

Mathias Kirchner

# Mögliche Auswirkungen der Digitalisierung auf Umwelt und Energieverbrauch

## Mögliche Auswirkungen der Digitalisierung auf Umwelt und Energieverbrauch

Digitalisierung beeinflusst anhand vieler unterschiedlicher Wirkungskanäle den Energieverbrauch und die Umwelt. Direkt dämpft sie durch die Verfügbarkeit besserer Technologien sowie (fast) immaterieller Güter und Dienstleistungen den Energie- und Ressourcenverbrauch, trägt aber auch zum verstärkten Aufkommen von "E-Waste" bei. Ökonomische Wirkungen und Reaktionen könnten die positiven Umwelteffekte vermindern (Rebounds, z. B. Steigerung der Nachfrage aufgrund niedrigerer Preise, Wirtschaftswachstum). Ausschlaggebend werden am Ende aber wohl systemische Effekte (neue Wertschöpfungsstrukturen, gesellschaftliche und institutionelle Veränderungen) sein, die zur Zeit noch schwierig zu schätzen sind. Digitalisierung hat jedenfalls das Potential, eine sozial-ökologische Transformation der Gesellschaft zu unterstützen, die notwendig ist, um z. B. die Klimaziele des Übereinkommens von Paris 2015 zu erreichen. Anhand eines Einblickes in die Vorteile eines Smart Grid wird dieses Potential exemplarisch aufgezeigt. Um das transformative Potential der Digitalisierung zu erschließen, benötigt es unterstützende Rahmenbedingungen, wie z. B. eine ökologische Steuerreform, die Berücksichtigung sozialer Akzeptanz und eine weltweite Perspektive.

## Possible Impact of Digitisation on the Environment and Energy Consumption

Digitisation will affect energy use and the environment through many different channels. It will decrease energy and resource use directly by providing better technologies and the availability of (almost) immaterial goods. This, however, will also contribute directly to the generation of "e-waste". Economic effects could potentially mitigate positive environmental impacts due to rebound effects (i.e., increased demand due to lower prices, economic growth). The most decisive effect is likely to be systemic, i.e., structural changes in value added chains as well as social and institutional changes. Digitisation has the capability to facilitate a socio-ecological transformation of the society. This is necessary, for example, to meet the climate change mitigation goals of the Paris Agreement 2015. We look at the advantages of a smart grid to illustrate this capability. Safeguarding this capability will require a supporting framework, such as an ecological tax reform, the consideration of social acceptance and a global perspective.

### Kontakt:

**Dipl.-Ing. Dr. Mathias Kirchner:** WIFO, 1030 Wien, Arsenal, Objekt 20, [mathias.kirchner@wifo.ac.at](mailto:mathias.kirchner@wifo.ac.at)

**JEL-Codes:** Q40, Q41, Q43, Q50, Q53, Q55 • **Keywords:** Digitalisierung, Energie, Effizienz, Rebound-Effekte, E-Waste, Smart Grid

Der vorliegende Beitrag beruht auf dem Kapitel "Themenfeldanalyse: Umwelt und Energie" der folgenden WIFO-Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort: Julia Bock-Schappelwein, Michael Böheim, Elisabeth Christen, Stefan Ederer, Matthias Firgo, Klaus S. Friesenbichler, Werner Hölzl, Mathias Kirchner, Angela Köppl, Agnes Kügler, Christine Mayrhuber, Philipp Piribauer, Margit Schratzenstaller, Politischer Handlungsspielraum zur optimalen Nutzung der Vorteile der Digitalisierung für Wirtschaftswachstum, Beschäftigung und Wohlstand (August 2018, 132 Seiten, 50 €, kostenloser Download: <https://www.wifo.ac.at/www/pubid/61256>).

## 1. Einleitung und Fragestellungen

Die eingehende Auseinandersetzung mit den Auswirkungen der Nutzung digitaler Technologien auf Umwelt und Energiesysteme und deren Resilienz ist im Wesentlichen aus zwei Gründen von hohem Interesse: Einerseits erzeugt die Etablierung eines "Smart Everything" ein hohes Potential an systemischer Veränderung, z. B. in Gestalt der Dezentralisierung und Dekarbonisierung des Energiesystems oder durch Dematerialisierung von Produkten und Dienstleistungen. Andererseits besteht bisher noch kein Konsens darüber, ob die Digitalisierung – unter ganzheitlicher Berücksichtigung von Folgeeffekten – tatsächlich zu einer Verbesserung der Umweltbedingungen, einem CO<sub>2</sub>-ärmeren Energiesystem und einer Steigerung der Resilienz beitragen kann.

Weitgehender Konsens besteht in der Literatur in Bezug auf die rasante Entwicklung von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) und die damit einhergehenden zunehmenden (Transformations-)Möglichkeiten der Digitalisierung. Diese Entwicklung beruht zum einen auf den exponentiellen Steigerungsraten der Leistung von Halbleitern in den letzten 40 Jahren (*Chien – Karamcheti, 2013, Moore, 1965*). Zum anderen wurde aber zugleich die Effizienz von Computer- und Kommunikationstechnologien, Sensor- und Steuerungstechnologien sowie Energiespeicherung

und -gewinnung verbessert und weiterentwickelt. Daraus entstanden viele neue "smarte" Geräte mit sehr oder extrem geringem Energiebedarf je Anwendung (Bell, 2008, Koomey – Matthews – Williams, 2013). Statt Maximierung der Rechenleistung je Computerchip steht nun die Maximierung der Funktionalität (bzw. Anwendungen) je Rechenleistung im Fokus der IKT-Branche (Waldrop, 2016). Dies ist ganz im Sinne einer transformativen Klima- und Energiepolitik, die ebenfalls Funktionalitäten (z. B. Mobilitätsbedarf) in den Mittelpunkt stellt (Köppl et al., 2016). Zudem machen die vielfältigen aus dieser technischen Entwicklung neu entstandenen digitalen Anwendungsmöglichkeiten Digitalisierung zu einer Basistechnologie, die alle ökonomischen, sozialen und umweltrelevanten Bereiche durchdringt. Für die Frage nach den Effekten der zunehmenden Digitalisierung auf Umwelt und Energieverbrauch besonders relevant sind z. B. das Smart Grid, Smart Homes, intelligente Verkehrssysteme, Videokonferenzen und Teleworking bzw. Mobile Working, Sharing-Plattformen, E-Commerce oder Precision Farming. Von diesen Anwendungen erhofft man sich große Wissens- und Effizienzgewinne (z. B. bessere Prozesskontrollen, erhöhte Geschwindigkeit und Genauigkeit von Analysen) wie auch Erleichterungen für einen institutionellen Wandel durch bessere Kommunikation und Koordination, um eine sozioökologische Transformation der Gesellschaft zu unterstützen.

