

Working Paper Sustainability and Innovation
No. S 12/2017



Nele Friedrichsen

Kurzstudie – Potenziale der Digitalisierung
für den Klimaschutz

Diese Kurzstudie ist im Rahmen des Projektes „Wissenschaftliche Analysen zu aktuellen klimapolitischen Fragen“, gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, entstanden.

Fragestellung

Hintergrund/Problemstellung

Der „Megatrend“ Digitalisierung bietet erhebliche Potenziale für die Reduktion von Transaktionskosten in wirtschaftlichen, sozialen und kommunikativen Prozessen und Diensten. Zudem erhöht sich die Anzahl der möglichen Organisationsstrukturen durch die ubiquitäre Verfügbarkeit von Daten und Technologien; neue Wissensfelder und Zusammenhänge werden erschlossen (Big Data, ...). Diese Möglichkeit der Verknüpfung von Daten in Echtzeit, die Verschlinkung von Prozessen und die Unmittelbarkeit des Datenaustauschs kann auch für den Klimaschutz im Rahmen der Energiewende nutzbar gemacht werden. Die Etablierung von intelligenten Messsystemen (Smart Meter) und damit einhergehende Transparenz und Steuerungsmöglichkeiten, die stärkere Synchronisation von Verbrauch und Erzeugung vor allem bei industriellen Stromnutzern oder die intelligente Verknüpfung von Sektoren können sich sehr positiv auf eine effiziente Nutzung von Energie und damit auf den Klimaschutz auswirken.

Durch die Digitalisierung sind weitere positive Effekte für den Klimaschutz in den Bereichen Energiemanagement, Flexible Lastensteuerung, Sektorenkopplung, Netzausbau und -steuerung zu erwarten. Ein systematischer Überblick über die möglichen Potenziale der Digitalisierung für Klimaschutz, Ressourcen- und Energieeinsparung und die konkreten Handlungsfelder fehlt jedoch. Auf Basis einer solchen Grundlage kann weitergehender Bedarf angewandter Klimaschutzforschung beurteilt und ggf. bearbeitet werden.

Aufgabenstellung/Forschungsfragen

Aufbereitung Forschungsstand

Identifizierung und Systematisierung der verschiedenen klimaschutzrelevanten Bereiche und Aspekte der Digitalisierung.

Abschätzung der Potenziale der einzelnen Bereiche und Aspekte für den Klimaschutz (auf der Grundlage bestehender Forschungsergebnisse).

Empfehlungen hinsichtlich geeigneter Aspekte/Potenziale, die in einer größeren Forschungsarbeit aufgegriffen werden sollten.

Inhalt

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung..... | 1 |
| 1.1 | Systematisierung der Effekte | 2 |
| 1.2 | Systematisierung relevanter Bereiche..... | 4 |
| 1.3 | Forschungsstand..... | 6 |
| 2 | Potenziale für den Klimaschutz | 8 |
| 2.1 | Direkte Effekte der IKT | 10 |
| 2.2 | Smart Buildings | 11 |
| 2.3 | Smart Logistics..... | 11 |
| 2.4 | Smart Grid..... | 13 |
| 2.5 | Smart Motors/Smart Manufacturing..... | 14 |
| 2.6 | Dematerialisierung von Produkten und Dienstleistungen..... | 15 |
| 3 | Schlussfolgerungen..... | 15 |
| 4 | Literaturverzeichnis | 18 |
| 4.1 | Zitierte Studien | 18 |
| 4.2 | Weitere Literatur..... | 20 |

1 Einleitung

Unter dem Stichwort Green IT/ICT wird bereits länger die umweltfreundlichere Gestaltung und Energieeffizienz des IKT-Sektors thematisiert. Darüber hinaus hat die Digitalisierung zahlreiche Effekte in anderen Sektoren und das Potenzial, Veränderungen in Wirtschaft und Gesellschaft zu fördern oder erst zu ermöglichen. In vielen Fällen besteht das Potenzial für Effizienzsteigerungen in Einsparungen im Ressourcen- und Energieverbrauch und damit einhergehend Minderungen der Treibhausgasemissionen. Es gibt jedoch auch gegenläufige Effekte. Solche negativen Effekte entstehen bei der Produktion, Nutzung von IKT-Produkten und digitalen Diensten sowie bei der Entsorgung der Geräte.

Auf der G20-Konferenz „Digital Economy“ diskutierten Minister der G20 darüber, wie der potenzielle Beitrag der Digitalisierung maximiert werden kann. Die „digital economy“ wird als wichtiger Treiber ökonomischen Wachstums und steigender Produktivität in bestehenden Industrien anerkannt. Gleichzeitig sieht man das Potenzial der Schaffung neuer Märkte und Industrien sowie einen Beitrag zur Erreichung der Sustainable Development Goals der UN 2030-Agenda zu leisten (Ministererklärung deutsch). Weitere Details zu Umwelt-, Nachhaltigkeits- oder Klimaaspekten der Digitalisierung enthält das Dokument nicht.

Das Grünbuch Energieeffizienz des BMWi greift Digitalisierung als wichtigen Trend auf und diskutiert Herausforderungen und Chancen des Einsatzes digitaler Technologien für die Steuerung von Energieverbrauch und -erzeugung ebenso wie Auswirkungen „digitaler Geschäftsmodelle“ auf den Energiemarkt und die Energieeffizienzpolitik.

Im April veröffentlichte das UBA eine Ausschreibung im Rahmen des UFOPLAN, in der die Digitalisierung in Bezug auf umweltrelevante Aspekte näher untersucht werden soll. (Digitalisierung ökologisch nachhaltig nutzbar machen. UFOPLAN 3717 14 102 0).

Es gibt einige Untersuchungen, die sich mit Digitalisierung beschäftigen und dabei auch Potenziale für den Klimaschutz thematisieren. Dieses Papier soll einen Überblick über den Forschungsstand geben und es ermöglichen, Aspekte zu identifizieren, bei denen weiterer Forschungsbedarf besteht.

1.1 Systematisierung der Effekte

In der Analyse der Effekte der Digitalisierung sollten mehrere Ebenen unterschieden werden. In bisherigen Studien zur Wirkung von IKT wurden dazu verschiedene Konzepte bzw. Taxonomien verwendet.

Ein solcher Rahmen sollte es ermöglichen, systematisch sowohl die positiven (IKT als Teil der Lösung) als auch die negativen Effekte der IKT (IKT als Teil des Problems) zu untersuchen. Zu den negativen Effekten zählt beispielsweise der erhöhte Stromverbrauch durch die höhere Zahl an Geräten, die häufig (noch) nicht effizient sind. Der dabei relevante „network-standby“ von vernetzten Geräten ist Thema in IEA 2014.

Eine relativ häufig verwendete Unterscheidung differenziert dabei drei Ebenen (oder auch Effekte erster, zweiter und dritter Ordnung):

1. Auf der Technologieebene, entstehen direkte Effekte der IKT oder auch Lebenszykluseffekte durch Produktion, Nutzung und Entsorgung (i.d.R. negativ).
2. Die Technologie ermöglicht Anwendungen, wodurch auf der zweiten Ebene indirekte Effekte und Nutzenwirkungen der IKT entstehen, bspw. Ersatz von Material durch virtuelle Produkte oder Systemoptimierung.
3. Auf einer dritten Ebene, dem Makro-Level, kommt es zu systemischen, sozio-ökonomischen Effekten wie bspw. Verhaltensänderungen (inkl. Rebound) und Strukturwandel.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über verschiedene Taxonomien und Beispiele für die damit erfassten Effekte basierend auf Horner et al. (2016).

