen zu identifizieren. Eine Studie schätzt, dass in der EU durch mobiles Arbeiten, Audio- und Videokonferenzen, digitale Telefonrechnungen, virtuelle Anrufbeantworter sowie digitale Steuererklärungen 48,37 Mio. t CO<sub>2</sub> vermieden werden, während IKT selbst lediglich 4,73 Mio. t CO<sub>2</sub> verursachen würde (Pamlin & Szomolányi, 2006).

Über die Studien hinweg scheint jedoch Konsens zu bestehen, dass die größten Einsparpotenziale der IKT im Transport-, Gebäude- und Energiesektor liegen. Die von den optimistischen Studien errechneten Einsparpotenziale unterliegen jedoch unrealistischen, teils naiven Annahmen und ignorieren die möglichen negativen Konsequenzen oft gänzlich, wie beispielsweise Malmudin et al. (2014) oder Hilty et al. (2014) analysieren. Ähnliche methodische Schwächen sind auch in zahlreiche Studien einzelner Telekommunikationsunternehmen enthalten (wie in Abschnitt 3 analysiert).

### 2.3 Systemische Effekte

Systemische Effekte sind ebenfalls den indirekten Effekten zuzuordnen. Wir greifen sie aufgrund ihrer Relevanz, wie viele andere Autoren (Hilty, 2008; Horner et al., 2016; Williams, 2011) auch, an dieser Stelle gesondert heraus. Sie beschreiben grundlegende Veränderungen von Produktions- und Konsummustern (z.B. grundlegende Veränderung von Lebensstilen), welche durch die Interaktion von IKT-Anwendungen mit anderen sozio-ökonomischen Variablen entstehen und nur auf einer höheren Systemebene erkennbar werden.

Ihr bekanntester Vertreter ist der Rebound-Effekt, durch welchen Energieeinsparungen aufgrund von Effizienzsteigerungen durch Rückkopplungs-Effekte (teilweise, ganz oder sogar im Übermaß) kompensiert werden, zum Beispiel durch erhöhten Konsum (Sorrell & Dimitropoulos, 2008). Durch intelligente Motorsteuerung kann beispielsweise der Kraftstoffverbrauch von Autos gesenkt werden, was sich auch kostensenkend für Verbraucher auswirkt. Hierdurch steigt jedoch sowohl die Attraktivität des Autos an sich, als auch im Vergleich zu anderen, umweltfreundlicheren Verkehrsmitteln; beide Gründe führen zu einer vermehrten Nutzung von Autos (Gossart, 2015). Selbstfahrende Autos werden voraussichtlich dieses Phänomen auf die Spitze treiben, wie von Coroama und Mattern (2019b) beschrieben: die im Auto verbrauchte Zeit kann produktiv, sozial oder zur Entspannung genutzt werden, was heute nicht möglich ist. Für selbstfahrende Autos müssen keine Parkplätze gesucht werden, sie können nach Hause geschickt und bei Bedarf wieder gerufen werden. Zusätzlich erhalten Bevölkerungsgruppen, die keine konventionellen Autos steuern können, Zugang zu selbstfahrenden Autos (z.B. Senioren, Menschen mit schweren Behinderungen, Kinder). Daher kommen Studien zu selbstfahrenden Autos meist zu dem Ergebnis, dass sich hierdurch die mit Autos zurückgelegten Distanzen erhöhen (Taiebat et al., 2019).

Ein weiteres Beispiel ist Heimarbeit: Aufgrund virtueller Formen der Zusammenarbeit können Bürotätigkeiten auch häufig von zu Hause oder einem lokalen „Coworking Space“ erledigt werden, was pendelbedingte Energieverbräuche und Emissionen senkt. Damit gehen allerdings auch Kosten- und Zeiteinsparungen für Pendler einher, welche wiederum für andere Zwecke genutzt werden (Einkommens- und Zeit-Rebound-Effekt). Studien zum Einfluss von Heimarbeit auf den individuellen Transport zeigen, dass zumindest ein Teil der gesparten Reisezeit für privaten Transport ausgegeben wird, teilweise steigt die gesamte Reisezeit (geschäftlich plus privat) sogar (de Abreu e Silva et al., 2017; Glogger et al., 2008; Tanguay & Lachapelle, 2019).

Gleiches gilt für die oben genannte Studie zu Musikstreaming und Videokonferenzen. Das Streaming von Musik über das Internet hat den Energieverbrauch pro Minute abgespielter Musik gegenüber dem Vertrieb über CDs erheblich gesenkt. Die Kosten für den Konsum von Musik sind dadurch ebenfalls gesunken. Eine Studie der Universität Glasgow und der Universität Oslo zeigt, dass ein Album auf Schallplatte im Jahr 1977 etwa 29 US-\$ (Spitze des Schallplattenverkaufs) kostete, 1988 auf Kassette etwa 17 US-\$ (Spitze des Kassettensverkaufs),

2000 auf CD etwa 22 US-\$ (Spitze des CD-Verkaufs) und als digitales Album etwa 11 US-\$ im Jahr 2013. Diese Vergünstigung wirkt sich tendenziell konsumsteigernd aus. Zusätzlich können wir durch mobile Endgeräte und Kommunikationsnetze Musik zu jeder Zeit an fast jedem Ort hören, was wiederum den Konsum erhöht. Heute geben Verbraucher in den USA etwa 1% ihres Wocheneinkommens für Musik aus (und haben dadurch über Streaming-Plattformen unbegrenzten Zugang zu riesigen Musiksammlungen), während es 1977, zur Zeit der Schallplatten, noch 4,83% waren. Der Plastikverbrauch ist zwar dementsprechend von 58 Mio. kg im Jahr 1977 auf 8 Mio. kg im Jahr 2016 gesunken. Die mit dem Musikvertrieb verbundenen THG-Emissionen sind jedoch von 140 Mio. kg CO<sub>2e</sub> 1977 auf 200-350 Mio. kg CO<sub>2e</sub> 2016 aufgrund der Speicherung und der Übertragung von Musik gestiegen (Brennan, 2019).

