

Effizienz und Nachhaltigkeit durch Green-IT: ein systematischer Literaturüberblick im Kontext der Klimakrise

Laura Buhleier, Patrick Gantner, Tobias Frey, Michael Bors, Marc-André Kaufhold und Christian Reuter¹

Abstract: Die Klimakrise gehört zu den aktuell größten Herausforderungen unserer Zeit. Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) können hierbei eine entscheidende Rolle spielen. Einerseits, da eine Effizienzsteigerung von oder durch IKT zu einer klimafreundlicheren Nutzung beitragen kann, und andererseits, da IKT zu einem erhöhten Ressourcenverbrauch führen kann. Um diese Thematik weiter zu untersuchen, wird in dieser Arbeit eine systematische Literaturrecherche durchgeführt, um Herausforderungen und Potenziale in der Adressierung der Klimakrise durch eine effiziente und nachhaltige Entwicklung des IKT-Sektors zu analysieren. Die dabei untersuchte Literatur beinhaltet Herausforderungen wie zum Beispiel den hohen Energie- und Materialverbrauch der IKT-Geräte und Datenzentren sowie die entstehenden Entsorgungskosten und das Konsumverhalten der Nutzer*innen. Deswegen sollten die Nutzer*innen mehr Informationen zur Wartung, zum Kauf gebrauchter Geräte, und zum Recyceln/Entsorgen erhalten. Die Analyse lieferte aber auch viele Potenziale. Durch IKT können Effizienzsteigerungen in den Bereich Industrie, Landwirtschaft, Verkehr und Transport erreicht und auch umweltschädliche Geräte substituiert werden. Durch diese Potenziale kann es aber, wie in anderen Bereichen, zu einem Rebound-Effekt kommen.

Keywords: Green-IT, Nachhaltigkeit, Effizienz, Rebound-Effekt, Klimakrise

1 Einleitung

Die Klimakrise ist eine der aktuell größten Herausforderungen. Der 6. Beurteilungsbericht des „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) aus dem Jahr 2021 zeigt erneut, dass der Mensch einen großen Einfluss auf den Klimawandel hat [MA21]. Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) stellt hier sowohl eine Möglichkeit als auch eine Herausforderung dar. So bietet IKT zum einen Möglichkeiten „die Effizienz verschiedener Systeme zu verbessern“ [ZTB09, S. 2], „die Notwendigkeit nach physischem Material in einer gegebenen Aktivität zu eliminieren oder zu reduzieren“ [S. 2] sowie „die Wahrnehmung zu erhöhen und menschliches Verhalten zu ändern“ [S. 2]. Demnach könnten „technologische Durchbrüche“ [KH20, S. 13] eine der letzten Möglichkeiten sein, der Klimakrise zu entkommen. Hier spielt auch die Effizienz eine bedeutende Rolle, denn sie „ist im Prinzip bestimmt von Technologie und Politik“ [HK20, S.13]. Neben diesen positiven Aspekten entstehend durch die Digitalisierung aber auch Herausforderungen bzgl. der Datenhoheit [Li21] oder technische Abhängigkeiten [Ku22].

Überdies hat auch die Produktion und Verwendung von IKT selbst Einfluss auf den Kli-

¹ Technische Universität Darmstadt, Wissenschaft und Technik für Frieden und Sicherheit (PEASEC), Pankratiusstr. 2, 64298 Darmstadt, <nachname>@peasec.tu-darmstadt.de, <https://orcid.org/0000-0003-1920-038X>

mawandel, da sie 2.1-3.9% der globalen Emission ausmacht [FR21] und einen wachsenden ‚CO₂-Fußabdruck‘ hat. „[Die] Analyse zeigt, dass nicht alle Zusagen im IKT-Sektor ehrgeizig genug sind, um die Klimaziele zu erreichen“ [S. 1]. Deshalb sollte auch in IKT mehr Aufklärung zum Einfluss von IKT auf die Nachhaltigkeit durchgeführt werden. In dieser Arbeit wird daher die Dualität in der Verwendung von IKT unter Berücksichtigung der nachhaltigen Effizienz in der Klimakrise untersucht. Dabei liegt der Fokus auf einem Beitrag zu folgender Frage: **Welche Herausforderungen und Potenziale hat IKT in Bezug auf die nachhaltige Effizienz in der Klimakrise?**