Eine Erläuterung der unterschiedlichen Effekte inklusive Beispielen kann Börjesson Rivera et al. (2014) entnommen werden, die unter anderem auch die verschiedenen Reboundeffekte am Beispiel e-commerce systematisieren.

Tabelle 1 Taxonomien energetischer Effekte von IKT (eigene Darstellung modifiziert nach Horner et al. 2016)

| Betrachtungsebene | Bezeichnung | Effekt | Scope | Beispiel GPS |
|---|---|--|---|--|
| (Berkhout & Hertin 2004, Hilty et al. 2006) | (Williams 2011) | (Horner et al. 2016) | | |
| Direkte Effekte/ Effekte 1. Ordnung | IKT-Infrastruktur und Geräte | Herstellung/ gebundene Energie | Direkt | Herstellungsenergie für eines GPS-Geräts |
| | | Betrieb | | Betriebsenergie für ein GPS-Gerät |
| | | Entsorgung | | Energie zur Entsorgung eines GPS-Geräts |
| Indirekte Effekte/ Effekte 2. Ordnung | Anwendungen | Effizienz | indirekt: Einzelprodukt/ dienstleistung | effizienterer Verkehrsfluss durch GPS unterstützte Routenplanung |
| | | Ersatz | | Ersatz von Papierkarten |
| Verhaltensänderungen und Strukturwandel/ Effekte 3. Ordnung | Wirtschaftswachstum und Konsummuster | direkter rebound | | |
| | | indirekter rebound | indirekt: ergänzende Dienstleistungen | Energieverbrauch für Tätigkeiten in der gesparten Zeit |
| | | wirtschaftsweiter rebound (Strukturwandel) | indirekt: gesamte Wirtschaft | GPS ermöglicht autonomes Fahren und Zuwachs bei Herstellern intelligenter Transportsysteme |
| | Sozioökonomische Effekte | systemische Transformation | Indirekt: gesamte Gesellschaft | autonome Fahrzeuge beeinflussen die Wahl von Arbeits- und Wohnort |

1.2 Systematisierung relevanter Bereiche

Verschiedene Studien haben unterschiedliche Aspekte der Wirkung von IKT oder Digitalisierung in den Blick genommen. In diesen spielt unter anderem der direkte Energie- und Ressourcenverbrauch der IKT-Wirtschaft eine Rolle. Durch eine Verbesserung der Geräteenergieeffizienz sowie eine verbesserte Effizienz der Rechenzentren und Telekommunikationsnetze kann die IKT-Industrie hier einen direkten Beitrag zum Klimaschutz leisten. Unter dem Schlagwort Green ICT wird dieses Thema bereits umfangreich adressiert.

Darüber hinaus hat die Digitalisierung zahlreiche indirekte Effekte beziehungsweise ermöglicht Emissionsminderungen (oder Steigerungen) in verschiedenen Anwendungsbereichen. In das Feld Digitalisierung fallen dabei insbesondere auch intelligente Netze, also „Infrastrukturen [...], die durch moderne Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) neue Eigenschaften und innovative, übergreifende Anwendungsmöglichkeiten erfahren“. Dabei „spielen automatisch erzeugte Daten aus Sensoren und deren datentechnisch standardisierte Verarbeitung eine wichtige Rolle“ (vgl. BITKOM/ISI 2012).

GeSI und The Climate Group (2008) untersuchten welchen Beitrag der IKT-Sektor zu zentralen Nachhaltigkeitsaspekten leisten kann. Sie identifizierten als mögliche Ansatzpunkte unter anderem die Entwicklung von IKT-Produkten mit Anwendungen im Klimaschutzbereich sowie die Einführung von Services, die Emissionen mindern, wie z.B. flexi-working und Telekonferenzen oder E-Commerce.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über verschiedene Themenfelder der Digitalisierung die für den Klimaschutz relevant sind.

Tabelle 2: Überblick über IKT-Lösungen/Anwendungsfelder mit Klimaschutzrelevanz

| Themenfeld | Chancen für Emissionsminderungen |
|--|--|
| Green ICT | Effizienzsteigerungen und neue Technologien im IKT-Sektor |
| intelligente Verkehrssysteme, autonomes Fahren, Smart logistics | Verbesserung des Verkehrsflusses durch Vernetzung der Fahrzeuge (auch mit der Verkehrsinfrastruktur) reduziert Brennstoff Optimierung der Fahrzeugeffizienz/des Fahrverhaltens Optimierte Routenführung Transportkettenoptimierung/Erhöhung der Auslastung neue Mobilitätsangebote/intelligente intermodale Kombination/ Umstieg auf CO ₂ -arme Verkehrsträger |
| intelligente Energiesysteme, Smart Grids | Energieminderverbräuche durch effizienteres Strommanagement (intelligente Netzsteuerung sowie flexible Lastverschiebungen) Einsparung von Netzausbau/Infrastrukturausbau Reduzierung des Energieverbrauchs durch Smart Metering |
| Smart Buildings | Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden (Wohn- und Nichtwohngebäude) durch Gebäudeautomatisierung |
| Digitalisierung in der Produktion, Industrie 4.0, Smart Motors, Smart Ecosystems | neue Organisationsformen, intelligente Steuerung industrieller Produktionsprozesse/Optimierung von Motoren/ Pumpen reduzieren Energie- und Ressourcenverbrauch Optimierung der Energie- und Ressourcennutzung über Unternehmensgrenzen hinweg in Wertschöpfungsnetzwerken |
| Smart Products | Verlängerung der Produktlebensdauer durch intelligente, proaktive Wartung |
| Smart Services & Sharing Economy | Ressourceneinsparung durch geringere Produktion wegen geteilter Nutzung von Produkten Rückwirkungen der gemeinschaftlichen Nutzung auf Wirtschafts- und Konsumstrukturen |
| Smart Cities & Nachhaltige Stadtentwicklung | verringerte Ressourcennutzung stärkere Nutzung erneuerbarer Energien erhöhte Teilhabe und mgl. Rückwirkungen auf Verhalten/ Wirtschaftsstrukturen |
| Smart Agriculture | optimierte Bewirtschaftung (→geringerer Energiebedarf, effizienterer Düngereinsatz) und Bewässerung |
| Dematerialisierung/virtuelle Güter | Ersatz von CO ₂ -intensiven Anwendungen durch weniger CO ₂ -intensive/Verschiebung von physischen Produkten zu digitalen |
| E-Commerce/virtual mobility (teleworking, video-conferencing, e-learning) | besser Zweitnutzung durch effizientere sekundäre Märkte geringerer Flächenbedarf für Geschäfte aber auch mgl. erhöhter Verpackungsaufwand (individuell statt Massenversand) reduzierter Fahrtaufwand, dafür erhöhter Stromverbrauch für Computer und Internet |
| Umweltinformationssysteme | Werkzeug zur Hebung von Ressourceneffizienzpotenzialen mögliche Reboundeffekte |

Auch in den Bereichen Gesundheit (intelligentes Gesundheitsnetz), Bildung (E-Learning) und Behörden (E-Government und E-Participation) kommt es durch moderne IKT zu maßgeblichen Änderungen. Die Relevanz der Änderungen für den Klimaschutz ist vermutlich geringer als in den oben genannten Bereichen. Zu möglichen positiven Effekten für den Klimaschutz kann es zu Einsparung von Wegstrecken durch die verstärkte Nutzung von digitalen Dienstleistungen kommen. Dem gegenüber sind die durch verstärkte Digitalisierung ansteigenden Energieverbräuche für Serverbetrieb und netzwerkfähige Geräte zu berücksichtigen.