Auch bezüglich unseres Reiseverhaltens birgt IKT das Potenzial, Reisen und damit verbundene Umweltbelastungen zu vermeiden (Bieser & Hilty, 2018a; Coroamă et al., 2012). Allerdings trägt IKT auch erheblich zu Effizienzsteigerung im Reisesektor bei und wirkt sich hier kostensenkend und somit auch konsumsteigernd aus. Zusätzlich ermöglicht IKT zeitliche und geographische Barrieren zu überbrücken: Wir können über Messenger-Apps und Internet-Telefonie ständig in Kontakt mit Freunden auf der ganzen Welt sein; über soziale Medien folgen wir bekannten und sogar unbekannt Personen auf ihren Reisen und lernen ganz neue Reiseziele kennen. Auf einmal kann in uns der Wunsch entstehen, diese Reiseziele und unsere Freunde, egal wo sie sein mögen, zu besuchen (Mokhtarian, 1990).

Betrachtet man die zunehmende Diffusion von IKT in allen gesellschaftlichen Bereichen gelöst von einzelnen Anwendungsfällen, so zeigt sich, dass durch die Möglichkeiten der Digitalisierung neue Lebensstile entstehen können, welche mit einer Steigerung der Umweltbelastung einhergehen können. Beispielsweise arbeiten sog. „digitale Nomaden“ ortsunabhängig und wechseln häufig ihren Arbeitsplatz, auch über Ländergrenzen hinweg (Müller, 2016), was die Reisetätigkeit und die damit verbundenen Verkehrsbelastungen erhöhen kann. Andererseits kann IKT auch zur Förderung umweltfreundlicherer Lebensstile führen, wenn z.B. ein Wandel vom Besitz hin zum Teilen von Gütern über digitale Plattformen stattfindet (Pouri & Hilty, 2018).

Aufgrund solcher Effekte ist es essentiell, bei der Entwicklung von IKT-Lösungen und der Betrachtung ihrer Umwelteffekte ganzheitlich vorzugehen und systemische Effekte zu berücksichtigen und wenn möglich, deren negative Auswirkungen zu reduzieren. THG-Emissionen und Energieverbräuche sind dabei nur eines der Bewertungskriterien. Häufig müssen diese und weitere Kriterien (z.B. weitere Umweltauswirkungen wie Ressourcenverbrauch, Einfluss auf die Lebensqualität), voneinander abgewogen werden. Derartige Zielkonflikte (Coroamă & Mattern, 2019a), wenn sie auftreten, müssen so gut es geht entschärft werden. Börjesson Rivera et al. (2014), Santarius et al. (2012) und Coroama und Mattern (2019b) geben einen Überblick über (IKT-)Rebound-Effekte.

### **3. Anwendung im IKT-Sektor**

Über den IKT-Sektor hinaus, berechnen und publizieren Unternehmen ihre direkten Umweltauswirkungen, meist in Form von THG-Emissionen. Dafür hat sich das sogenannte „Greenhouse Gas Protocol“, ein Berichtsstandard für THG-Emissionen, etabliert (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004). Dieser unterscheidet THG-Emissionen aus dem eigenen Brenn- und Treibstoffverbrauch (z.B. Heizöl – Scope 1), aus dem Bezug von Energie (z.B. Elektrizität – Scope 2) oder aus der vor- bzw.

nachgelagerten Wertschöpfungskette (z.B. durch den Einkauf von Produkten und Dienstleistungen wie Verbrauchsgüter oder Flugreisen – Scope 3).

Die indirekten Emissionen der Wertschöpfungskette widerspiegelnd, berechnen IKT-Unternehmen vermehrt auch den indirekten positiven Effekt ihrer Produkte und Dienstleistungen auf THG-Emissionen; wie also ihre Produkte und Dienstleistungen dazu beitragen, dass in der nachgelagerten Wertschöpfungskette (sprich, bei den Kunden), THG-Emissionen vermieden werden können. Oft werden, inspiriert durch die SMARTer Studien von GeSI, die direkten Emissionen mit dem indirekten Potenzial zur Vermeidung von THG-Emissionen ins Verhältnis gesetzt und daraus der sogenannte ‚Enablement-Faktor‘ berechnet. Enablement-Faktor ließe sich grob als „Befähigungsfaktor“ übersetzen und wird als Verhältnis zwischen den von den Kunden durch Nutzung der Dienstleistungen eines IKT-Unternehmens vermiedenen THG-Emissionen und den eigenen Emissionen dieses Unternehmens berechnet. Falls dieser Faktor größer als 1 ist, so das Argument, hilft das Unternehmen dabei, mehr THG-Emissionen zu sparen als es selbst emittiert und hat daher einen positiven Beitrag zum Klimaschutz geleistet (da es ja neben den positiven Umweltauswirkungen auch ökonomisch und sozial positive Beiträge leistet).

Tabelle 1 zeigt die von mehreren Telekommunikationsunternehmen angegebenen Enablement-Faktoren. Dabei zu berücksichtigen ist, dass bei der Bewertung der direkten Effekte teilweise unterschiedliche Systemgrenzen gezogen werden (z.B. berücksichtigt Verizon keine Scope 3-Emissionen), was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse einschränkt. Dennoch wird deutlich, dass allesamt größer als 1 sind und dass sie sich zudem erheblich unterscheiden, obwohl die Unternehmen ähnliche Produkte und Dienstleistungen anbieten.