#### Beispiele für "smarte" Anwendungen mit Umwelt- und Energierelevanz

*Smart Everything:* umfassende digitale Vernetzung von technischen Komponenten sowie ökonomischen und sozialen Aktivitäten, etwa:

*Smart Grid:* intelligentes Stromnetz, das durch Einsatz digitaler Technologien höhere Flexibilität und bessere Kontrolle zulässt, indem alle Komponenten und Akteure miteinander vernetzt sind

*Smart Homes:* Wohnungen und Häuser, in denen wichtige Funktionalitäten (Heizen, Stromverbrauch, Lebensmittelversorgung, Sicherheit) durch digitale Technologien steuerbar sind und damit verbessert werden sollen

*Videokonferenzen:* Informationsaustausch über digitale Technologien, ersetzt physische Anwesenheit aller Teilnehmer und Teilnehmerinnen

*Teleworking, Mobile Working:* die Möglichkeit den Arbeitsplatz flexibel auszuwählen, indem digitale Technologien den Zugang zur Arbeitsinfrastruktur schaffen

*Intelligentes Verkehrssystem:* unterstützt die Koordination von Straßen-, Schienen-, Schiffs- und Luftverkehr

*Automatisiertes Fahren:* selbständige Fortbewegung von Fahrzeugen mit Hilfe von digitaler Technologie (d. h. ohne menschlichen Eingriff)

*Sharing-Plattformen:* ermöglichen, meist unterstützt durch digitale Technologien, die geteilte Nutzung von Gütern und Dienstleistungen

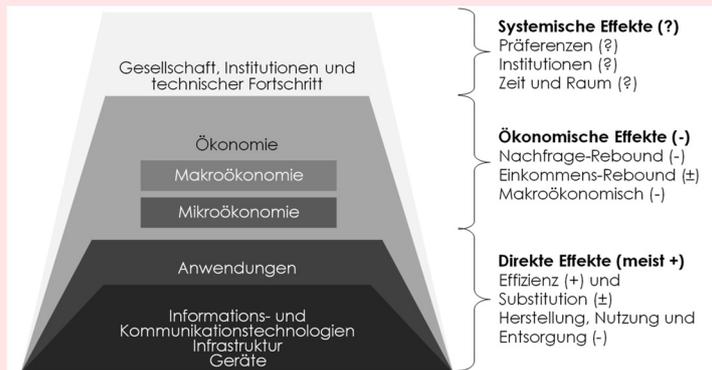
*E-Commerce:* kommerzieller Handel, der hauptsächlich in der digitalen Welt (vor allem Internet) abgewickelt wird

*Precision Farming:* Einsatz von (zum Großteil) digitaler Technologie, um landwirtschaftliche Flächen differenzierter und zielgerichteter zu bewirtschaften

Aufgrund dieser Entwicklungen sind die Erwartungen hoch, durch Digitalisierung viele nachhaltige(re) Lösungen zu finden. Die Auswirkungen werden aber durch weitreichende systemische Veränderungen und Rückkopplungen mitbestimmt. Eine systemische Sichtweise, wie sie Horner – Shehabi – Azevedo (2016), Börjesson Rivera et al. (2014), Santarius (2014), oder Williams (2011) vorschlagen, ist dabei hilfreich (Abbildung 1). Die Ebene der "direkten Effekte" bezieht sich dabei nur auf die direkten Auswirkungen der Bereitstellung von *IKT-Infrastruktur und Geräten*, z. B. den Energieaufwand, der für die Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Servern notwendig ist. Die Ebene "Anwendungen" bezieht sich auf die direkten Auswirkungen der Nutzung von spezifischen Anwendungen bzw. Dienstleistungen (z. B. Smart Homes, Cloud-Services, Car-Sharing, Teleworking) im Vergleich mit ihren analogen Gegenstücken (Effizienz und Substitution). In der Ebene "Ökonomie" werden sowohl mikroökonomische (z. B. Änderungen von Preisen, Konsumverhalten) als auch makroökonomische Effekte (z. B. Veränderung der Wertschöpfungsketten, Wachstum) mitberücksichtigt. Die höchste Ebene betrifft systemische Veränderung in Bezug auf die Gesellschaft,

Institutionen und technischen Fortschritt (z. B. Veränderung von Werten und Normen, Schaffung von neuem Wissen oder Handlungsmöglichkeiten). Für eine Schätzung der Umwelteffekte ist jeweils die Gesamtheit der Effekte zu berücksichtigen, d. h. den *Dematerialisierungen* sind auch die *Rematerialisierungen* entgegenzustellen (Berkhout – Hertin, 2004). Mit jeder Ebene steigt dabei die Unsicherheit und Komplexität der Betrachtung, da alle Systeme auf einander rückwirken können. Dementsprechend schwieriger wird es, die Auswirkungen auf z. B. Treibhausgasemissionen, Energie- oder Ressourcenverbrauch unter Beachtung der Rückwirkungen in höheren Ebenen zu quantifizieren.

Abbildung 1: Umwelteffekte der Digitalisierung in Interaktion mit technischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Systemen



Q: Horner – Shehabi – Azevedo (2016), Börjesson Rivera et al. (2014), Santarius (2014), Williams (2011). + ... positive Effekte auf die Umwelt, - ... negative Effekte auf die Umwelt, ± ... keine Effekte auf die Umwelt, ? ... Auswirkungen unklar. Die Einschätzung der Richtung der Auswirkungen basiert auf dem aktuellen Stand der Literatur.

Auf Basis dieser Überlegungen sind folgende Effekte der Digitalisierung auf Energieverbrauch und Umwelt zu unterscheiden:

- direkte Effekte,
- indirekte Effekte durch ökonomische Folgewirkungen,
- gesellschaftliche und institutionelle Folgewirkungen.

Zusätzlich werden exemplarisch die möglichen Auswirkungen der Digitalisierung auf das Stromnetz aufgezeigt, da in diesem Bereich enorme Transformationsmöglichkeiten bestehen.