2 Methodik

Für diese Arbeit wurde eine sequenzielle Literaturrecherche durchgeführt und um referenzierte Veröffentlichungen ergänzt. Als zugrundeliegende Struktur findet das 5-Phasenmodell von Brocke et al. [VO09] Anwendung. Dieses unterteilt die Recherche in: Definition des Umfangs der Arbeit, Konzeption des Themas, Literaturrecherche, Literaturanalyse und -synthese und zukünftige Forschungsfragen. Zu Beginn wurde durch die Lektüre verschiedener Forschungsarbeiten „ein Verständnis der Thematik entwickelt“ [S. 219], um Suchparameter für die systematische Literaturrecherche festzulegen. Somit wurden in einem ersten Rechenschritt zehn Arbeiten konsultiert. Anschließend wurden die Datenbanken Google Scholar, Web of Science (WoS), EBSCOhost und die digitale Bibliothek der Gesellschaft für Informatik (dl.gi.de) genutzt. Diese wurden nach den Themen Rebound-Effekt, Green ICT, Donut-Ökonomie, Effizienz und IKT und Nachhaltigkeit und IKT durchsucht, welche in der initialen Recherche als für die Zielsetzung der Arbeit relevant identifiziert wurden.

Die Recherchearbeit wurde unter den ersten vier Autor*innen aufgeteilt. Die Begriffe „Green ICT“, „Efficiency“, „Sustainability“ und „Rebound Effect“ wurden als Suchbegriffe gewählt. Zur Sicherstellung der Aktualität der Ergebnisse wurden nur Arbeiten, welche ab 2010 veröffentlicht worden sind, berücksichtigt. Ältere Veröffentlichungen wurden nur einbezogen, wenn durch besonders häufige Zitationen eine besondere Relevanz für das Forschungsfeld erkennbar war. Zur Erhöhung der Qualität der einzelnen Suchen wurden mehrere Datenbankabfragen mit jeweils unterschiedlichen Suchbegriffen auf unterschiedlichen Suchmaschinen durchgeführt. Insgesamt wurden vier Suchen zu den Schwerpunkten Nachhaltigkeit, Effizienz, Green IT und Rebound-Effekt durchgeführt. Das Ergebnis jeder Schwerpunktsuche enthält zehn Publikationen. Diese setzen sich aus ausgewählten Veröffentlichungen aus Google Scholar (3), Web of Science (3), EBSCOhost (3) und der digitalen Bibliothek der Gesellschaft für Informatik (1) zusammen, sodass die 30 relevantesten Ergebnisse der jeweiligen Suchanfrage berücksichtigt wurden.

Für den Bereich des Rebound-Effekts wurde die Suchbegriffe „rebound effect“ AND („ict“ OR „it“) AND „sustainability“ AND „efficiency“ verwendet (im Folgenden Rebound-Suche). Hier wurden 89 Treffer (67 nach Deduplikation) zur genaueren Untersuchung herangezogen. Durch ein anschließendes Titelscreening reduzierte sich die An-

zahl auf 42, und durch das Abstractscreening auf 34 Veröffentlichungen. Von diesen wurden 10 besonders geeignete Publikationen unter Berücksichtigung der beschlossenen Verteilung ausgewählt.

Für den Suchbereich ökologische Nachhaltigkeit und IKT wurde der Suchterm „Sustainability" AND ("ICT" OR "information and communication technology" OR "Information Technology") AND "environmental"“ verwendet. Der Begriff „environmental“ diente zur Einschränkung auf ökologische Nachhaltigkeit, da es zuvor einige Ergebnisse gab, bei denen der Fokus auf anderen Formen von Nachhaltigkeit lag. Nach Anpassung wurde daher der Suchterm „environmental sustainability" AND ("ICT" OR "information and communication technology" OR "Information Technology")“ verwendet. Durch die Spezifikation wurden in den vier Datenbanken jeweils zwei Suchanfragen durchgeführt. Bei der Betrachtung der 240 Suchergebnisse (2 x 4 x 30) gab es viele Überschneidungen. Das Titelscreening reduzierte die Auswahl auf 47 Ergebnisse nach Deduplikation. Durch das Abstractscreening wurden 29 Ergebnisse ausgewählt und daraus wiederum zehn ausgewählte Veröffentlichungen genauer betrachtet.