Unternehmen (Land)	Letzter THG Enablement-Faktor (Jahr; Einheit)	Ziel THG Enablement-Faktor (Jahr; Einheit)
AT&T (US)	2.2x (2018; CO <sub>2</sub> e)	10x (2025; CO <sub>2</sub> e)
British Telecom (GB)	2.6x (2018/2019; CO <sub>2</sub> e)	3x (n/a; CO <sub>2</sub> e)
Deutsche Telekom (DE)	1.85x (2018; CO <sub>2</sub> )	Keine Zielsetzung
NTT (JP)	10.1x (2016; CO <sub>2</sub> )	10x (2031; CO <sub>2</sub> )
Swisscom (CH)	1.3x (2018; CO <sub>2</sub> e)	2x (2020; CO <sub>2</sub> e)
Verizon (US)	1.68x (2015; CO <sub>2</sub> e; ohne Scope 3)	Keine Zielsetzung
Vodafone (GB)	2.9x (2016/2017; CO <sub>2</sub> e)	Keine Zielsetzung

Tabelle 1: Enablement-Faktoren von Telekommunikationsunternehmen entsprechend deren externer Berichterstattung (AT&T, 2019; British Telecom, 2019; Deutsche Telekom, 2019; NTT Group, 2019; Swisscom, 2019; Verizon, 2019; Vodafone, 2019). „2x“ bedeutet, dass ein Unternehmen durch die eigenen Produkte und Dienstleistungen doppelt so viele THG-Emissionen vermeidet (indirekter Effekt), wie sie selbst verursacht (direkter Effekt).

Die Berechnung der direkten THG-Emissionen ist durch das „Greenhouse Gas Protocol“ weitestgehend standardisiert und somit über Unternehmen hinweg vergleichbar. Für die Berechnung des Vermeidungspotenzials gibt es jedoch keine etablierten Standards. Daher unterscheiden sich diese hinsichtlich der getroffenen Annahmen sowie der berücksichtigten Produkte und Dienstleistungen erheblich und können nicht miteinander verglichen werden. Sofern es in der externen Berichterstattung erkenntlich ist, finden systemische Effekte weitestgehend keine Anwendung. Zudem ist für das Ergebnis entscheidend, mit welchem Referenzszenario die Realität verglichen wird. Da keine zwei Realitäten gleichzeitig existieren können, ist dieses Referenzszenario jedoch zwingend hypothetisch (Coroamă & Hilty, 2009); dessen Bestimmung liegt weitestgehend im Ermessungsspielraum der Studienautoren. Wie Hilty et al. (2014) bemerken, können die vermiedenen Emissionen – und mit ihnen natürlich auch der Enablement-Faktor – beliebig erhöht werden, wenn das (hypothetische)

Referenzszenario pessimistisch genug gewählt wird. Da noch keine einheitliche und wissenschaftlich fundierte Methodik etabliert ist, stehen Unternehmen, die derartige Studien hervorbringen, in einem klaren Interessenskonflikt; dementsprechend vorsichtig sind deren Ergebnisse zu interpretieren.

Jenseits der Interessenkonflikte der Unternehmen jedoch ist die Berechnung der indirekten Effekte methodisch inhärent herausfordernd. Auf diese Schwierigkeiten wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

#### **4. Herausforderungen bei der Bewertung indirekter Effekte**

Im Folgenden legen wir Herausforderungen, welche bei der Bewertung indirekter Umweltauswirkungen auftreten, auf Basis einer Studie aus dem Jahr 2018 dar (Bieser & Hilty, 2018a), die sich teilweise auch in Coroama und Höjer (2016) wiederfinden.

##### *Auswahl von IKT-Anwendungen*

Bei der Sektor-übergreifenden Bewertung von IKT-Umwelteffekten müssen meist bestimmte Anwendungsfälle (z.B. mobiles Arbeiten, intelligente Verkehrs- oder Gebäudesteuerung) ausgewählt werden, deren Einflüsse getrennt berechnet und aggregiert werden. Die Auswahl der Anwendungsfälle hat dabei einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis. So können gezielt diejenigen Anwendungsfälle ausgewählt werden, welche Umweltbelastungen verringern.

##### *Allokation der Effekte*

Selten findet IKT alleinstehend Anwendung, sondern kann ihr Potenzial erst in Kombination mit anderen Technologien realisieren. Zum Beispiel ist zur Realisierung eines intelligenten Stromnetzes („Smart Grid“) IKT in Kombination mit neuen Energiegewinnungs-, Speicher- sowie Verteilungstechnologien notwendig. Welcher Effekt dabei der IKT zugerechnet werden kann, und nach welchen Kriterien, ist strittig – manche Studien rechnen jedoch den ganzen Effekt IKT zu.

##### *Bestimmung der Baseline (des Referenzszenarios)*

Um den Einfluss der IKT auf die Umwelt zu bewerten, muss ein Szenario nach Anwendung der IKT-Lösung mit einem Referenzszenario ohne der IKT-Lösung verglichen werden (Coroamă et al., 2020). Ende von Abschnitt 3 wurde dargestellt, dass das Referenzszenario stets hypothetisch ist und seine Bestimmung daher eine Herausforderung darstellt. Dies ist für jede Technologie der Fall, ist jedoch besonders herausfordernd für IKT, da IKT jeden erdenklichen Bereich des Alltags mittlerweile durchdringt und ihr Einfluss sich daher nur schwierig herausrechnen lässt.

##### *Bestimmung der tatsächlichen Umweltauswirkungen*

Die tatsächlichen Umweltauswirkungen der IKT, ob positiv oder negativ, zu bestimmen ist komplex und häufig aufgrund der Datenlage nur für einen bestimmten Zeitraum und Ort möglich. Inwiefern theoretische Potenziale in der Realität, an unterschiedlichen Orten, zu unterschiedlichen Zeiten, realisiert werden können, ist fraglich. Beispielsweise könnte in einer Stadt mit einem guten Angebot an öffentlichen Verkehrsmitteln ein Carsharing-System Fahrten mit öffentlichen Verkehrsmitteln ersetzen, während es in ländlichen Gebieten eher private Autofahrten ersetzen könnte.