## 2. Theoretische und empirische Befunde

### 2.1 Direkte Effekte der Digitalisierung auf Energieverbrauch und Umwelt

Den positiven direkten Umwelteffekten liegen zwei grundlegende Mechanismen der Digitalisierung zugrunde: zum einen ein erwarteter Effizienzgewinn, der den Ressourcen- und Energieverbrauch dämpft (z. B. durch Smart Homes), und zum anderen die Substitution von materiellen Gütern hin zu (fast) immateriellen Gütern (z. B. Teleworking ersetzt das Pendeln, E-Books ersetzen Gedrucktes). Die dadurch herbeigeführte Dematerialisierung und Dekarbonisierung soll die nachhaltige Transformation der Gesellschaft ermöglichen (Sui – Rejeski, 2002). Digitale Anwendungen benötigen aber eine IKT-Infrastruktur. Daher muss der Ressourcen- und Energieverbrauch für die Herstellung, Verwendung und Entsorgung von IKT-Infrastruktur mit einbezogen werden.

Für die Ermittlung direkter Umwelteffekte eignen sich besonders Lebenszyklusanalysen, die die Auswirkungen entlang des ganzen Lebenszyklus eines Produktes untersuchen. Wie aktuelle Lebenszyklusanalysen zeigen, entfällt der Großteil des Energieverbrauches heute auf die Herstellung (62% bis 87%) und nicht mehr auf die Verwendungsphase eines Produktes (Deng – Babbitt – Williams, 2011). Diese Entwicklung ist auf das Aufkommen sehr energieeffizienter mobiler IKT-Geräte wie auch deren hohe Austauschraten zurückzuführen (Koomey – Matthews – Williams, 2013, Williams, 2011).

Dennoch ist der Anteil des Stromverbrauches für IKT am Gesamtverbrauch in der Nutzungsphase signifikant (2012 weltweit 4,6% bzw. 900 TWh; *Van Heddeghem et al.*, 2014). In Österreich entfielen auf Beleuchtung und EDV (einschließlich Unterhaltungs- und Kommunikationstechnologie) im Jahr 2015 14,4% des Stromverbrauches bzw. 31 PJ (*Statistik Austria*, 2017).

Eine gute Übersicht über Studien, die direkte positive (Effizienz und Substitution) und negative Umwelteffekte (Herstellung, Nutzung und Entsorgung) der Digitalisierung gegenüberstellen, findet sich in *Arushanyan – Ekener-Petersen – Finnveden* (2014) und *Horner – Shehabi – Azevedo* (2016). Selbst die Berechnung der direkten Auswirkungen ist demnach sehr unsicher und liefert unterschiedliche Ergebnisse. So werden die Nettoenergieeffekte des E-Commerce durch Annahmen zu Bevölkerungsdichte und Transportwege stark beeinflusst, jene der E-Books durch Annahmen zum Leseverhalten und jene des Teleworking durch Annahmen zur Regelmäßigkeit (*Horner – Shehabi – Azevedo*, 2016). Das Vorzeichen des direkten Nettoeffektes für E-Commerce, Teleworking, E-Books, Smart Homes oder automatisiertes Fahren ist im Durchschnitt aller Studien positiv (d. h. es wird Energie gespart), die Literatur ist aber weit von einem Konsens entfernt<sup>1)</sup>.

Toxische Emissionen, die bei der Entsorgung und dem Recycling von IKT-Geräten entstehen ("E-Waste"), sind ein weiteres und in vielen Studien wenig beachtetes Problem der Digitalisierung, mit möglichen schwerwiegenden Folgen für Gesundheit und Umwelt (*Tsydenova – Bengtsson*, 2011). Das weltweite Aufkommen von E-Waste hat stark steigende Tendenz und wird für das Jahr 2016 auf rund 45 Mio. t geschätzt (*Baldé et al.*, 2018). Ein beträchtlicher Teil des E-Waste wird überdies von Industrieländern in Entwicklungsländer exportiert (*Widmer et al.*, 2005). Während die internationalen Organisationen und die Industrieländer schon über viele stringente Richtlinien<sup>2)</sup> sowie gute Recycling- und Abfalltechnologien verfügen, erfolgen Entsorgung und Recycling in Entwicklungsländern oft mit veralteten Technologien und informell (*Li et al.*, 2015, *Widmer et al.*, 2005). Trotz großer Fortschritte im Recycling von "kritischen Metallen" (*Izatt et al.*, 2014) rückt zudem die Bereitstellung von Rohstoffen für die Herstellung von IKT-Geräten wieder in den Mittelpunkt (*Buchert – Schüler – Bleher*, 2009, *Gordon – Bertram – Graedel*, 2006). Bestehende Initiativen (*BMLFUW*, 2012, *Europäische Kommission*, 2014) stehen in der Kritik, den Fokus zu sehr auf die Versorgungssicherheit zu legen, zulasten sozialer und umweltrelevanter Ziele (*AG Rohstoffe*, 2017, *Küblböck*, 2015).

## 2.2 Ökonomische Folgewirkungen für Energieverbrauch und Umwelt

Mögliche Effizienzgewinne können durch *ökonomische Rebound-Effekte* gemindert oder sogar ins Gegenteil verkehrt werden ("Back-Fire"). Erstmals wurde dieser Mechanismus von *Jevons* (1866) beschrieben<sup>3)</sup>. In der Literatur werden viele unterschiedliche ökonomische Rebound-Mechanismen behandelt (*van den Bergh*, 2011, *Santarius*, 2014): Der direkte Nachfrage-Rebound bezieht sich auf die Steigerung der Nachfrage nach einem Produkt (Eigenpreiselastizität), wenn Effizienzgewinne den effektiven Preis senken (so ziehen Treibstoffeinsparungen durch eine Verbesserung der Software für Dieselmotoren eine Ausweitung der Fahrleistung nach sich; *Khazzoom*, 1980). Der indirekte Einkommens-Rebound berücksichtigt den Effekt der Verbilligung eines Produktes, durch den für den Konsum anderer Produkte mehr Geld zur Verfügung steht (Kreuzpreiselastizität; *Thiesen et al.*, 2008). Trägt die Digitalisierung zu Wirtschaftswachstum und Strukturwandel bei und beeinflusst dadurch indirekt Umwelteffekte, die mit diesen zwei Faktoren zusammenhängen, dann spricht man von makroökonomischen Rebound-Effekten (*Sorrell*, 2009).

<sup>1)</sup> So liegt laut *Horner – Shehabi – Azevedo* (2016) die Bandbreite des Nettoenergieeinsparungseffektes für E-Commerce zwischen -500% (fünffmal so hoher Energiebedarf wie zuvor) und 93%.