Für den Schwerpunkt Effizienz von/in IKT wurde grundsätzlich der Suchterm „(Efficiency" AND ("IT" OR "ICT" OR "Ecological" OR "Environmental"))“ verwendet. Ausnahme war hier die Datenbank der digitalen Bibliothek der Gesellschaft für Informatik, welche keine Ergebnisse für die Suchabfrage lieferte, was zu einer Kürzung des Suchterms führte. Da sich nach Titel-, Keyword- und anschließendem Abstractscreening nicht genügend passende Arbeiten fanden, wurde der Suchterm weiter spezifiziert und die 10 passendsten Veröffentlichungen in das Endergebnis aufgenommen.

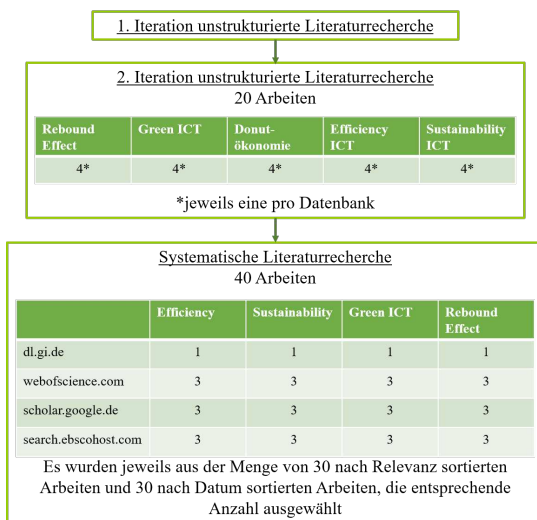


Abb. 1: Übersicht des Rechercheprozesses

Für den Suchbereich Green IKT wurde der Suchterm „(“Green ICT” OR “Green Growth”) & (“ICT” OR “IT” OR “Sustainability” OR “Efficiency”)“ verwendet. Auch hier wurden Anpassungen vorgenommen, die schließlich zu 10 zentralen Arbeiten führten. Auffällig war, dass ein Großteil jener in der ersten Hälfte des Suchzeitraums 2010-2021 verfasst wurde. Eine Übersicht aller Suchanfragen lässt sich Abb. 1 entnehmen.

Insgesamt sind durch die durchgeführte Recherche 40 Werke in diese Arbeit eingegangen. Die Themengebiete umfassen Greening von (20) und Greening durch IKT (22), indirekte (15) und direkte Rebound-Effekte (15), Material- (3) und Energieeffizienz (11), CO₂-Einsparungen (9), Nachhaltigkeit (11) sowie die wirtschaftliche (10) und private Perspektive (4). Die Ergebnisse der Literaturrecherche werden nachfolgend beschrieben.

3 Ergebnisse

Frühere Arbeiten unterteilen die Auswirkungen von IKT in Primär-, Sekundär- und Tertiär-Effekte [VE17, HA14, CE14]. Primär-Effekte seien „Effekte, die durch die physische Existenz von IKT (Umweltauswirkungen durch Produktion, Nutzung, Recycling und Entsorgung von IKT Hardware) entstehen“ [HA14, S. 1]. Sekundär-Effekte seien „indirekte Auswirkungen auf die Umwelt von IKT aufgrund dessen Fähigkeit, Prozesse zu verändern (so wie Produktions- oder Transportprozesse), was in eine Modifikation (Abnahme oder Zunahme) ihrer Umweltbelastungen resultiert“ [HA14, S. 1]. Tertiär-Effekte wären dagegen „Umweltauswirkungen des Mediums- oder Langzeit-Adaption des Verhaltens (zum Beispiel Konsumverhalten) oder ökonomischer Strukturen durch die stabile Verfügbarkeit von IKT und der Services, die es bietet“ [HA14, S. 1]. Verdecchia et al. [VE17], Majeed [MA18], Aleksic [AL14] und Cecere et al. [CE14] verwenden äquivalente Definitionen, wobei letztere die genannten Unterteilungen teilweise auch als direkte, ermöglichende und systemische Effekte beschreiben. Mahdavi und Sojoodi [MS21] kontrastieren die Effekte zudem als positiv oder negativ.