### *Bestimmung der Marktdurchdringung*

Häufig versuchen Studien die Marktdurchdringen einer Anwendung zu bestimmen und für die Zukunft vorherzusagen. Dabei ist der Einfluss der IKT und speziell deren zukünftige Ausbreitung von weiteren technologischen Entwicklungen sowie von anderen Kontextfaktoren (z.B. Einkommensniveau oder Bereitschaft der Bevölkerung für das Teilen von Autos) abhängig (Börjesson Rivera et al., 2014; Erdmann & Hilty, 2010).

### *Berücksichtigung von Rebound-Effekten*

Aus ökonomischer Sicht beruhen Rebound-Effekte auf Nachfrageelastizitäten, die insbesondere auf lange Sicht schwer vorhersehbar sind. Sie sind außerdem dynamisch und daher in statischen Berechnungsmodellen kaum zu berücksichtigen.

### *Interaktion zwischen Anwendungsfällen*

Häufig bewerten Studien Umwelteinflüsse bestimmter IKT-Anwendungen getrennt voneinander und aggregieren diese im Anschluss. Ausgewählte Anwendungsfälle können unsere Produktions- und Konsummuster grundlegend verändern und unmittelbare oder entfernte Auswirkungen auf andere Anwendungsfälle haben. Beispielsweise kann „E-Work“ die Pendelgewohnheiten grundlegend verändern, was nicht nur das Mobilitätsverhalten, sondern auch unser Einkaufsverhalten langfristig beeinflusst. Zur Analyse solcher Interaktionen sind dynamische Modellierungs- und Simulationstechniken erforderlich.

### *Extrapolation*

Studien, welche regional übergreifende Potenziale abschätzen, basieren ihre Ergebnisse auf spezifische, regional begrenzte Untersuchungen. Die Ergebnisse dieser Studien auf Grundlage von quantitativen Indikatoren auf eine größere Region zu extrapolieren ist schwierig, da die Wirkung und Ausbreitung von IKT-Anwendungen regional unterschiedlich sein kann.

## **5. Beispiele für Chancen und Risiken ausgewählter IKT-Anwendungsfälle für den Umweltschutz**

Im Folgenden erläutern wir anhand von zwei Beispielen Chancen und Risiken der Digitalisierung für den Umweltschutz: Selbstfahrende Autos und Coworking. Weitere vielversprechende Anwendungsfälle sind unter anderem geteilte Logistik, intelligente Verkehrssteuerung sowie intelligente Energienetze, welche die Energienachfrage an die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien anpassen (Hilty & Bieser, 2017).

### *Selbstfahrende Autos*

Selbstfahrende Autos ist einer der meist-diskutierten IKT-Anwendungsfälle der letzten Jahre. Ihm wird erhebliches Potenzial zum Effizienzgewinn im Transportsektor zugesprochen. Dabei hängt das Potenzial dieser Technologie zum Umweltschutz beizutragen davon ab, wie diese eingesetzt wird.

Selbstfahrende Autos machen die Aktivität Autofahren für viele Menschen komfortabler und steigern dadurch die Attraktivität dieses Transportmittels. Zum Beispiel ermöglichen selbstfahrende Autos den Fahrern, während des Transports andere Aktivitäten (wie zum Beispiel Arbeiten oder Schlafen) zu erledigen. Dies ist ein Argument für die Verwendung öffentlicher Verkehrsmittel, welches nun wegfällt und im Vergleich zum Auto weiterhin die Problematik der letzten Meile hat (Umstiege vom Bahnhof bis nach Hause). Mit

selbstfahrenden Autos fällt auch die Parkplatzsuche weg, das Auto kann nach Hause geschickt werden oder leer um den Block kreisen. Zudem können sich derzeit nicht fahrtüchtige Gruppen (etwa Kinder) mittels autonomen Autos chauffieren lassen (Coroamă & Mattern, 2019b). Diese Faktoren können allesamt dazu führen, dass sich der modale Split weiter weg vom öffentlichen Verkehr, hin zu individuellem Transport mit dem Auto verlagert, ein Verkehrsmittel mit hohem Energie-, Material- und Platzbedarf (Hilty, 2019; Hörl et al., 2019). Wenn ich nebenher schlafen kann, warum sollte ich mich dann nicht über Nacht von meiner Haustüre in Stuttgart direkt zu meinem Geschäftspartner in Berlin transportieren lassen? Ich verliere ja keine Zeit und muss mich nicht unnötig dem Lärm, potentiellen Mangel an Hygiene und den Viren in öffentlichen Transportmitteln aussetzen!

Wenn diese Technologie jedoch ausschließlich für selbstfahrende Busse oder Ruftaxis (z.B. als Teil des öffentlichen Verkehrs) eingesetzt würde, und somit die Verfügbarkeit, den Komfort und die Geschwindigkeit geteilter Mobilität verbessert, könnten die Anzahl an Fahrzeugen und die zurückgelegten Distanzen sowie die hiermit verbundenen Umweltauswirkungen reduziert werden (EBP Schweiz AG, 2018). Daher kommt eine kürzlich erschienene Studie zu dem Schluss, „dass die Zulassung privater automatisierter Fahrzeuge zu einer starken Mehrbelastung des Verkehrssystems führen könnte und regulatorisch mit Bedacht begleitet werden muss“ (Hörl et al., 2019, S. 9).