<sup>2)</sup> Etwa das Basler Übereinkommen in Bezug auf gefährliche Abfälle oder die EU-Richtlinie 2011/65/EU.

<sup>3)</sup> Nach *Jevons* (1866) steigerten die Effizienzgewinne durch den Einsatz der von Watts entwickelten Dampfmaschine, die eine frühere weniger effiziente Variante ablöste, den Kohleverbrauch in England, statt ihn zu verringern.

Empirische Studien zu den ökonomischen Rebound-Effekten deuten auf sehr hohe Auswirkungen hin. Jedoch liegen aufgrund vieler methodischer Herausforderungen und unterschiedlicher Systemgrenzen die Schätzungen für die Rebound-Effekte<sup>4)</sup> sehr weit auseinander. Eine aktuelle Übersicht von *Thomas – Azevedo (2013A)* zeigt eine Bandbreite von +1% bis +111% für den direkten Nachfrage-Rebound und von –57% bis +300% für den Einkommens-Rebound. Nach *Gossart (2015)* gehen E-Commerce oder Videokonferenzen oft mit substantiellen indirekten Rebound-Effekten für den Transport einher (zwischen +13% und +73%). Der makroökonomische Nettoeffekt der Digitalisierung auf Energieverbrauch oder Treibhausgasemissionen ist, wie ein Vergleich von entsprechenden Studien von *Erdmann – Hilty (2010)* zeigt, gering und nicht eindeutig. Aus den von *Santarius (2014)* zitierten Studien zu makroökonomischen Rebound-Effekten einer Steigerung der Energieeffizienz ergibt sich eine Bandbreite von +26% bis über +100%. Insgesamt ist die Wahrscheinlichkeit eines Back-Fire (d. h. eines Rebound-Effektes über +100%) gering (*Sorrell, 2009, Thomas – Azevedo, 2013B*). Ergebnisse makroökonomischer Studien zu den Folgen einer Erhöhung der Energieeffizienz können aber nicht 1 : 1 auf die Effekte der Digitalisierung umgelegt werden, da die Digitalisierung als Basistechnologie weiterreichende Auswirkungen hat als eine reine Effizienzsteigerung (*Horner – Shehabi – Azevedo, 2016, Koomey – Matthews – Williams, 2013, Williams, 2011*).

### 2.3 Gesellschaftliche und institutionelle Effekte der Digitalisierung für Energieverbrauch und Umwelt

Die Digitalisierung hat systemische Auswirkungen auf die Präferenzen von Konsumenten und Konsumentinnen (z. B. Art der Kommunikation)<sup>5)</sup>, soziale Institutionen (z. B. Stadtplanung, E-Government) und Produktionsorganisationen (z. B. dezentraler Strommarkt durch Smart Grids; *Greening – Greene – Difiglio, 2000*). Diese systemischen Auswirkungen sind aber mit hohen Unsicherheiten behaftet, kaum quantifizierbar und schwierig zuzurechnen (*Berkhout – Hertin, 2004*). So weicht Digitalisierung durch virtuelle Dienstleistungen und Erlebnisse die Beschränkung durch Zeit und Raum immer mehr auf (*Røpke – Christensen, 2012*). Im Zeit-Rebound verändert die Digitalisierung die Kosten, aber auch die Art und Weise, wie die Zeit genutzt wird (*Binswanger, 2001, Plepys, 2002, Sorrell – Dimitropoulos, 2008*). Ebenso können Raum-Rebounds den Bedarf an Büro- oder Wohnfläche beeinflussen (z. B. Flatscreens versus Röhrenbildschirme; *Girod – de Haan – Scholz, 2011*). Zudem birgt die Digitalisierung mehr Möglichkeiten, neue oder komplementäre Produkte zu konsumieren (*Røpke – Haunstrup Christensen – Ole Jensen, 2010*), z. B. Speichern von digitaler Musik und Filmen, billigerer Druck von Dokumenten, Erweiterung der Einkaufsmöglichkeiten durch E-Commerce.

Wieweit sich die Digitalisierung letztlich in sozialen Verhaltensänderungen bzw. psychologischen Rebounds auswirkt, ist noch unzureichend erforscht (*Santarius, 2014*), obwohl dies als zentral für den gesamten Nettoeffekt auf Umwelt und Energieverbrauch gesehen wird (*Horner – Shehabi – Azevedo, 2016, Plepys, 2002*). So werden sich die Elastizitäten für ökonomische Rebounds im Laufe der Zeit aufgrund dieser Effekte vielleicht stark verändern (*Santarius, 2014*). Erwartet wird ein beträchtliches positives systemisches Potential durch Intensivierung von Lernprozessen und Wissensgewinn (*Gossart, 2015*) wie auch durch eine erhöhte Transparenz und direkte Kommunikation zwischen Produzenten und Konsumenten bzw. Konsumentinnen, mit positiven Effekten auf Umweltmonitoring (z. B. ökologische Transparenz; *Heinonen – Jokinen – Kaivo-oja, 2001*) und Nachvollziehbarkeit der Umwelteffekte entlang der Wertschöpfungsketten (*Lehmann – Reiche – Schiefer, 2012*). In Bezug auf den Klimawandel werden hohe Erwartungen in das Transformationspotential des Smart Grid gesetzt, das daher in der Folge näher betrachtet wird.

<sup>4)</sup> Standardmäßig angegeben als Verringerung des direkten positiven Nettoeffektes in Prozent; negative Werte bedeuten daher, dass kein Rebound vorliegt und die positiven Effekte (Energieeinsparung) verstärkt werden.

<sup>5)</sup> Internet und Smartphone etwa wurden innerhalb weniger Jahrzehnte bzw. Jahre zu essentiellen Bestandteilen des täglichen Lebens (*Bates et al., 2015*).