1.3 Forschungsstand

Es gibt einige Studien, die sich mit dem Thema IKT und möglichen Wirkungen mit Klimarelevanz beschäftigen. Die neueren Studien, die im Rahmen der Recherche für dieses Papier gefunden wurden, beschäftigen sich insbesondere mit den Chancen der Digitalisierung im Stromsektor für die Energiewende. Ein aktuelles Thema ist dabei die Blockchain und ihre Potenziale für neue Geschäftsmodelle, wie z.B. einfachere Abrechnung, sowie möglicherweise eine komplette Restrukturierung des Energiesektors durch deutlich stärkere Dezentralisierung, die durch automatisierte und dezentrale Interaktion und Abrechnung möglich würde.

Horner et al. (2016) geben einen systematischen Überblick über verschiedene Taxonomien zu den Effekten der IKT und andererseits über die Literatur zu den Effekten von vier verschiedenen IKT-Services (e-commerce, Dematerialisierung, teleworking, Monitoring & Kontrolle) in verschiedenen Sektoren, wobei u.a. aufgrund der starken Abhängigkeit der realisierten Effekte vom Nutzerverhalten große Unsicherheiten bzgl. des Nettoeinsparpotenzials der IKT konstatiert werden. Abschließend formuliert die Studie Empfehlungen für zukünftige qualitativ hochwertige Forschung zu Effekten der Digitalisierung, insbesondere die Erhebung größerer Datenmengen in sorgfältig definierten Studien und einen stärkeren Fokus darauf, das Nutzerverhalten zu verstehen.

Hilty et al. (2006) untersuchen die Effekte erster, zweiter und dritter Ordnung der IKT-Nutzung in einer vorausschauenden Simulationsstudie basierend auf einem system-dynamics Ansatz. Dabei ist zu beachten, dass 2006 die heutigen Potenziale der IKT damals noch nicht absehbar waren. Hilty et al. (2006) zeigen Potenziale für IKT-unterstütztes Energie-, insbesondere Heizwärmemanagement, sowie für einen strukturellen Wandel zu einer weniger materialintensiven Wirtschaft auf (product-to-service shift), weisen aber ebenso auf mögliche starke

Reboundeffekte im Transportsektor hin, wenn es dort zu Zeit- und Kosteneinsparungen durch die IKT-Anwendung kommt. Weiterhin identifizieren sie einen möglicherweise substantiellen Effekt von mobilem Arbeiten auf den Personentransport, da die Personen die Zeit im Verkehr so produktiv nutzen können und weisen auf weiteren Forschungsbedarf in Bezug auf den Effekt der IKT auf persönliches Zeitmanagement und Zeitnutzung hin. Auch Kramers et al. (2014) weisen in einer Arbeit zu IKT-Lösungen für einen reduzierten Energieverbrauch in Städten darauf hin, dass die Abschätzung der Einsparungen durch IKT-Lösungen schwierig ist, da IKT-Lösungen als "enabling technologies" Teil eines komplexen soziotechnischen Systems sind und weitere Faktoren über das technische Potenzial hinaus eine Rolle spielen (z.B. Rebound). Sie identifizieren intelligente Betriebsstrategien (insbesondere im Bereich Wärme in Gebäuden) sowie einen Strukturwandel im Verkehrsbereich als wichtige Handlungsfelder. Aktuell läuft im Rahmen der MKS ein Vorhaben zum autonomen Fahren, in dem auch Effekte auf die Umwelt untersucht werden (bspw. weniger Brennstoffbedarf durch weniger Bremsen und optimiertes Fahren).

Hilty & Aebischer veröffentlichten 2015 ein Buch, in dem IKT-Innovationen für Nachhaltigkeit thematisiert werden. Das Buch enthält unter anderem einen Beitrag zur Rolle von IKT für Energieeffizienz (Laitner 2015) einen zu IKT und Nachhaltigkeit als neues Forschungsfeld (Hilty & Aebischer 2015) sowie einen zur Frage der Energieintensität des Internets (Coroama et al. 2015).

Schulte et al. (2016) untersuchten auf aggregierter Ebene den Zusammenhang zwischen IKT und Energieverbrauch. Sie kommen auf Basis einer Panel-Datenanalyse über 13 Jahre, 10 OECD Länder und 27 Industrien zu dem Ergebnis, dass IKT mit einem insgesamt sinkenden Energieverbrauch einhergeht, wobei allerdings der Stromverbrauch signifikant mit IKT ansteigt.

Konkrete Emissionseinsparungen durch Digitalisierung in verschiedenen Sektoren wurden von GeSI, der Global e-Sustainability Initiative abgeschätzt. GeSI hat seit 2008 mehrere Studien zum Potenzial der IKT für Nachhaltigkeit und Klimaschutz beauftragt und mit verschiedenen Firmen und Consultants durchgeführt. Die Studien sind von der IKT-Wirtschaft (u.a. Deutsche Telekom, Fujitsu, Microsoft) gesponsert. Die 2008 veröffentlichte erste Studie SMART2020: Enabling the Low Carbon Economy in the Information Age (global) schätzt die Emissionseinsparungen durch IKT auf 15 % im Jahre 2020.

Die Verfasser der zweiten GeSI Studie aus dem Jahr 2012 SMARTer2020: The Role of ICT in Driving a Sustainable Future schätzen das mögliche Einsparungspotenzial durch IKT auf 16,5 % im Jahr 2020 (entsprechend insgesamt 9,1 Gt CO₂eq.).

Im dritten Bericht 2015 #SMARTer2030 ICT Solutions for 21st Century Challenges werden die möglichen Einsparungen auf 12,1 Gt CO₂eq. bis 2030 geschätzt. Die direkten Emissionen der IKT werden dabei als sinkend angenommen.

Die Europäische Kommission hat 2008 eine Mitteilung zur Verbesserung der Energieeffizienz durch Informations- und Kommunikationstechnologien veröffentlicht (Europäische Kommission 2008b), in der Potenziale von IKT für Energieeinsparungen bzw. Effizienzsteigerungen diskutiert werden. Im Folgeprozess der Mitteilung fand ein Konsultationsprozess statt und es wurde ein Bericht einer Ad-hoc-Arbeitsgruppe zum Thema IKT für Energieeffizienz veröffentlicht (Europäische Kommission 2008a). Der Bericht untersucht mögliche Reduktionen durch IKT in drei Feldern:

- a) eigener Fußabdruck der IKT
- b) Prozessverbesserung und Änderungen in anderen Sektoren
- c) struktureller Wandel durch Innovation und Verhaltensänderungen

Der Bericht diskutiert die Anwendungsfelder Smart Grids, Beleuchtung, produzierendes Gewerbe, Gebäude und eine gesellschaftliche Transformation zu einer energieeffizienten Gesellschaft. Die Arbeitsgruppe empfiehlt u.a. large-scale pilots und living labs, um den Fußabdruck von IKT und die Einsparwirkungen zu erheben.

2009 hat BCG für GeSI die Emissionsreduktionspotenziale durch IKT für Deutschland untersucht. Die Potenziale werden im nächsten Abschnitt dargestellt.