### *Coworking*

Ein Großteil der in Deutschland lebenden und arbeitenden Menschen pendelt an Arbeitstagen zwischen dem Wohn- und dem Arbeitsort, meist mit dem Auto (Statistisches Bundesamt, 2020). Dies kostet nicht nur Zeit und Geld für Pendelnde und Unternehmen, sondern verursacht auch durch den Bau, Betrieb und die Wartung von Transportinfrastrukturen und Fahrzeugen gleichermaßen erhebliche Umweltbelastungen. Gleichzeitig nimmt der Leerstand an Bürofläche zu und die Auslastung vermieteter Bürofläche ist gering. Eine Analyse von zwölf Schweizer Büroflächen ergab, dass im Durchschnitt der wöchentlichen Arbeitstage rund 40% der Arbeitsplätze nicht genutzt werden (Windlinger et al., 2016).

Ein vielversprechender Ansatz, um sowohl Pendelwege zu verkürzen und die Auslastung von Bürofläche zu erhöhen ist Coworking. Coworking beschreibt jede Situation, in der zwei oder mehr Personen am selben Ort zusammenarbeiten, jedoch nicht für dasselbe Unternehmen (DTZ, 2014). Die Anzahl an Coworking-Spaces, Anbieter von Büro- und Besprechungsräume für verschiedenen Organisationen oder Einzelpersonen, hat in den letzten Jahre erheblich zugenommen (Foertsch, 2019). Die IKT erhöht kontinuierlich den Teil der Arbeit, der ortsunabhängig erledigt werden kann und ermöglicht die Verlagerung von Tätigkeiten in Coworking-Spaces. Coworking-Spaces können die Auslastung von Bürofläche erhöhen, Pendelwege verkürzen und Vorteile gegenüber Home-Office-Arbeiten bieten (z.B. Vermeidung des Gefühls der Isolation). Umweltvorteile können allerdings nur realisiert werden, wenn Unternehmen gleichzeitig ihre eigenen Büroflächen reduzieren und Mitarbeitende gesparte Zeit und gespartes Geld nicht für andere energieintensive Aktivitäten (z.B. Flugreisen) ausgeben, was zu beträchtlichen Rebound-Effekten führen würde (Vaddadi et al., 2020). Eine Analyse der Energieintensität der Haushaltsausgaben (die Energie, die pro Geldeinheit für die Herstellung und Bereitstellung der von Haushalten bezogenen Gütern und Dienstleistungen benötigt wird) für Einfamilienhaushalte in der Schweiz aus den Jahren 2002 bis 2005 zeigt, dass Haushaltsausgaben für einen durchschnittlichen Warenkorb mit 4 MJ/CHF Energieverbrauch verbunden sind, für Strom mit 10 MJ/CHF und für Flugreisen mit

60 MJ/CHF (Girod et al., 2014; Girod & de Haan, 2010). Um Coworking erfolgreich zu implementieren, müssen einige Herausforderungen überwunden werden, wie die Gewährleistung von Datensicherheit außerhalb des Unternehmens, effiziente, ortsunabhängige Teamarbeit durch IKT-Tools sowie die Einhaltung arbeitsrechtlicher Bestimmungen (Spinuzzi, 2012; Weichbrodt et al., 2015).

## 6. Schlussfolgerung

In diesem Artikel haben wir den Unterschied zwischen direkten und indirekten Umwelteffekten der IKT dargelegt und deren Relevanz aufgezeigt. Direkte Effekte betreffen den Ressourcenverbrauch und die Emissionen aus Produktion, Betrieb und Entsorgung von IKT-Hardware. Wichtigste Maßnahmen für Privatpersonen und Organisationen zur Reduzierung der Effekte sind die längere Nutzung von Endgeräten, die Nutzung erneuerbarer Energien in allen Phasen entlang des Lebenszyklus, der Ersatz seltener Metalle und von Konfliktmineralien in der Herstellung sowie die Verbesserung des Recyclingsystems hinsichtlich der Sammlungsrate von Geräten und Wiedergewinnungsrate von Materialien.

Bei indirekten Effekten, also den IKT-bedingten Veränderungen von Produktions- und Konsummustern und Konsequenzen für die Umwelt, hat sich gezeigt, dass die größten Potenziale für den Umweltschutz im Transport-, Gebäude- und Energiesektor liegen. Diese müssen jedoch systematisch erschlossen und gleichzeitig negative Effekte, wie Rebound-Effekte, vermieden werden. Die „technischen Innovationsschübe übersetzen sich nicht automatisch in Nachhaltigkeitstransformationen, sondern müssen eng mit Nachhaltigkeitsleitbildern und -politiken gekoppelt werden“ (WBGU, 2019, S. 9). Für die Schaffung von Rahmenbedingungen, welche die Realisierung der Umweltschutzpotenziale der Digitalisierung ermöglichen, ist es notwendig, dass Entscheidungsträger eine ganzheitliche Betrachtung der Umweltauswirkungen von IKT-Anwendungen vornehmen, welche direkte und indirekte, speziell systemische Effekte, mitberücksichtigt. Andernfalls besteht die Gefahr, dass unerwünschte Auswirkungen der Digitalisierung zu einer Verschärfung von Umweltproblemen beitragen.

Die Methoden zur quantitativen Erfassung indirekter Effekte stecken noch in den Kinderschuhen. Im Verbund mit Partnern aus der Industrie (sowohl IKT-Unternehmen wie auch deren Kunden, die die Produkte und Dienstleistungen der IKT-Industrie anwenden und die Auswirkungen auf die eigenen Prozesse kennen), ist hier insbesondere die Wissenschaft gefordert, eine Methodik zu entwickeln. Dies wird jedoch voraussichtlich ein längerer Prozess sein. Bis es soweit ist und die Auswirkungen zumindest ansatzweise gemessen werden können, muss dennoch nicht untätig gewartet werden. Die prinzipiellen Mechanismen, die zu Einsparungen führen, aber auch die entgegenwirkenden Kräfte, werden immer besser verstanden. Politik, Wirtschaft, Zivilgesellschaft und Wissenschaft könnten daher schon jetzt dieses qualitative Verständnis nutzen, um Anstöße in die richtige Richtung zu geben, auch wenn es noch etwas Zeit dauern wird, bis deren Effekte in Zahlen erfasst werden können.