	Positive Effekte	Negative Effekte
Primär- oder direkte Effekte	Die Nutzung von IKT in Umweltüberwachung und Kontrolle	Umweltauswirkungen der Herstellung und Nutzung von IKT-Geräten und -Ausrüstung
Sekundär- oder indirekte Effekte	Strukturelle Änderungen und Ressourcenschonung (eine Reduktion in der Menge der Ressourcen, die von der Wirtschaft verbraucht werden)	Unvollständige Substitution von Waren oder Services mit IKT
Tertiär-Effekte	Lifestyle Änderungen (z.B. Konsum auf einen grünen und umweltfreundlichen Konsum ausrichten)	Systemische oder Rebound-Effekte

Tab. 1: Darstellung der Primär-, Sekundär- und Tertiär-Effekte in Bezug auf deren positive und negative Auswirkungen, übernommen und übersetzt aus: Mahdavi und Sojoodi [MS21]

3.1 Greening von IKT

Nach Aleksic trug IKT in 2020 mehr als 4% zu den weltweiten CO₂-Emissionen bei und „ungefähr 51% des IKT-bezogenen Energieverbrauchs [wurde] von der Telekommunikations-Infrastruktur und Datenzentren verbraucht“ [AL14, S. 1]. Nach Gorbenko et al. seien „die Informations- und Kommunikationstechnologien für ungefähr 2-2,5% der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich“ [GO18, S. 3] und „die gesamte Energieversorgung des gesamten Computing- und Kommunikationsequipment der Welt benötigt 160 GW pro Jahr, was etwa 8% der gesamten generierten Energie weltweit sind“ [S. 3]. Für eine Minderung der Umweltbelastung wäre also eine Steigerung der Effizienz in der Verwendung von IKT-Geräten notwendig.

Viele Autor*innen kritisieren an dieser Stelle die Ausrichtung der IKT-Forschung. So würden viele Forschungsarbeiten vor allem dem Energieverbrauch von Datenzentren und den während der Nutzung eines Gerätes entstehenden Umweltschäden Beachtung schenken und dabei die Auswirkungen von den Geräten der Endnutzer*innen und der Produktionsemissionen missachten [HA14B]. Es wird kritisiert, dass „die meisten der bisher absolvierten Studien sich ausschließlich auf die Energie konzentrieren, die während der Betriebs- (Nutzungs-) Phase verbraucht wurde“ [AL14, S. 4]. So könnten elektrische Autos zwar auf den ersten Blick für mehr Nachhaltigkeit sorgen, doch bei Einrechnung der Art der Stromgewinnung und den verwendeten Materialien würde ersichtlich, dass elektrische Autos nicht zwangsläufig für mehr Nachhaltigkeit sorgen [GO18]. Weiter wird kritisiert, dass in Studien zum Thema Green IKT die Rebound-Effekte wenig beachtet seien und der Fokus zu sehr darauf gelegt würde, energieeffizientere IT zu schaffen [HLW11]. Vergangene Entwicklungen würden jedoch zeigen, dass bessere Energieeffizienz zu einem insgesamt größeren Verbrauch durch mehr Nutzung führe.

Sollen kumulierte Folgen von IKT auf das Klima betrachtet werden, gibt es viele verschiedene Punkte zu beachten. So würde die Nachhaltigkeit von IKT-Geräten vor allem durch deren Lebensdauer bestimmt [AL14]. Aleksic [AL14] und Welfens und Lutz [WL12] schlagen daher „Life Cycle Assessments“ (LCA) vor, bei denen die umweltbelastenden Effekte eines Produktes von Herstellung bis Entsorgung betrachtet werden. Nach Gorbenko et al. stellt auch die mangelnde Leistungsfähigkeit von Software – etwa durch Alterungseffekte – ein Problem dar [GO18]. Sie warnen ebenfalls, dass sich unzuverlässige Netzwerke, zu welchen auch das Internet gehöre, durch die Verwendung mehrerer Systeme oder Prozesse zur Erhöhung der Fehlertoleranz negativ auf die Energienutzung auswirken würden. Außerdem erhöhe sich durch vermehrte Nutzung des Internets als auch durch den Gebrauch von Tablets, Smartphones und „Internet of Things (IoT)“-Geräten die Kommunikation über das Internet [AL14]. Das benötigte Wachstum an Bandbreite stelle ebenfalls höhere Anforderungen an die benötigten Netzwerkgeräte.