2 Potenziale für den Klimaschutz

Es wurde eine Studie der Global e-Sustainability Initiative gefunden, die Potenziale zur CO₂-Emissionsreduktion in Deutschland in verschiedenen Bereichen abschätzt. Diese Studie ist wie oben bereits erwähnt von der IKT-Wirtschaft gesponsert und daher nicht als unabhängig einzuschätzen. Unabhängige Studien mit konkreten Potenzialen konnten im Rahmen dieser Kurzanfrage nicht identifiziert werden. Die Abschätzung von Einsparpotenzialen hängt von zahlreichen

Faktoren ab und ist mit Unsicherheiten verbunden (Horner et al. 2016). Daher sind die Ergebnisse mit Vorsicht zu interpretieren.

Die GeSI/BCG-Studie „Smart 2020 Studie Addendum für Deutschland“ beziffert das CO₂-Einsparpotenzial durch intelligente Lösungen in den folgenden Bereichen (siehe auch Abbildung 1):

- Smart Logistics/Logistik
- Smart Buildings/Gebäudewirtschaft
- Smart Grid/Stromwirtschaft
- Smart Motors/Industrieautomatisierung
- Dematerialisierung

Die Verfasser unterteilen die Potenziale in marktgetriebene Potenziale und theoretische Potenziale. Um über das marktgetriebene Potenzial hinaus das vollständige theoretische Potenzial auszuschöpfen, sind adäquate Rahmenbedingungen notwendig. Die Potenziale werden als Bruttonpotenziale angegeben, d.h. die Erhöhung der Emissionen durch den vermehrten IKT-Einsatz wurde nicht berücksichtigt. Im Folgenden werden daher zunächst auch die direkten Effekte, wie in den GeSi-Studien abgeschätzt, dargestellt. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die Abschätzungen.

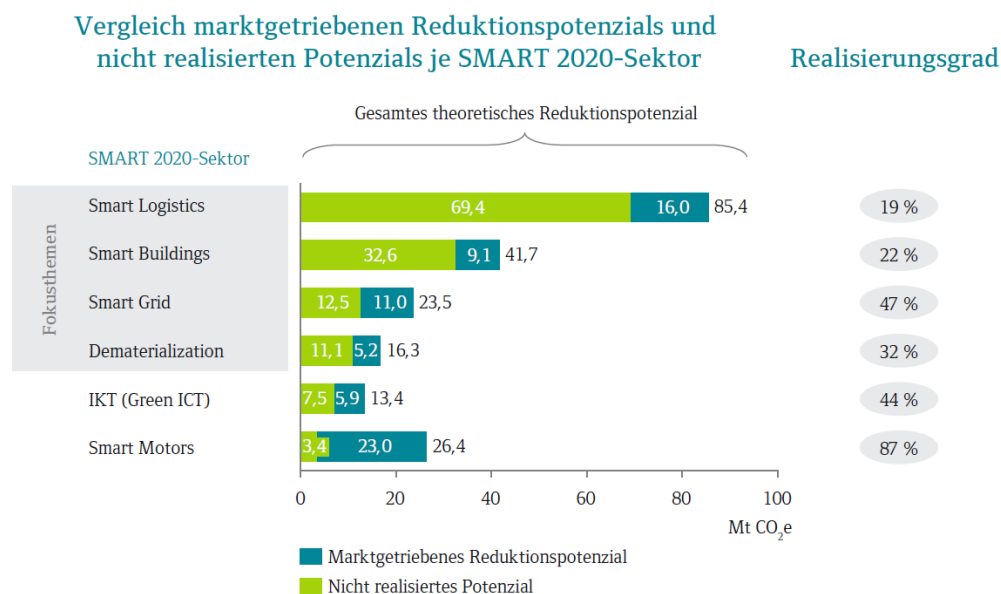


Abbildung 1 Emissionsreduktionspotenziale für Deutschland (GeSI/BCG 2009)

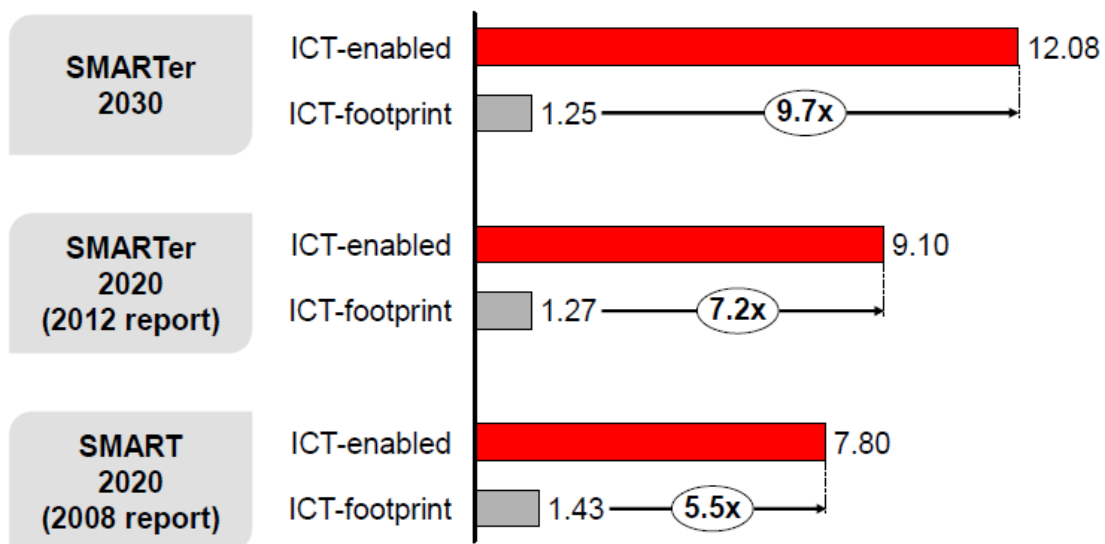
Quelle: GeSI/BCG (2009) Abbildung 27

2.1 Direkte Effekte der IKT

Die direkten Effekte der IKT wurden bereits in zahlreichen Studien untersucht. Es gab auch einen Förderschwerpunkt zu „Green IT“. Dieser Aspekt wird in diesem Überblick nicht näher aufgegriffen. Es sei lediglich auf die Inhalte der GeSI-Studien zu diesem Aspekt hingewiesen, da diese später auch zu den indirekten Effekten ausgewertet werden.

Die erste GeSI-Studie (2008) prognostizierte einen Anstieg der IKT-Emissionen auf 1,43 Gt CO₂eq. im Jahr 2020 (2,7 % der weltweiten Emissionen). GeSI 2012 erwartete einen etwas geringeren Anstieg der IKT-Emissionen auf 1,27 Gt CO₂eq. im Jahr 2020 (2,3 % der globalen Emissionen). Die neueste GeSI-Studie (2015) prognostiziert einen möglichen Rückgang des Anteils der IKT-Emissionen auf 1,97 % im Jahr 2013 bzw. 1,25 Gt CO₂eq. weltweit (siehe auch Abbildung 2).