## Danksagung

Jan Bieser wurde durch das Forschungsprojekt im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms „Nachhaltige Wirtschaft: ressourcenschonend, zukunftsfähig, innovativ“ (NFP 73) des Schweizerischen Nationalfonds (SNF) Verfügung Nr. 407340\_185630 unterstützt. Beide Autoren danken Prof. Friedemann Mattern, ETH Zürich, für die Anmerkungen zu einer früheren Version dieses Artikels.

## Interessenskonflikt

Die Autoren erklären, dass kein Interessenskonflikt besteht.

## Quellen

- AT&T. (2019). *Progress to 2025 – 10x Goal Update*. <https://about.att.com/csr/home/environment/reducing-emissions.html>
- Banta, D. (2009). What is technology assessment? *International Journal of Technology Assessment in Health Care*, 25(S1), 7–9. <https://doi.org/10.1017/S0266462309090333>
- Bergmark, P., Coroamă, V., Höjer, M., & Donovan, C. (2020). A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services. Part II: Multiple Services and Companies. *Proceedings of the 7th Conference on ICT for Sustainability. ICT4S*. Bristol, UK. June 2020.
- Bieser, J., & Hilty, L. (2018a). Indirect Effects of the Digital Transformation on Environmental Sustainability: Methodological Challenges in Assessing the Greenhouse Gas Abatement Potential of ICT. *Proceedings of the 5th Conference on ICT for Sustainability. ICT4S*. Toronto, Canada. May 2018. <https://doi.org/10.29007/lx7q>
- Bieser, J., & Hilty, L. (2018b). Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 10(8), 2662. <https://doi.org/10.3390/su10082662>
- Bieser, J., & Hilty, L. (2020). Conceptualizing the Impact of Information and Communication Technology on Individual Time and Energy Use. *Telematics and Informatics*, 101375. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2020.101375>
- Bieser, J., Hintemann, R., Beucker, S., Schramm, S., & Hilty, L. (2020). *Klimaschutz durch digitale Technologien: Chancen und Risiken*. Bitkom, Boderstep Institute for Innovation and Sustainability, University of Zurich. <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Wie-digitale-Technologien-den-CO2-Ausstoss-begrenzen-koennen>
- Börjesson Rivera, M., Håkansson, C., Svenfelt, Å., & Finnveden, G. (2014). Including second order effects in environmental assessments of ICT. *Environmental Modelling & Software*, 56, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.02.005>
- Brennan, M. (2019). *Music consumption has unintended economic and environmental costs* [University of Glasgow]. University News. [https://www.gla.ac.uk/news/headline\\_643297\\_en.html](https://www.gla.ac.uk/news/headline_643297_en.html)
- British Telecom. (2019). *Our Digital impact & sustainability targets – Update on our progress in 2018/19*. <https://www.btplc.com/Digitalimpactandsustainability/Ourreport/index.htm>
- Coroamă, V., Bergmark, P., Höjer, M., & Malmodin, J. (2020). A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services. Part I: Single services. *Proceedings of the 7th Conference on ICT for Sustainability. ICT4S*. Bristol UK. June 2020.
- Coroamă, V., & Hilty, L. (2009). Energy consumed vs. Energy saved by ICT – a closer look. *Environmental Informatics and Industrial Environmental Protection: Concepts, Methods and Tools. Proceedings of the 23rd Conference on Environmental Informatics – Informatics for Environmental Protection, Sustainable Development and Risk Management*, 347–355.
- Coroamă, V., Hilty, L., & Birtel, M. (2012). Effects of Internet-based multiple-site conferences on greenhouse gas emissions. *Telematics and Informatics*, 29(4), 362–374. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2011.11.006>
- Coroamă, V., & Höjer, M. (2016). *Assessing GHG Benefits Induced by ICT Services in Practice: A Case Study and Resulting Challenges. Proceedings of the 4th Conference on ICT for Sustainability. ICT4S*. Amsterdam, Netherlands. August 2016. <https://doi.org/10.2991/ict4s-16.2016.4>
- Coroamă, V., & Mattern, F. (2019a). Zielkonflikte zwischen Umwelt- und Datenschutz: Von der Möglichkeit, Daten preiszugeben, um die Umwelt zu retten. In *Was Bits und Bäume verbindet: Digitalisierung nachhaltig gestalten* (S. 58–60). oekom. <http://www.vs.inf.ethz.ch/publ/papers/CoroamaMattern2019-Zielkonflikte.pdf>
- Coroamă, V., & Mattern, F. (2019b). Digital Rebound – Why Digitalization Will not Redeem us our Environmental Sins. *Proceedings of the 6th Conference on ICT for Sustainability. ICT4S*. Lappeenranta, Finland. June 2019.
- Daum, K., Stoler, J., & Grant, R. (2017). Toward a More Sustainable Trajectory for E-Waste Policy: A Review of a Decade of E-Waste Research in Accra, Ghana. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/ijerph14020135>
- de Abreu e Silva, J., de Oña, J., & Gasparovic, S. (2017). The relation between travel behaviour, ICT usage and social networks. The design of a web based survey. *Transportation Research Procedia*, 24, 515–522. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.482>
- Deutsche Telekom. (2019). *CR-Bericht 2018*. <https://www.cr-bericht.telekom.com/site19/>