## 2.4 Transformation des Strommarktes durch das Konzept des intelligenten Stromnetzes (Smart Grid)

Das Konzept des intelligenten Stromnetzes (Smart Grid), ermöglicht durch die Digitalisierung, wird als wegweisend für die Entwicklung eines effizienteren, resilienteren und CO<sub>2</sub>-ärmeren Energiesystems gesehen (*Europäische Kommission, 2011, Technologieplattform Smart Grids Austria, 2015*). Vom konventionellen Stromnetz unterscheidet sich das Smart Grid vor allem durch den Grad der Flexibilität, eine dezentralere Architektur und den höheren Einsatz von IKT bzw. digitalen Anwendungen<sup>6)</sup>. Die Datenbereitstellung (Big Data, Internet der Dinge) sollte das Management von Stromerzeugung, -nachfrage und -speicherung erleichtern, die Flexibilität der Märkte und die Partizipation der Konsumenten bzw. Konsumentinnen am Strommarkt erhöhen sowie den Energieverbrauch senken helfen. Der Begriff Smart Grid scheint damit zu kurz zu greifen, da es hierbei um ein ganzheitliches Smart-Energy-System geht (*Palensky – Kupzog, 2013*), mit engen Querverbindungen zur restlichen Wirtschaft, Politik und Umwelt (*Aliefendic et al., 2014*). Das Stromnetz gilt aber als verbindendes und integratives Element zwischen diesen Möglichkeiten als zentraler Bauteil.

Die wohl bekannteste digitale Anwendung in einem Smart Grid ist der Smart Meter, dessen Einführung aktuell in Österreich im Gange ist. Aus der automatisierten Verfügbarkeit der Information über den Stromverbrauch in Echtzeit wird ein großer Informationsgewinn für Konsumenten und Konsumentinnen erwartet. Vor allem in Verbindung mit einem flexibleren Preissystem sollte eine Glättung der Spitzenlast und damit Entlastung im Kapazitätsmanagement ebenso die Folge sein wie substantielle Energieeinsparungspotentiale. Von zentraler Bedeutung sind im Konzept des Smart Grid die Einbettung der Smart Meter in das Verteilernetzwerk und die Möglichkeit, direkt auf Batterien (z. B. E-Autos) und andere smarte Geräte zuzugreifen (*BSI, 2014, Timpe, 2009*). Dies ermöglicht ein nachfrageseitiges Management, um die Netzkapazitäten optimal auszulasten (*Siano, 2014*). Die Systemveränderung von "Konsumenten" hin zu "Prosumern" soll dadurch ebenfalls vorangetrieben werden (*Europäische Kommission, 2016*). Private Photovoltaikanlagen könnten etwa zur dezentralen Stromerzeugung aus erneuerbarer Energie beitragen, womit die privaten Haushalte als Produzenten im Energiesystem auftreten. Als digitale Schlüsseltechnologie würde die Block Chain die Transaktionen zwischen Prosumern möglichst sicher und einfach ermöglichen (*PWC, 2016*), jedoch stellen sich hier noch einige institutionelle und technische Herausforderungen (Standardisierung, Smart Contracts, Benutzerfreundlichkeit). Teillelemente eines Smart Grid sind schon heute fixer Bestandteil täglicher Netzoperationen, wie z. B. das Nachfragemanagement in den USA, Norwegen, Italien, Spanien und China (*Aghaei – Alizadeh, 2013*) und dynamische Tarife in der Smart-Grid-Prototypregion Bornholm-Insel (*Lund et al., 2016*). In Österreich wird die Entwicklung vor allem in Pionier- und Modellregionen vorangetrieben<sup>7)</sup>.

Untersuchungen zu den technischen Energieeinsparungspotentialen von Smart-Grid-Technologien<sup>8)</sup> weisen hohe Unsicherheiten, aber meist substantielle Einsparungseffekte von weit über 10% auf (*EPRI, 2008, Hledik, 2009, Pratt et al., 2010*). Zu weitaus geringeren Energieeinsparungseffekten (niedrige einstellige Raten) kommen Studien zu Smart-Meter- und Smart-Home-Anwendungen (*Kollmann – Moser, 2016, Mattern – Staake – Weiss, 2010*), vor allem wenn systematische Fehler berücksichtigt werden (*Davis et al., 2013*). Wie sich zeigt, sind für eine Verhaltensänderung nicht nur monetäre Anreize, sondern vor allem die Aufbereitung der Informationen (z. B. geringe Zahl unterschiedlicher Tarife, Design) entscheidend. Zudem können nur beschränkt Aussagen zur Persistenz der Einsparungen getätigt werden (*Naus et al., 2014*).

Ökonomisch-technische Analysen deuten unter den gegebenen Annahmen (z. B. Energieeinsparungen, Senkung der Netzkosten) auf kostengünstigere Investitions-

<sup>6)</sup> Neben einer besseren Überwachung und Regelung des Netzes wird vor allem die Möglichkeit bidirektionaler Kommunikation im Verteilernetzwerk als zwingende Voraussetzung für die Integration von erneuerbaren Energiequellen angesehen, da die Stromerzeugung aus erneuerbarer Energie häufig hohe Fluktuationen aufweist.

<sup>7)</sup> [https://open4innovation.at/de/highlights/energie\\_und\\_umwelt/smart\\_grids.php](https://open4innovation.at/de/highlights/energie_und_umwelt/smart_grids.php).

<sup>8)</sup> Etwa Informations- und Feedbacksysteme, Monitoring, Messung und Verifizierungsmaßnahmen, Lastverteilung durch effizientere Stromerzeugung, Unterstützung der Nutzung von Elektroautos, Optimierung der Spannungssteuerung, Integration der Stromerzeugung aus Windenergie- und Photovoltaikanlagen.

pfade als bei Beibehaltung konventioneller Strominfrastruktur (Bliem et al., 2014, PWC, 2010) sowie auf positive Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte hin (Aliefendic et al., 2014, Bliem et al., 2014). Entscheidend für die tatsächlichen Ergebnisse wird besonders die Entwicklung der Kosten von dezentralen Speichern sein.

Zur Resilienz des Smart Grid liegen bisher nur wenige empirische Untersuchungen vor. Allgemein wird in der Folge der Einrichtung eines Smart Grid ein Rückgang der Netzbelastung erwartet, während die Energieerzeugung durch höchstmögliche Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen optimiert werden kann (Hernando-Gil – Ilie – Djokic, 2012). Dem steht als Nachteil eine größere Angriffsfläche für Attacken gegenüber, vor allem durch die Verknüpfung von IKT mit physischen Anlagen (Netzen, Kraftwerken) und die Vielzahl an Vernetzungen (z. B. Smart Homes, E-Mobilität; Komninos – Philippou – Pitsillides, 2014). Großer Aufholbedarf besteht hier noch hinsichtlich einer systemischen und universellen Standardisierung für IKT-Sicherheit und Datenschutz (Mo et al., 2012), um das Vertrauen der Konsumenten und Konsumentinnen zu sichern, die diesen Themen hohe Priorität geben (Bigerna – Bollino – Micheli, 2016). Wenn die Zustimmung der Bevölkerung zur Nutzung des Smart Meter fehlt, ist eine hohe Drop-Out-Quote beim Smart-Meter-Roll-out die Folge, die die Transformation zu einem intelligenten Energiesystem verhindert (Kollmann – Moser, 2016). Daher sollte Digitalisierung nicht als rein technisch-ökonomisches, sondern auch als sozial-technisches System verstanden werden (Kostyk – Herkert, 2012). Anhand der Erfahrungen aus dem Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energiequellen könnten für den Ausbau des Smart Grid die geeigneten institutionellen Rahmenbedingungen für eine rasche Transformation des Energiesystems und gesellschaftliche Akzeptanz geschaffen werden, um (lokalen) Widerstand der Bevölkerung zu vermeiden (Wolsink, 2012).