Figure 2: ICT benefits factor in 2020 and 2030 (Gt CO_{2e})



Source: Source: WRI, IPCC, GeSI, SMARTer2020, Accenture analysis & CO₂ models

Abbildung 2: Direkte Effekte und ermöglichte Einsparungen durch IKT aus GeSI 2015

Quelle: GeSI 2015, Abbildung 2

Für Deutschland werden die direkten Emissionen des IKT-Sektors im Jahr 2007 mit 22,6 Mt CO₂eq. (etwa 2 % der gesamten Emissionen) angegeben. Bis 2020 wird im BAU-Szenario ein Anstieg auf 25,5 Mt CO₂eq. prognostiziert. Im Green-ICT-Szenario werden Minderungen von 13,4 Mt CO₂eq. ggü. dem BAU abgeschätzt, so dass die prognostizierten Emissionen 2020 nur noch etwa 12 Mt CO₂eq. beträgt.

2.2 Smart Buildings

Auf den Gebäudesektor entfällt etwa ein Drittel der Emissionen. In diesem Anteil sind sowohl direkte Emissionen als auch indirekte (aus der Erzeugung von Strom und Fernwärme) eingerechnet. Die Aufteilung der Emissionen war 2007: 44 % im GHD-Sektor und 56 % bei den privaten Haushalten. Raumwärme hat den größten Anteil am Energieverbrauch sowohl in den privaten Haushalten mit ca. 75 % als auch bei den Gebäuden im GHD-Sektor mit ca. 55 % (GeSI/BCG 2009). Einsparungen in diesem Bereich haben eine gute Hebelwirkung.

Horner et al. (2016) geben ein Einsparpotenzial von 7-23 % durch Gebäudeenergiemanagementsysteme an. GeSI/BCG 2009 zitieren Erfolgsbeispiele mit Einsparungen durch Gebäude-Klimamanagementsysteme mit bis zu 77 %, gehen aber auf Basis von einer EU-Studie von 15 % Energieeinsparung in Haushalten und 20 % im GHD-Sektor durch Gebäude-Klimamanagementsysteme aus.

GeSi/BCG (2009) beziffern das theoretischen Einsparpotenzial durch intelligente Lösungen im Gebäudesektor auf bis zu 41,8 Mt CO₂eq. im Jahr 2020 (ggü. BAU). Davon werden 9,1 Mt CO₂eq. als marktgetriebenes Potenzial ausgewiesen. Das größte theoretische Potenzial wird Gebäude-Klimamanagementsystemen mit 34,7 Mt CO₂eq. zugeschrieben. Erst mit weitem Abstand folgt intelligentes An-/Abschalten von Geräten mit 3,9 Mt CO₂eq. Beiden Geschäftskonzepten wird eine überwiegend hohe Attraktivität zugeordnet und das marktgetriebene Potenzial mit 7,13 bzw. 1,17 Mt CO₂eq. für die genannten zwei Konzepte angegeben. Als Grund für die große Lücke zwischen marktgetriebenem und theoretischen Potenzial werden im Wesentlichen fehlende Standards für IKT-Geräte, ein unübersichtliches Angebot und mangelnde Information der Privatanutzer angegeben (GeSI/BCG 2009).

2.3 Smart Logistics

GeSI/BCG (2009) verstehen unter Smart Logistics alle IKT getriebenen Maßnahmen, die den Verkehr durch Verknüpfung von modernen Kommunikationsnetzen und intelligenten Mess- und Steuerungstechniken optimieren und reduzieren können. Der Verkehrssektor verursacht fast 20 % der Emissionen in Deutschland. Der Straßenverkehr trägt davon einen sehr hohen Anteil und bietet somit potenziell einen guten Ansatzpunkt für Minderungen.

Horner et al. (2016) weisen auf Basis weiterer Studien möglich Brennstoffeinsparungen von 10 % durch optimierte Routenführung aus. Zusätzliche Einsparungen von 1-4 % für sind möglich, wenn die Streckeninformationen zur Steuerung des

Triebstrangs genutzt werden. Für einen Überblick zu den Auswirkungen auf den Energieverbrauch von Fahrzeugautomatisierung wird auf Brown et al (2014) verwiesen. Langer and Vaidyanathan (2014) untersuchten Optionen, um den Energieverbrauch im Gütertransport durch den IKT-Einsatz zu verringern.

GeSI/BCG (2009) weisen ein theoretisches Reduktionspotenzial von bis zu 85,4 Mt CO₂eq. bspw. durch intelligente Steuerung des Verkehrsflusses und die breite Einführung einer IKT gestützten **Städtemaut** aus. Stockholm und London werden als positive Beispiele für die Effekte einer City-Maut aufgeführt. In Stockholm ging das Verkehrsvolumen zurück und mehr Leute nutzten den ÖPNV; die Treibhausgase in der Innenstadt sanken um 40 %. In London sanken die Emissionen im Stadtbereich um 20 % und die Zahl der Autos, die in das Mautgebiet fahren, reduzierte sich um 30 %. Die vorgeschlagene IKT gestützte Städtemaut würde Fahrzeuge, die ohne Mautzahlung in die Stadt fahren und deren Emissionen über einem Schwellenwert liegen, mit einer Strafzahlung belegen. Die Umsetzung und Kontrolle einer solchen Maut wäre ohne IKT vermutlich nicht wirtschaftlich darstellbar. Für Deutschland schätzt GeSI/BCG (2009) das theoretische Potenzial zur Emissionsminderung durch die Einführung einer Citymaut auf 19,5 Mt CO₂eq. unter der Annahme, dass die Maut in allen deutschen Städten eingeführt wird. Die Schätzung basiert auf der Annahme einer Verkehrsreduktion um 25 % und einem Anstieg der ÖPNV-Nutzung um 15 %. Unter der Annahme, dass in den **20 größten Städten in Deutschland eine entsprechende Maut** eingeführt wird, beträgt das Potenzial **4,86 Mt CO₂eq** (GeSI/BCG 2009).

Instrumenten zur **Anzeige von CO₂-Emissionen in Echtzeit** in den Fahrzeugen wird ein theoretisches Reduktionspotenzial von 9,1 Mt CO₂eq. zugeschrieben. Es fehlen allerdings konkrete Messungen/Erfahrungen zum Einsparpotenzial durch die erhöhte Transparenz. Basierend auf Ergebnissen aus verschiedenen Smart-Meter-Feldversuchen, die eine Bandbreite von 5-15 % Einsparungen ergaben, geht die Studie von 6,5 % aus. Die Rahmenbedingungen werden jedoch als schwierig eingestuft und das marktgetriebene Potenzial auf **4,86 Mt CO₂eq.** geschätzt (GeSI/BCG 2009).

Durch **intelligente Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation und Navigation** werden 20 % Emissionseinsparungen angenommen (was die Studie selbst als defensive Schätzung bezeichnet). Ausgerollt auf alle deutschen Fahrzeuge würde dies zu Einsparungen von 17,65 Mt CO₂eq. führen. Bei einer Marktdurchdringung von ca. 20 % bis 2020 läge das Potenzial bei **3,53 Mt CO₂eq.** Als Hemmnis für eine hohe Marktdurchdringung werden fehlende Standards, man-

gelnde Kompatibilität mit bereits entwickelten Komponenten ebenso wie rechtliche Hürden in Bezug auf Datenschutz und Haftung genannt. Eine optimierte Verkehrsflusssteuerung könnte auch durch Installation der Technologien in die **Verkehrsinfrastruktur** erreicht werden. Das theoretische Potenzial wird hier auf 14 Mt CO₂eq. geschätzt, aufgrund sehr hoher Kosten des entsprechenden Ausbaus wird das marktgetriebene Potenzial auf **2,8 Mt CO₂eq.** geschätzt (GeSI/BCG 2009).