Zur Erreichung einer Effizienzsteigerung stellen Gorbenko et al. [GO18] vier Prinzipien der "Green Economics" vor: „Reduce“, wonach „Ressourcen-/Materialnutzung, Energieverbrauch und Abfall-/Schadstoffemission“ [S. 2] verringert werden sollten, „Increase“, was bezeichnet, dass „die Anzahl der produzierten Produkte/Services, deren Langlebigkeit

und Leistungs-/Qualitäts-Indikatoren pro Einheit an verwendeten Ressourcen/Materialien, Energy und verursachtem Abfall/Schadstoffen“ [S. 2] erhöht werden sollten, „Reuse and Recycle“, wonach Produkte mit dem Gedanken der Wiederverwendbarkeit und Recyclebarkeit produziert werden sollten und schließlich „Recover and Renew“, was die Verwendung Erneuerbarer Energien und die Wiederverwendung von Teilmaterialien eines gebrauchten Produktes einschließt. Sie stellen für die Beurteilung von Prozessen und Produkten eine Metrik vor, anhand derer jeweils zwei Inputs und Outputs betrachtet werden sollten: Ressourcen und Energie, sowie Ergebnis und Abfallstoffe [Go18].

Stobbe et al. argumentieren, dass „eine Kombination aus spezifischer Hardware- und Softwareentwicklung [...] der Schlüssel zur Verbesserung“ [ST16, S. 15] ist. Danach schlagen Drangmeister et al. vor, während der Entwicklung von Software eine Methode zum Messen des Energieverbrauchs und der Energieeffizienz zu verwenden, welche von Anfang bis zum Ende in den Entwicklungsprozess eingebunden werden sollte [DR13]. Weiterhin könnten „signifikante Einsparungen im Energieverbrauch durch Netzwerk-Infrastrukturen erreicht werden [...], wenn sowohl das Netzwerkkonzept als auch die Architektur des Netzwerkelements in Beachtung des Energieverbrauchs optimiert werden“ [AL14, S. 3]. So kann eine Erhöhung der durchschnittlichen Auslastung die Anzahl der Server sowie den Energieverbrauch verringern [Go18, S. 4], denn eine „Verbesserung der Energieeffizienz von Computer Software“ [S. 5] gegenüber der Hardware sei zentral. Dafür seien besonders die Messung des Energieverbrauchs, sowie eine wohlüberlegte Energieerneuerung und intelligente Zeitplanung notwendig. Bieser und Hilty schließen, dass die Emissionen von Treibhausgasen (THG) im IKT-Sektor selbst sinken [BH18]. Es existieren also diverse Ansätze zur Effizienzsteigerung mit IKT. Jedoch merken Bol et al. an: „Zwar steigt die Energieeffizienz mit den Generationen der Kommunikationstechnologie, doch gleicht sie den gestiegenen Datenverkehrsaufwand nicht aus, so dass der globale Fußabdruck zugenommen hat“ [BPD21, S. 3].

3.2 Greening durch IKT

Weiterhin existiert die Möglichkeit, dass „die Anwendung von IKT in den verschiedenen Wirtschaftssektoren eine erhebliche Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz ermöglicht“ [SPL20, S. 12]. So hätten „durch IKT ermöglichte Lösungen das Potenzial [...] die jährlichen Emissionen um 14,2% [bis 16,2%] der prognostizierten Gesamtmenge [von] 2020 zu reduzieren“ [AL14, S. 1]. Weitere Autor*innen nennen ähnliche potenziell positive Auswirkungen von IKT auf Nachhaltigkeit. Durch die Einführung von E-Mails und Lösungsfindungen durch automatisierte intelligente Verfahren habe IKT beispielsweise schon zu einer höheren Nachhaltigkeit beigetragen [MS21]. Zudem könne sich Green IKT durch die Innovativität und das schnelle Wachstum neuer Technologien positiv auswirken [WL12]. Weiterhin hätte IKT durch die Interkonnektivität einen positiven Einfluss auf Produktion und Handel. Insgesamt offenbaren sich vier Hauptpunkte für den Einfluss von IKT auf Nachhaltigkeit: „Softwareentwicklung“ und „Technologischer Fortschritt“, die zu einer erhöhten Effizienz und Nachhaltigkeit führten, „das Wachstum des Internets“,