### 3. Fazit

Trotz der großen Bandbreite an möglichen Umwelteffekten, der hohen Unsicherheit und des Mangels an Studien zu systemischen Effekten der Digitalisierung sind aus der vorliegenden Literatur wichtige Erkenntnisse zu den Effekten der Digitalisierung auf Umwelt und Energieverbrauch zu gewinnen. Die direkten Effekte (Substitution und Effizienz) werden demnach zum Großteil positiv und signifikant sein. Allerdings können ökonomische Folgewirkungen und Reaktionen (Rebound-Effekte, d. h. Wirkungen, die die Effekte der Digitalisierung konterkarieren) diese positiven Effekte substantiell dämpfen. Nach den meisten Studien ist ein Back-Fire (d. h. ein Rebound-Effekt über 100% der direkten Effekte) nicht zu erwarten. Allerdings sind die systemischen Folgewirkungen noch weitgehend unklar und schwierig zu quantifizieren. Sie werden in der Literatur als entscheidender Faktor genannt. Weiters wird Digitalisierung als wichtige Voraussetzung für die Dekarbonisierung des Stromnetzes (und des gesamten Energiesystems) gesehen, vor allem da sie die Integration Energie aus von erneuerbaren Quellen erleichtert.

Das Potential der Digitalisierung zur Dematerialisierung und Dekarbonisierung von Produkten wird übereinstimmend als sehr groß angesehen, wobei Richtung und Höhe der Auswirkungen wohl durch ökonomische (z. B. Rebounds) und systemische Effekte (z. B. Wissensgewinn) entschieden werden. Aufgrund der hohen Unsicherheit und Komplexität des Digitalisierungsprozesses bleiben die Nettoeffekte ungewiss.

Um das Systemverständnis zu verbessern und die wichtigsten Faktoren auf höheren Systemebenen zu identifizieren, sollten künftige Forschungsprojekte deshalb insbesondere interdisziplinär (Einbeziehung von psychologischen, sozialen, institutionellen und politischen Faktoren) und empirisch vorgehen (Fallstudien, um das Verständnis für die langfristigen Auswirkungen der Einführung des Smart Meter zu fördern).

Aus gesellschaftlicher Sicht werden entsprechende Begleitmaßnahmen nötig sein, um die Digitalisierung als Motor für Dematerialisierung und Dekarbonisierung im Energiesystem nutzen zu können. So sollte man klima- und energiepolitische Ziele in die Planung eines Smart Grid integrieren. Die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Steuer oder die Anhebung anderer Energiesteuern könnte den Effekt möglicher Nachfrage- und Einkommens-Rebounds dämpfen. Projekte oder Investitionen in Digitalisierungsanwendungen sollten möglichst unter Beachtung der Gesamtheit der Effekte beurteilt werden

und einen Fokus auf die Bereitstellung von Funktionalitäten legen. Zudem sollte aufgrund der internationalen Verflechtung des IKT-Sektors auch eine weltweite Perspektive (Standards, Regulierungen, Transparenz) eingenommen werden. Herausfordernd ist dieses Unterfangen vor allem weil trotz großer Unsicherheiten ein schneller Wandel herbeigeführt werden muss, um z. B. die Klimaziele des Übereinkommens von Paris 2015 zu erreichen.

#### 4. Literaturhinweise

- AG Rohstoffe, Rohstoffe der digitalen Zukunft: Zeit für ein sozial-ökologisches Upgrade, 2017, [https://www.global2000.at/sites/global/files/Rohstoffe\\_Digitale\\_Zukunft\\_0.pdf](https://www.global2000.at/sites/global/files/Rohstoffe_Digitale_Zukunft_0.pdf).
- Aghaei, J., Alizadeh, M.-I., "Demand response in smart electricity grids equipped with renewable energy sources: A review", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2013, 18, S. 64-72, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112005205>.
- Aliefendic, H., Beiglböck, S., Dulle, H., Koscher, R., Kropiunigg, L., Philipp, S., Pospischil, W., Scharnreiter, W., Schuh, B., Stanzer, G., "INSPIRED Regions: Beitrag von intelligenten Stromnetzen zur Stärkung der wirtschaftlichen Entwicklung ländlicher Regionen", Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, NACHHALTIGwirtschaften, 2014.
- Arushanyan, Y., Ekener-Petersen, E., Finnveden, G., "Lessons learned – Review of LCAs for ICT products and services", *Computers in Industry*, 2014, 65(2), S. 211-234, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361513002133>.
- Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann, P., *The Global E-waste Monitor – 2017*, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn–Genf–Wien, 2018.
- Bates, O., Lord, C., Knowles, B., Friday, A., Clear, A., Hazas, M., Exploring (un)sustainable growth of digital technologies in the home, *Proceedings of the Third International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*, Atlantis Press, 2015, <http://eprints.lanccs.ac.uk/77891/>.
- Bell, G., "Bell's Law for the Birth and Death of Computer Classes", *Communications of the ACM*, 2008, 51(1), S. 86-94, <http://doi.acm.org/10.1145/1327452.1327453>.
- Berkhout, F., Hertin, J., "De-materialising and re-materialising: digital technologies and the environment", *Futures*, 2004, 36(8), S. 903-920, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016328704000047>.
- Bigerna, S., Bollino, C. A., Micheli, S., "Socio-economic acceptability for smart grid development – a comprehensive review", *Journal of Cleaner Production*, 2016, 131, S. 399-409, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616304656>.
- Binswanger, M., "Technological progress and sustainable development: what about the rebound effect?", *Ecological Economics*, 2001, 36(1), S. 119-132, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800900002147>.
- Bliem, M., Friedl, B., Aigner, M., Schmutzger, E., Haber, A., Bitzan, G., "Smart Grids und volkswirtschaftliche Effekte: Gesamtwirtschaftliche Bewertung von Smart-Grids-Lösungen (ECONGRID)", Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, NACHHALTIGwirtschaften, 2014.
- Börjesson Rivera, M., Hökansson, C., Svenfelt, Å., Finnveden, G., "Including second order effects in environmental assessments of ICT", *Environmental Modelling & Software*, 2014, 56, S. 105-115, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815214000565>.
- Buchert, M., Schüler, D., Bleher, D., *Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential*, United Nations Environment Programme und United Nations University, Berlin, 2009.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI), *Protection Profile for the Gateway of a Smart Metering System*, Bonn, 2014, [https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/DigitaleGesellschaft/SmartMeter/uebersichtSP-TR/uebersicht\\_node.html](https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/DigitaleGesellschaft/SmartMeter/uebersichtSP-TR/uebersicht_node.html).
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), *Ressourceneffizienz Aktionsplan (REAP) – Wegweiser zur Schonung natürlicher Ressourcen. Sektion II: Nachhaltigkeit und ländlicher Raum*, Wien, 2012.
- Chien, A. A., Karamcheti, V., "Moore's Law: The First Ending and a New Beginning", *Computer*, 2013, 46(12), S. 48-53.
- Davis, A. L., Krishnamurti, T., Fischhoff, B., Bruine de Bruin, W., "Setting a standard for electricity pilot studies", *Energy Policy*, 2013, 62, S. 401-409, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513007362>.
- Deng, L., Babbitt, C. W., Williams, E. D., "Economic-balance hybrid LCA extended with uncertainty analysis: case study of a laptop computer", *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(11), S. 1198-1206, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652611000801>.
- EPRI, *The Green Grid – Energy Savings and Carbon Emissions Reductions Enabled by a Smart Grid*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 2008.
- Erdmann, L., Hilty, L. M., "Scenario Analysis – Exploring the Macroeconomic Impacts of Information and Communication Technologies on Greenhouse Gas Emissions", *Journal of Industrial Ecology*, 2010, 14(5), S. 826-843, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1530-9290.2010.00277.x/abstract>.
- Europäische Kommission, *Smart Grids: from innovation to deployment*, Communication Paper, Brüssel, 2011.
- Europäische Kommission, *On the review of the list of critical raw materials for the EU and the implementation of the Raw Materials Initiative*, Communication Paper, Brüssel, 2014.