GeSI/BCG weist allerdings auf hohe gesellschaftliche Barrieren im Verkehrssektor hin: Eingriffe in das gewohnte Fahrverhalten, Zusatzkosten (Maut) oder Beschränkungen (Geschwindigkeit, Überwachung des Fahrverhaltens) haben voraussichtlich eine geringe Akzeptanz. Auch Datenschutzbestimmungen könnten einigen Aspekten entgegenstehen (bspw. personenbezogene Daten zu Verbrauch, Fahrweise, Fahrtstrecken, -uhrzeiten). Hilty et al. (2006) weisen auf mögliche Reboundeffekte durch optimierte Verkehrsflüsse und dadurch reduzierte Staukosten hin.

2.4 Smart Grid

Die Bruttostromerzeugung ist in Deutschland mit etwa 40 % der gesamten Emissionen verbunden. GeSI/BCG (2009) beziffert mögliche Einsparungen durch Last- und Kapazitätsmanagement und Energieeinsparungen auf bis zu 23,6 Mt CO₂eq. (ggü. BAU 2020) (GeSI/BCG 2009).

Advanced Smart Meters werden als technische Grundlage für Smart-Grid-Lösungen vorgestellt, da sie die Schnittstelle auf Kundenseite darstellen und auch Möglichkeiten zur Fernabschaltung bieten. Das Einsparpotenzial, das sich aus der erhöhten Transparenz für den Endkunden ergibt (Anzeige des aktuellen und historischen Verbrauchs und der Kosten) wird auf Basis von Feldversuchen auf 5 %-15 % geschätzt und in der Studie mit 6,5 % angenommen. Hochgerechnet auf alle deutschen Privathaushalte ergibt sich ein theoretisches Einsparpotenzial von 4,6 Mt CO₂eq. Bei einer Marktdurchdringung von 30 % bis 2020 liegt die Emissionsreduktion bei **1,1 Mt CO₂eq.** (ggü. BAU 2020). In GeSI (2015) wird das CO₂eq-Einsparpotenzial durch den Einbau von Smart Meters in 7,8 Mio. Haushalten in Deutschland auf 1,2 Mio. t CO₂eq. pro Jahr beziffert.

Das größte theoretische Potenzial wird mit 11 Mt CO₂eq. für **Demand-Side Management** ausgewiesen. Die Einsparungen entstehen dadurch, dass durch Lastverschiebung CO₂-ärmere Erzeugung genutzt werden kann. GeSI/BCG (2009)

nimmt dabei an, dass die Erzeugung in den Nebenzeiten 30 % niedrigere spezifische CO₂-Emissionen hat. Das marktgetriebene Potenzial liegt bei **3,2 Mt CO₂eq.**, da ein Großteil der Aktivitäten nicht wirtschaftlich ist.

Weitere Einspareffekte werden durch die **effiziente Steuerung von Großkraftwerken** ermittelt. Mit **3,2 Mt CO₂eq.** wird ein Großteil des theoretischen Potenzials von 3,9 Mt CO₂eq. als marktgetrieben ausgewiesen.

2.5 Smart Motors/Smart Manufacturing

Unter Smart Motors fasst GeSI/BCG (2009) alle Lösungen zusammen, die in der industriellen Produktion durch IKT-Einsatz die Effizienz steigern und damit neben Energieeinsparungen in der Regel auch zu Einsparungen bei anderen Ressourcen führen. Aufgrund dieser Effekte wird dieser Bereich von GeSI/BCG als wirtschaftlich attraktiv eingeschätzt und zusätzliche spezifische Anreize der Politik nicht zwangsläufig für notwendig befunden.

Horner et al. (2016) betont, dass die Einsparungen durch Industrie 4.0 schwer zu beziffern sind, da bereits heute zahlreiche IT-Anwendungen in der Produktion eingesetzt werden.

In GeSI/BCG (2009) wird das theoretische Emissionsreduktionspotenzial auf bis zu 26,4 Mt CO₂eq. durch die Optimierung in der Industrie geschätzt. Das größte Potenzial wird dabei dem Einsatz von Frequenzumrichterantrieben zugeschrieben (15,1 Mt CO₂eq.). Das marktgetriebene Potenzial für **Frequenzumrichterantriebe** wird auf **13,17 Mt CO₂eq.** geschätzt. Der **industriellen Systemautomatisierung** wird ein Einsparpotenzial von **5,6 Mt CO₂eq.** zugeschrieben, das aufgrund der wirtschaftlichen Attraktivität Industrieautomatisierung auch marktgetrieben erreicht werden könnte. Barrieren liegen in den Ausfallkosten bei der Modernisierung. GeSI/BCG geht von rationalem Investitionsverhalten der Unternehmen aus, d.h. einer Lebenszyklusbetrachtung, die auch langfristig wirkende Investitionen ermöglicht. Diese Annahme ist vor dem Hintergrund zahlreicher Arbeiten zu Hemmnissen für die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen kritisch zu hinterfragen. Als drittes Feld wird die **Betriebsoptimierung von Kraftwerken** mit einem theoretischen Einsparpotenzial von 5,7 Mt CO₂eq. ausgewiesen. Bei einer Durchdringung von 40 % der bestehenden Kraftwerkskapazität läge das marktgetriebene Potenzial bei **4,2 Mt CO₂eq.**

In einer Ad-hoc-Studie der Europäischen Kommission werden die Einsparungen, die durch IKT in der Industrie möglich wären, auf 10-40 % geschätzt und teilen

sich wie folgt auf: Prozessoptimierung (25-30 %), optimierte Logistik (16 %), integrierte Prozessketten (30 %), Entwicklung neuer Produkte (10-40 %). In der Zementindustrie werden mögliche Einsparungen von 27,5 % geschätzt und in der Stahlindustrie 10-15 %.

2.6 Dematerialisierung von Produkten und Dienstleistungen

Der Begriff Dematerialisierung beschreibt hier den Ersatz von physischen Produkten durch digitale, bspw. vom Buch zum e-book. Eine Grundlage dafür ist eine großflächige Anbindung an das Breitbandinternet.

In Bezug auf Einsparungen durch teleworking, aber auch E-Commerce, besteht Skepsis, da es zu Reboundeffekten kommen kann. In einer Studie für die EU wurden diese auf 14-73 % geschätzt (Jørgensen et al 2006 zitiert nach Horner et al. 2016)

Von GeSI/BCG (2009) werden insgesamt theoretische Einsparungen von bis zu 16,3 Mt CO₂eq. ermittelt. Das realistische Potenzial liegt deutlich niedriger bei **5,18 Mt CO₂eq.** Als die attraktivsten Geschäftskonzepte im Bereich wurden **Virtual Conferencing** und **Telearbeit** identifiziert. Reisegewohnheiten werden als ein Hemmnis genannt. Anreize und gesetzliche Regelungen könnten einen Wandel zu einer umweltbewussteren Meetingkultur unterstützen.

Elektronische Dokumente, Rechnungen und Zeitschriften haben deutlich geringere Einsparpotenziale. Als größtes Hemmnis für Geschäftskonzepte im Bereich Dematerialisierung werden gesellschaftliche Aspekte genannt. Dematerialisierung ist mit einer Veränderung von Arbeits- und Lebensweisen verbunden.