- DTZ. (2014). *The CoWorking Revolution*. [https://issuu.com/dtzukraine/docs/dtz-coworking-revolution\\_be14ec4538792f](https://issuu.com/dtzukraine/docs/dtz-coworking-revolution_be14ec4538792f)
- EBP Schweiz AG. (2018). *Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag—Denkbare Anwendungen und Effekte in der Schweiz* [Zusammenfassung Grundlagenstudie (Phase A) und Vertiefungsstudien (Phase B)]. BaslerFonds, Schweizerischer Städteverband et al.
- Ercan, M., Malmodin, J., Bergmark, P., Kimfalk, E., & Nilsson, E. (2016). *Life Cycle Assessment of a Smartphone*. 124–133. *Proceedings of the 4th Conference on ICT for Sustainability. ICT4S*. Amsterdam, Netherlands. August 2016. <https://doi.org/10.2991/ict4s-16.2016.15>
- Erdmann, L., & Hilty, L. (2010). Scenario Analysis: Exploring the Macroeconomic Impacts of Information and Communication Technologies on Greenhouse Gas Emissions. *Journal of Industrial Ecology*, 14(5), 826–834.
- Foertsch, C. (2019). *2019 State of Coworking: Over 2 Million Coworking Space Members Expected*. deskmag. <http://www.deskmag.com/en/2019-state-of-coworking-spaces-2-million-members-growth-crisis-market-report-survey-study>
- GeSI, & Accenture Strategy. (2015). #SMARTer2030. *ICT Solutions for 21st Century Challenges*.
- GeSI, & BCG. (2012). *SMARTer 2020: The Role of ICT in Driving a Sustainable Future*. GeSI, The Boston Consulting Group. <http://gesi.org/report/detail/gesi-smarter2020-the-role-of-ict-in-driving-a-sustainable-future>
- GeSI, The Climate Group, & McKinsey. (2008). *SMART 2020. Enabling the low carbon economy in the information age*. GeSI, The Climate Group. <https://www.theclimategroup.org/sites/default/files/archive/files/Smart2020Report.pdf>
- Girod, B., & de Haan, P. (2010). More or Better? A Model for Changes in Household Greenhouse Gas Emissions due to Higher Income. *Journal of Industrial Ecology*, 14(1), 31–49. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00202.x>
- Girod, B., Lang, T., & Nägele, F. (2014). *Abschlussbericht: Energieeffizienz in Gebäuden: Herausforderungen und Chancen für Energieversorger und Technologiehersteller*. ETH Zurich.
- Glogger, A. F., Zängler, T. W., & Karg, G. (2008). The Impact of Telecommuting on Households' Travel Behaviour, Expenditures and Emissions. In C. Jensen-Butler, B. Sloth, M. M. Larsen, B. Madsen, & O. A. Nielsen (Hrsg.), *Road Pricing, the Economy and the Environment* (S. 411–425). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-77150-0\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-540-77150-0_21)
- Gossart, C. (2015). Rebound Effects and ICT: A Review of the Literature. In *ICT Innovations for Sustainability* (S. 435–448). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_26)
- Hilty, L. (2008). *Information technology and sustainability: Essays on the relationship between ICT and sustainable development*.
- Hilty, L. (2019). Weltretter 3.0: Drei Chancen für smarten Umweltschutz. *movum - Debatten zur Transformation*.
- Hilty, L., & Aebischer, B. (2015). ICT for Sustainability: An Emerging Research Field. In *ICT Innovations for Sustainability* (S. 3–36). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_1)
- Hilty, L., Aebischer, B., & Rizzoli, A. (2014). Modeling and evaluating the sustainability of smart solutions. *Environmental Modelling & Software*, 56, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.04.001>
- Hilty, L., Arnfalk, P., Erdmann, L., Goodman, J., Lehmann, M., & Wäger, P. (2006). The relevance of information and communication technologies for environmental sustainability – A prospective simulation study. *Environmental Modelling & Software*, 21(11), 1618–1629. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.05.007>
- Hilty, L., & Bieser, J. (2017). *Opportunities and Risks of Digitalization for Climate Protection in Switzerland*. University of Zurich. [http://www.zora.uzh.ch/id/eprint/141128/1/Study\\_Digitalization\\_Climate\\_Protection\\_Oct2017.pdf](http://www.zora.uzh.ch/id/eprint/141128/1/Study_Digitalization_Climate_Protection_Oct2017.pdf)
- Hilty, L. (2015). Ethical Issues in Ubiquitous Computing—Three Technology Assessment Studies Revisited. In K. Kinder-Kurlanda & C. Ehrwein Nihan (Hrsg.), *Ubiquitous Computing in the Workplace: What Ethical Issues? An Interdisciplinary Perspective* (S. 45–60). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-13452-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13452-9_4)
- Hilty, L., Wäger, P., Lehmann, M., Hischer, R., Ruddy, T., & Binswanger, M. (2004). *The future impact ICT on environmental sustainability. Fourth Interim Report. Refinement and Quantification*. (Technical Report Fourth Interim Report). Institute for Prospective Technological Studies (IPTS).
- Hintemann, R., & Hinterholzer, S. (2019). Energy consumption of data centers worldwide. How will the Internet become green? *Proceedings of the 6th International Conference on Information and Communication Technology for Sustainability*, 2382. Laap<http://ceur-ws.org/Vol-2382/>
- Hörl, S., Becker, F., Dubernet, T., & Axhausen, K. W. (2019). *Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge: Eine Abschätzung*. Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI), Bundesamt für Strassen.