- Europäische Kommission, Clean Energy For All Europeans, Communication Paper, Brüssel, 2016.
- Girod, B., de Haan, P., Scholz, R. W., "Consumption-as-usual instead of ceteris paribus assumption for demand", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2011, 16(1), S. 3-11, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-010-0240-z>.
- Gordon, R. B., Bertram, M., Graedel, T. E., "Metal stocks and sustainability", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(5), S. 1209-1214, <http://www.pnas.org/content/103/5/1209>.
- Gossart, C., "Rebound Effects and ICT: A Review of the Literature", in Hilty, L. M., Aebischer, B. (Hrsg.), *ICT Innovations for Sustainability*, Springer, Cham, 2015, S. 435-448, [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-09228-7\\_26](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-09228-7_26).
- Greening, L. A., Greene, D. L., Difiglio, C., "Energy efficiency and consumption – the rebound effect. A survey", *Energy Policy*, 2000, 28(6), S. 389-401, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142150000215>.
- Heinonen, S., Jokinen, P., Kaivo-oja, J., "The ecological transparency of the information society", *Futures*, 2001, 33(3), S. 319-337, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001632870000732>.
- Hernando-Gil, I., Ilie, I. S., Djokic, S. Z., "Reliability performance of smart grids with demand-side management and distributed generation/storage technologies", 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Berlin, 2012, S. 1-8.
- Hledik, R., "How Green Is the Smart Grid?", *The Electricity Journal*, 2009, 22(3), S. 29-41, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040619009000608>.
- Horner, N. C., Shehabi, A., Azevedo, I. L., "Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology", *Environmental Research Letters*, 2016, 11(10), <http://stacks.iop.org/1748-9326/11/i=10/a=103001>.
- Izatt, R. M., Izatt, S. R., Bruening, R. L., Izatt, N. E., Moyer, B. A., "Challenges to achievement of metal sustainability in our high-tech society", *Chemical Society Reviews*, 2014, 43(8), S. 2451-2475, <http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2014/cs/c3cs60440c>.
- Jevons, W. S., *The Coal Question – An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal-Mines*, 2. Auflage, Macmillan and Co., London, 1866, <http://www.econlib.org/library/YPDBooks/Jevons/jvnCQCover.html>.
- Khazzoom, J. D., "Economic Implications of Mandated Efficiency in Standards for Household Appliances", *The Energy Journal*, 1980, 1(4), S. 21-40, <http://www.jstor.org/stable/41321476>.
- Kollmann, A., Moser, S., *Smart Metering im Kontext von Smart Grids*, NACHHALTIGWirtschaften, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2016.
- Komninos, N., Philippou, E., Pitsillides, A., "Survey in Smart Grid and Smart Home Security: Issues, Challenges and Countermeasures", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(4), S. 1933-1954.
- Koomey, J. G., Matthews, S. H., Williams, E., "Smart Everything: Will Intelligent Systems Reduce Resource Use?", *Annual Review of Environment Resources*, 2013, 38(1), S. 311-343, <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-environ-021512-110549>.
- Köppl, A., Kettner-Marx, C., Schleicher, St., Hofer, Ch., Köberl, K., Schneider, J., Schindler, I., Krutzler, T., Gallauner, T., Bachner, G., Schinko, T., Steininger, K. W., Jonas, M., Zebrowski, P., *ClimTrans2050 – Modelling Low Energy and Low Carbon Transformations*. The ClimTrans2050 Research Plan, WIFO, Umweltbundesamt, Universität Graz, Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Internationales Institut für Angewandte Systemanalyse, Wien, 2016, <https://www.wifo.ac.at/wwg/pubid/58890>.
- Kostyk, T., Herkert, J., "Societal implications of the emerging smart grid", *Communications of the ACM*, 2012, 55(11), S. 34, <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2366316.2366328>.
- Küblböck, K., "Internationale Rohstoffpolitik: vom Rohstoffimperialismus zur globalen Ressourcenfairness?", in ÖFSE (Hrsg.), *Rohstoffe und Entwicklung*, Wien, 2015.
- Lehmann, R. J., Reiche, R., Schiefer, G., "Future internet and the agri-food sector: State-of-the-art in literature and research", *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 89, S. 158-174, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016816991200227X>.
- Li, J., Zeng, X., Chen, M., Ogunseitan, O. A., Stevels, A., "Control-Alt-Delete: Booting Solutions for the E-Waste Problem", *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(12), S. 7095-7108, <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.5b00449>.
- Lund, P., Nyeng, P., Grandal, R. D., Sørensen, S. H., Bendtsen, M. F., le Ray, G., Larsen, E. M., Mastop, J., Judex, F., Leimgruber, F., Kok, K. J., et al., *EcoGrid EU – A Prototype for European Smart Grids*. Deliverable D6.7 – Overall evaluation and conclusion, Energinet, 2016.
- Mattern, F., Staake, T., Weiss, M., "ICT for Green: How Computers Can Help Us to Conserve Energy", *Proceedings of the 1st International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking*, New York, 2010, S. 1-10, <http://doi.acm.org/10.1145/1791314.1791316>.
- Mo, Y., Kim, T. H. J., Brancik, K., Dickinson, D., Lee, H., Perrig, A., Sinopoli, B., "Cyber-Physical Security of a Smart Grid Infrastructure", *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(1), S. 195-209.
- Moore, G. E., "Cramming more components onto integrated circuits", *Electronics*, 1965, 38(8), S. 114-117.
- Naus, J., Spaargaren, G., van Vliet, B. J. M., van der Horst, H. M., "Smart grids, information flows and emerging domestic energy practices", *Energy Policy*, 2014, 68, S. 436-446, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421514000755>.
- Palensky, P., Kupzog, F., "Smart Grids", *Annual Review of Environment and Resources*, 2013, 38(1), S. 201-226, <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-environ-031312-102947>.