3 Schlussfolgerungen

Aus den gesichteten Studien zeichnet sich ab, dass es einen Bedarf gibt, die Datengrundlage zur Evaluation der Effekte von IKT zu verbessern. Bisher ist die Datengrundlage dürftig und die Ergebnisse unterschiedlicher Studien u.a. aufgrund unterschiedlicher Systemgrenzen und Methoden kaum vergleichbar. Die Potenziale der Digitalisierung, u.a. von Smart Meters, Smart Grids und Industrie 4.0 werden häufig genannt, aber die realen Einspareffekte neuer Dienstleistungen sind bisher noch unklar. Es wäre wünschenswert, mehr Studien zu haben, die realisierte Einsparungen messen und versuchen, methodische Ansätze zu entwickeln und den Beitrag der IKT zu diesen Einsparungen zu ermitteln. Viele

der bisherigen Studien schätzen theoretische Einsparungen auf Basis zahlreicher Annahmen ein, so dass empirische Daten dringend notwendig sind. Dies erscheint für alle Sektoren relevant, sowohl im Bereich Industrie 4.0, intelligenter Verkehrslösungen, smart buildings, smart grid und Dematerialisierung.

Ein Aspekt, der in zahlreichen Anwendungsfeldern durchscheint, ist das Potenzial, durch IKT-Lösungen zur Systemoptimierung beizutragen und dadurch Einsparungen zu erzielen. Gerade auch in der Industrie können solche systemischen Einsparpotenziale und auch betriebsübergreifende Optimierung ein wichtiger Hebel sein, um die zur Erreichung der Klimaziele notwendigen, deutlichen Emissionssenkungen zu erreichen. Auch hier wäre eine genauere Untersuchung, welchen Beitrag IKT leisten kann, solche Potenziale zu heben, wünschenswert. Dabei sollte aber im Auge behalten werden, dass Digitalisierung kein Selbstzweck ist. Ein möglicherweise erhöhter Stromverbrauch und potenzielle Datenschutzaspekte sowie Investitionen sollten den positiven Effekten gegenübergestellt werden.

Neue Studien sollten nicht nur Effekte erster und zweiter Ordnung berücksichtigen, sondern auch Effekte dritter Ordnung, also systemische Rückwirkungen und Rebound, da sonst möglicherweise ein zu positives Bild der IKT-Effekte für die Umwelt gezeichnet wird. Diese Aufgabe ist komplex und erfordert ein Verständnis der komplexen system-dynamischen Zusammenhänge, in denen IKT wirkt. Es gibt aber bereits Arbeiten zur Systematisierung der Effekte und Zusammenhänge, auf die aufgesetzt werden kann.

Die Abschätzung aggregierter Effekte unterliegt dabei großen Unsicherheiten, daher erscheint es sinnvoll, einen Fokus auf die Identifizierung von zentralen Einflussgrößen zu legen, die bestimmen, ob und in welchem Ausmaß theoretische mögliche Einsparungen realisiert werden. Ein wichtiger Aspekt dabei ist ein besseres Verständnis des Nutzerverhaltens, das einen sehr zentralen Einfluss hat.

Die Integration der Nutzerperspektive und des Verhaltens ermöglicht es, energetische Ziele mit Nutzerprioritäten abzugleichen und so entsprechende Anreize setzen zu können. Da der Effekt der IKT maßgeblich durch das Nutzerverhalten bestimmt wird, besteht hier die Möglichkeit, Einfluss zu nehmen, und zwar am besten so, dass der Nutzer den Anreiz hat, die CO₂-sparende Variante zu realisieren (nudging).

Zusätzlicher Forschungsbedarf besteht in der Frage, welcher Anpassungsbedarf durch Digitalisierung auf rechtlicher Ebene entsteht. Im Stromsektor stellen sich

diese Fragen durch die zunehmende Dezentralisierung bereits relativ konkret z.B. im Sinne sich wandelnder Rollen der Konsumenten zu Prosumenten.

Abseits der direkten klimarelevanten Bereiche besteht auch weiterer Forschungsbedarf zu den Themen Dematerialisierung und Sharing Economy und den möglichen gesellschaftlichen Wirkungen und systemischen Effekten, die durch Änderungen im Konsumverhalten und/oder neue Geschäftsmodelle entstehen könnten.

Auch wenn der Fokus dieser Betrachtung auf dem Klimaschutz liegt, sei darauf hingewiesen, dass IKT weiteren Nutzen haben kann. Hierbei sollte der Einfluss auf andere Nachhaltigkeitsaspekte wie bspw. Teilhabe, Zugang zu Bildungs- und Gesundheitssystemen sowie Ressourceneinsparungen inkl. Wasser generell berücksichtigt werden.

4 Literaturverzeichnis

4.1 Zitierte Studien

BITKOM/Fraunhofer ISI (2012): Gesamtwirtschaftliche Potenziale intelligenter Netze in Deutschland. Verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/noindex/Publikationen/2012/Studie/Gesamtwirtschaftliche-Potenziale-intelligenter-Netze-in-Deutschland/Studie-Intelligente-Netze2.pdf>

Börjesson R.; Håkansson, C.; Svenfelt, Å.; Finnveden, G. (2014): Including second order effects in environmental assessments of ICT. In: Environmental Modelling & Software 56 (2014) 105-115. Verfügbar unter: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815214000565>

Brown, A.; Gonder, J.; Repac, B. (2014): An analysis of possible energy impacts of automated vehicle. Road Vehicle Automation (Lecture Notes in Mobility) ed. G. Meyer and S. Beiker (Cham: Springer), pp 137-153. Verfügbar unter http://link.springer.com/10-1007/978-3-319-05990-7_13

Coroama, V. C.; Schien, D.; Preist, C.; Hilty, L. M. (2015): The Energy Intensity of the Internet: Home and Access Networks. In: Hilty, L. M.; Aebischer, B. (eds.): ICT Innovations for Sustainability, Advances in Intelligent Systems and Computing, pp. 137-155. Verfügbar unter: <http://www.springer.com/de/book/9783319092270>

Erdmann, L.; Hilty, L. M. (2010): Scenario Analysis – Exploring the Macroeconomic Impacts of Information and Communication Technologies on Greenhouse Gas Emissions. In: Journal of Industrial Ecology 14, 826-843. Verfügbar unter: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1530-9290.2010.00277.x/abstract>

European Commission (2008a): ICT for Energy Efficiency DG-Information Society and Media Ad-Hoc Advisory Group Report Brussels, 24.10.2008. Verfügbar unter: <http://www.greendigitalcharter.eu/wp-content/uploads/2012/11/2008.10-Ad-hoc-Advisory-Group-Report.pdf>

European Commission (2008b): Addressing the challenge of energy efficiency through information and communication technologies. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions 241 final, Brussels (2008). Verfügbar unter:

DE: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52008DC0241&from=en>

EN: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52008DC0241&from=en>

GeSI/Accenture (2015): #SMARTer2030 ICT Solutions for 21st Century Challenges. Verfügbar unter: http://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report.pdf

GeSI/BCG (2009): SMART 2020 Addendum Deutschland: Die IKT-Industrie als treibende Kraft auf dem Weg zu nachhaltigem Klimaschutz.