- 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. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/10/103001>
- Mader, C., Hilty, L. M., Som, C., & Wäger, P. (2019). Transparenz normativer Orientierungen in partizipativen TA-Projekten: TATuP - Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis, 28(1), 58–64. <https://doi.org/10.14512/tatup.28.1.58>
- Malmodin, J., Bergmark, P., Lövehagen, N., Ercan, M., & Bondesson, A. (2014). Considerations for macro-level studies of ICT's enablement potential. *Proceedings of the 2nd Conference on ICT for Sustainability. ICT4S*. Stockholm, Sweden. August 2014. <https://doi.org/10.2991/ict4s-14.2014.22>
- Malmodin, J., & Lundén, D. (2018). The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. *Sustainability*, 10(9), 3027. <https://doi.org/10.3390/su10093027>
- Moberg, Å., Borggren, C., & Finnveden, G. (2011). Books from an environmental perspective—Part 2: E-books as an alternative to paper books. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(3), 238–246. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0255-0>
- Mokhtarian, P. (1990). A typology of relationships between telecommunications and transportation. *Transportation Research Part A: General*, 24(3), 231–242. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(90\)90060-J](https://doi.org/10.1016/0191-2607(90)90060-J)
- Müller, A. (2016). The digital nomad: Buzzword or research category? *Transnational Social Review*, 6(3), 344–348. <https://doi.org/10.1080/21931674.2016.1229930>
- NTT Group. (2019). *Sustainability Report 2018*. [https://www.ntt.co.jp/csr\\_e/pdf/sustainability\\_report\\_2018e.pdf](https://www.ntt.co.jp/csr_e/pdf/sustainability_report_2018e.pdf)
- Pamlin, D., & Szomolányi, K. (2006). *Saving the climate@ the speed of light. First roadmap for reduced CO2 emissions in the EU and beyond*. European Telecommunications Network Operators' Association, WWF. [http://assets.panda.org/downloads/road\\_map\\_speed\\_of\\_light\\_wwf\\_etno.pdf](http://assets.panda.org/downloads/road_map_speed_of_light_wwf_etno.pdf)
- Pouri, M., & Hilty, L. (2018). ICT-Enabled Sharing Economy and Environmental Sustainability – a Resource-oriented Approach. *Proceedings of EnviroInfo 2018*. EnviroInfo, Munich.
- Santarius, T. (2012). *Der Rebound-Effekt. Über die unerwünschten Folgen der erwünschten Energieeffizienz*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.
- Schneider, A. (2019). Informal processing of electronic waste in Agbogbloshie, Ghana: A complex adaptive systems perspective. *Proceedings of the 6th Conference on ICT for Sustainability. ICT4S*. Lappeenranta, Finland. June 2019.
- Sorrell, S., & Dimitropoulos, J. (2008). The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions. *Ecological Economics*, 65(3), 636–649. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.08.013>
- Spinuzzi, C. (2012). Working Alone Together: Coworking as Emergent Collaborative Activity. *Journal of Business and Technical Communication*, 26, 399–441. <https://doi.org/10.1177/1050651912444070>
- Statistisches Bundesamt. (2020). *Pendeln in Deutschland: 68 % nutzen Auto für Arbeitsweg*. Destatis. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Erwerbstaetigkeit/im-Fokus-Pendler.html>
- Swisscom. (2019). *Sustainability Report 2018*. <https://reports.swisscom.ch/en/2018/report/sustainability-report>
- Taiebat, M., Stolper, S., & Xu, M. (2019). Forecasting the Impact of Connected and Automated Vehicles on Energy Use: A Microeconomic Study of Induced Travel and Energy Rebound. *Applied Energy*, 247, 297–308. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.174>
- Tanguay, G., & Lachapelle, U. (2019). *Potential Impacts of Telecommuting on Transportation Behaviours, Health and Hours Worked in Québec* (Nr. 2019rp-07; CIRANO Project Reports). CIRANO. <https://ideas.repec.org/p/cir/cirpro/2019rp-07.html>
- Thiébaud, E., Hilty, L., Schlupe, M., & Faulstich, M. (2017). Use, Storage, and Disposal of Electronic Equipment in Switzerland. *Environmental Science & Technology*, 51(8), 4494–4502. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06336>
- Vaddadi, B., Bieser, J., Pohl, J., & Kramers, A. (2020). Towards a conceptual framework of direct and indirect environmental effects of co-working. *Proceedings of the 7th Conference on ICT for Sustainability. ICT4S*. Bristol, UK. June 2020.
- Verizon. (2019). *2018 Corporate Responsibility Report*. <https://www.verizon.com/about/sites/default/files/corporate-responsibility-report/2018/index.html>
- Vodafone. (2019). *Sustainable Business Report 2019*. <https://www.vodafone.com/our-purpose/reporting-centre>
- Wäger, P., Hischer, R., & Widmer, R. (2015). The Material Basis of ICT. In *ICT Innovations for Sustainability* (S. 209–221). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_21)
- Warland, L., & Hilty, L. (2016). *Factsheet: Business Travel*. University of Zurich. [https://www.sustainability.uzh.ch/dam/jcr:b885ad2f-bf2b-4a6a-bcde-e3de15598459/2016-08-17\\_Factsheet\\_business%20travel.pdf](https://www.sustainability.uzh.ch/dam/jcr:b885ad2f-bf2b-4a6a-bcde-e3de15598459/2016-08-17_Factsheet_business%20travel.pdf)

- WBGU. (2019). *Unsere gemeinsame digitale Zukunft*.
- Weber, C., Koomey, J., & Matthews, H. (2010). The Energy and Climate Change Implications of Different Music Delivery Methods. *Journal of Industrial Ecology*, 14(5), 754–769. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00269.x>
- Weichbrodt, J., Tanner, A., Josef, B., & Schulze, H. (2015). Die Entwicklung von Arbeitsflexibilität in Organisationen anhand des FlexWork Phasenmodells. *Psychologie Aktuell*. <https://irf.fhnw.ch/handle/11654/4991>
- Williams, E. (2011). Environmental effects of information and communications technologies. *Nature*, 479(7373), 354–358. <https://doi.org/10.1038/nature10682>
- Windlinger, L., Lange, S., & Cui, Y. (2016). *Belegungsanalysen – Auslastung von Büroarbeitsplätzen* (Newsletter TRANSFER; S. 4). Kompetenzgruppe Betriebsökonomie und Human Resources, Institut für Facility Management, ZHAW.
- World Resources Institute, & World Business Council for Sustainable Development. (2004). *The Greenhouse Gas Protocol. A Corporate Accounting and Reporting Standard. Revised edition*.