- Plepys, A., "The grey side of ICT", *Environmental Impact Assessment Review*, 2002, 22(5), S. 509-523, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925502000252>.
- Pratt, R. G., Kintner-Meyer, M. C. W., Balducci, P. J., Sanquist, T. F., Gerkenmeyer, C., Schneider, K. P., Katipamula, S., Secrest, T. J., *The Smart Grid: An Estimation of the Energy and CO2 Benefits*, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, 2010.
- PWC, Studie zur Analyse der Kosten-Nutzen einer österreichweiten Einführung von Smart Metering, PriceWaterhouseCoopers Österreich, 2010, <https://www.e-control.at/documents/20903/-/cf11cc28-2826-4bf8-95e1-59ba8c75dac3>.
- PWC, Blockchain – an opportunity for energy producers and consumers?, PriceWaterhouseCoopers, Düsseldorf, 2016.
- Röpke, I., Christensen, T. H., "Energy impacts of ICT – Insights from an everyday life perspective", *Telematics and Informatics*, 2012, 29(4), S. 348-361, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736585312000184>.
- Röpke, I., Haunstrup Christensen, T., Ole Jensen, J., "Information and communication technologies – A new round of household electrification", *Energy Policy*, 2010, 38(4), S. 1764-1773, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421509009021>.
- Santarius, T., "Der Rebound-Effekt: ein blinder Fleck der sozial-ökologischen Gesellschaftstransformation", *GAIA – Ecological Perspectives for Science and Society*, 2014, 23(2), S. 109-117.
- Siano, P., "Demand response and smart grids-A survey", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 30, S. 461-478, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113007211>.
- Sorrell, S., "Jevons' Paradox revisited: The evidence for backfire from improved energy efficiency", *Energy Policy*, 2009, 37(4), S. 1456-1469, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421508007428>.
- Sorrell, S., Dimitropoulos, J., "The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions", *Ecological Economics*, 2008, 65(3), S. 636-649, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800907004405>.
- Statistik Austria, Nutzenergieanalyse (NEA) – EEV 1993 bis 2015 nach ET und Nutzenergiekategorien für Österreich, Wien, 2017.
- Sui, D. Z., Rejeski, D. W., "Environmental Impacts of the Emerging Digital Economy: The E-for-Environment E-Commerce?", *Environmental Management*, 2002, 29(2), S. 155-163, <https://link.springer.com/article/10.1007/s00267-001-0027-X>.
- Technologieplattform Smart Grids Austria, Technologieroadmap Smart Grids Austria, Wien, 2015.
- Thiesen, J., Christensen, T. S., Kristensen, T. G., Andersen, R. D., Brunoe, B., Gregersen, T. K., Thrane, M., Weidema, B. P., "Rebound effects of price differences", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 13(2), S. 104, <https://link.springer.com/article/10.1065/lca2006.12.297>.
- Thomas, B. A., Azevedo, I. L. (2013A), "Estimating direct and indirect rebound effects for U.S. households with input-output analysis. Part 1: Theoretical framework", *Ecological Economics*, 2013, 86, S. 199-210, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800912004764>.
- Thomas, B. A., Azevedo, I. L. (2013B), "Estimating direct and indirect rebound effects for U.S. households with input-output analysis. Part 2: Simulation", *Ecological Economics*, 2013, 86, S. 188-198, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800912004715>.
- Timpe, C., *Smart Domestic Appliances Supporting The System Integration of Renewable Energy*, Smart-A und Intelligent Energy Europe, Freiburg, 2009.
- Tsydenova, O., Bengtsson, M., "Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment", *Waste Management*, 2011, 31(1), S. 45-58, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X10004393>.
- van den Bergh, J. C. J. M., "Energy Conservation More Effective With Rebound Policy", *Environmental and Resource Economics*, 2011, 48(1), S. 43-58, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10640-010-9396-z>.
- Van Heddeghem, W., Lambert, S., Lannoo, B., Colle, D., Pickavet, M., Demeester, P., "Trends in worldwide ICT electricity consumption from 2007 to 2012", *Computer Communications*, 2014, 50, S. 64-76, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366414000619>.
- Waldrop, M. M., "The chips are down for Moore's law", *Nature*, 2016, 530(7589), S. 144-147, <http://www.nature.com/news/the-chips-are-down-for-moore-s-law-1.19338>.
- Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M., Böni, H., "Global perspectives on e-waste", *Environmental Impact Assessment Review*, 2005, 25(5), S. 436-458, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925505000466>.
- Williams, E., "Environmental effects of information and communications technologies", *Nature*, 2011, 479(7373), S. 354-358.
- Wolsink, M., "The research agenda on social acceptance of distributed generation in smart grids: Renewable as common pool resources", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(1), S. 822-835, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111004564>.