Verfügbar unter: <https://www.bcg.com/de-at/perspectives/141118>

GeSI/BCG (2012): SMARTer2020: The Role of ICT in Driving a Sustainable Future. Verfügbar unter: http://gesi.org/assets/js/lib/tiny_mce/jscripts/tiny_mce/plugins/ajaxfilemanager/uploaded/SMARTer%202020%20-%20The%20Role%20of%20ICT%20in%20Driving%20a%20Sustainable%20Future%20-%20December%202012.pdf

GeSI/The Climate Group (2008): SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age. Verfügbar unter: <http://gesi.org/files/Reports/Smart%202020%20report%20in%20English.pdf>

Hilty, L. M.; Aebischer, B. (2015): ICT for Sustainability: An Emerging Research Field. In: Hilty, L. M.; Aebischer, B. (eds.): ICT Innovations for Sustainability, Advances in Intelligent Systems and Computing pp. 3-36. Verfügbar unter: <http://www.springer.com/de/book/9783319092270>

Hilty, L. M.; Arnfal, P.; Erdmann, L.; Goodman, J.; Lehmann, M.; Wäger, P. A. (2006): The relevance of information and communication technologies for environmental sustainability – A prospective simulation study. In: Environmental Modelling & Software 21, 1618-1629. Verfügbar unter: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815206001204>

- Horner, N.; Shehabi, A.; Azevedo, I. L. (2016): Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology. In: Environmental Research Letters, Volume 11, Number 10, Published 5 October 2016. Verfügbar unter: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/10/103001/meta;jsessionid=B0838306B70C5053B1E972901ADB49CB.ip-10-40-1-105>
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/10/103001/pdf>
- IEA (2014): More data less Energy Verfügbar unter: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/MoreData_LessEnergy.pdf
- Kramers, A.; Höjer, M.; Lövehagen, N.; Wangel, J. (2014): Smart sustainable cities – Exploring ICT solutions for reduced energy use in cities. In: Environmental Modelling & Software 56, pp. 52-62. Verfügbar unter: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136481521400019X>
- Laitner, J. A. (2015): The Energy Efficiency Benefits and the Economic Imperative of ICT-Enabled Systems. In: Hilty, L. M.; Aebischer, B. (eds.): ICT Innovations for Sustainability, Advances in Intelligent Systems and Computing pp. 37-48. Verfügbar unter: <http://www.springer.com/de/book/9783319092270>
- Langer, T.; Vaidyanathan, S. (2014): Smart Freight: Applications of Information and Communications Technologies to Freight System Efficiency. Washington, D.C., American Council for an Energy-Efficient Economy, Verfügbar unter: <http://indiaenvironmentportal.org.i/files/file/Smart%20Freight.pdf>
- Schulte, P.; Welsch, H.; Rexhäuser, S. (2016): ICT and the Demand for Energy: Evidence from OECD Countries. In: Environmental and Resource Economics, January 2016, Volume 63, Issue 1, pp 119–146. Verfügbar unter: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10640-014-9844-2>

4.2 Weitere Literatur

- Accenture (2016): The new Energy Consumer – Unleashing Business Value in a Digital World. Verfügbar unter: https://www.accenture.com/_acnmedia/Accenture/next-gen/insight-unlocking-value-of-digital-consumer/PDF/Accenture-New-Energy-Consumer-Final.pdf

- Berger, R. (2015): Digitale Transformation der Industrie. Eine europäische Studie von Roland Berger Strategy Consultants im Auftrag des BDI. München/Berlin. Verfügbar unter: http://bdi.eu/media/user_upload/Digitale_Transformation.pdf
- Boston Consulting Group (2015): Industry 4.0. The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. Verfügbar unter: [http://www.zvw.de/media.media.72e472fb-1698-4a15-8858-344351c8902f.original.pdf](http://www.zvw.de/media/media.72e472fb-1698-4a15-8858-344351c8902f.original.pdf)
- Coroama, V.; Hilty, L. M. (2009): Energy consumed vs. energy saved by ICT – a closer look. In: Wohlgemuth, V.; Page, B.; Voigt, K. (eds.): Environmental Informatics and Industrial Environmental Protection: Concepts, Methods and Tools, pp. 353–361. Verfügbar unter: http://old-web.empa.ch/plugin/template/empa/*/86925/---/l=1
- dena (2016): Blockchain in der Energiewende. Eine Umfrage unter Führungskräften der deutschen Energiewirtschaft. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Meldungen/blockchain_deutsch.pdf
- GeSI/BCG (2008): The Contribution the ICT Industry Can Make to Sustainable Development A Materiality Assessment by the Global eSustainability Initiative. Verfügbar unter: <http://gesi.org/files/Reports/The%20Contribution%20the%20ICT%20Industry%20Can%20Make%20to%20Sustainable%20Development.pdf>
- GTAI (2014): Industry 4.0 Smart manufacturing for the future. Verfügbar unter: http://www.gtai.de/GTAI/Content/EN/Invest/_SharedDocs/Downloads/GTAI/Brochures/Industries/industrie4.0-smart-manufacturing-for-the-future-en.pdf?v=8
- Hilty, L. M. (2008): Information Technology and Sustainability. Essays on the Relationship between ICT and Sustainable Development. Books on Demand, Norderstedt. Verfügbar unter: <https://www.amazon.de/gp/product/3837019705/>
- McKinsey (2015): Industry 4.0. How to navigate digitization of the manufacturing sector. Verfügbar unter: https://www.mckinsey.de/files/mck_industry_40_report.pdf
- McKinsey (2016): Industry 4.0 after the initial hype

- Merz, M. (2016): Einsatzpotentiale der Blockchain im Energiehandel. Verfügbar unter: http://www.ponton.de/downloads/mm/Einsatzpotentiale-der-Blockchain-im-Energiehandel_Merz_2016.pdf
- Pamlin, D.; Pahlman, S. (2008): Outline for the First Global It Strategy for CO₂ Reductions. Technical Report. World Wildlife Fund, Switzerland. Verfügbar unter: <http://www.pamlin.net/new/wp-content/uploads/Global-strategy-for-the-1st-BILLION-tonnes-with-ICT.pdf>
- PWC (2016): Blockchain - Chance für Energieverbraucher? Studie im Auftrag der Verbraucherzentrale NRW. Verfügbar unter: <https://www.verbraucherzentrale.nrw/media242404A>
- Stiftung neue Verantwortung (2017): Die Energiewende braucht ein digitales Marktdesign. Verfügbar unter: <https://www.stiftung-nv.de/sites/default/files/digitales.marktdesign.pdf>
- Stöcker, C. (2017): Automating Machine Transactions and Building Trust in the 4th Industrial Revolution. Verfügbar unter: <https://medium.com/iotatangle/automating-machine-transactions-and-building-trust-in-the-4th-industrial-revolution-d3219a157396>
- Sunguard (2013): Big Data – Challenges and opportunities for the energy industry. Verfügbar unter: [Big Data - Challenges and opportunities for the energy industry](#)
- The association of European Telecoms Network Operators and the World Wildlife Fund (2005): Saving the climate @ the speed of light: ICT for CO₂ reductions. May 2005. Verfügbar unter: http://www.pamlin.net/new/wp-content/uploads/WWF_ETNO-Saving_the_climate.pdf
- Voshmgir, S. (2017): Blockchains, Smart Contracts und das Dezentrale Web. Studie im Auftrag der Technologiestiftung Berlin. Verfügbar unter: https://www.technologiestiftung-berlin.de/fileadmin/daten/media/publikationen/170130_BlockchainStudie.pdf


Autorin:

Nele Friedrichsen

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Competence Center Energiepolitik und Energiemärkte


Kontakt:

Dr. Vicki Duscha
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Str. 48
76139 Karlsruhe
Phone: +49 721 6809-226
E-Mail: tobias.fleiter@isi.fraunhofer.de
www.isi.fraunhofer.de

Karlsruhe 2017