welches zu niedrigeren „Kommunikationskosten“ führte und die generell weite Verbreitung des Internets, dessen Verwendung aber gleichwohl zu einer Verbreitung umwelt(un)freundlicherer Lebensstile führen könnte. Weiter führe IKT zu erhöhter Produktivität und Bildung und damit zu wirtschaftlichem Wachstum, das sowohl zu einem stärkeren Wunsch nach Umweltschutz als auch zu einem erhöhten Druck wirtschaftlich starker Regierungen auf Regierungen mit geringeren Umweltstandards führt.

Zur Ermöglichung dieses Greenings durch IKT benennen Gorbenko et al. folgende Ziele: „Die Entwicklung eines skalierbaren Modells für die Vergrünung der städtischen Umwelt“ [Go18, S. 6] , „die Entwicklung von ICT Services (...) für smarte städtische Umwelt“ [S. 6], „die Entwicklung des [...] Smart-Grid-Konzepts“ [S. 6], „die Entwicklung von Modellen und Techniken, um die Sicherheit und Resilienz des Smart Grids abzuschätzen und sicherzustellen“ [S. 6] und die „Werbung für Green-Culture über Social Networks“ [S. 6]. Weiterhin entwickelten Bokolo und Mazlina ein Modell, um Unternehmensstrategien auf „Green Process“ [BM16] zu überprüfen, damit die Umweltverträglichkeit sichergestellt wird. Rivera et al. prüfen verschiedene sekundäre Effekte der IKT auf ihre Umweltverträglichkeit [R13] aufbauend auf Yi und Thomas, welche Potenziale von IKT anhand von „E-Commerce“ konkretisieren: Virtualisierung von Produkten, Digitalisierung von Informationen, Dematerialisierung des Transports, Verkleinerung von Lager-/Büroflächen und Verkürzung der Lieferketten [YT07]. Weitere Anwendungsfelder von IKT zur effizienten Reduktion von CO₂-Emissionen seien die Industrie sowie das Bauwesen [Ni20]. Nüssel und Hofmann et al. sehen solche Potenziale ebenso für die Landwirtschaft [NÜ18; HRA21] und den Verkehrssektor spricht der abnehmenden Pendelverkehr durch digitale Arbeit, wobei mögliche Rebound-Effekte hier noch untersucht werden müssen [HRA21; SBB20]. Auch im Frachttransport kann IKT einen Beitrag zur CO₂-Reduktion leisten [Ch21]. Obwohl es deutliche Einsparungen bei den Transportkosten durch IKT-Einkaufssysteme geben könne [Do00], entgegnet Sui und Rejeski, dass „Just-in-Time-Lieferungen dazu führen, dass Lastwagen halbleer fahren und der elektronische Handel schnellere Transportarten begünstigt, was den Kraftstoffverbrauch erhöht“ [SR02, S. 155-163].

Bei der Literaturrecherche wurden weitere Studien identifiziert, die das Potenzial von IKT zur allgemeinen Senkung der CO₂ Emissionen untersuchen. So Sorge IKT in Industrieländern für eine Senkung der CO₂-Emissionen [BH18; KSA20]. Beim Ausbau von IKT-Infrastruktur in Entwicklungsländern steige das Emissionslevel hingegen, bis ein bestimmter Schwellwert erreicht wird. Erst bei einer Weiterentwicklung der IKT-Infrastruktur über diesen Schwellwert hinaus sanken die CO₂-Emissionen [AGS17]. Dieses Ergebnis wird in weiteren Studien von Asongu et al. [ALB17], Majeed [MA18], Akande et al. [ACP19] und Khan et al. [KSA20] bestätigt.

3.3 Der Einfluss der Nutzer*innen

Verschiedene Autor*innen benennen zudem die Nutzer*innen von IKT-Geräten als einen großen Faktor für den CO₂-Fußabdruck [R13; ST16; BA19; SPL20; CAS21]. Cordella et al. fassen zusammen, dass bis zu 49% von IKT-Produkten unbenutzt aufbewahrt werden,

nachdem sie ihr Lebensende erreicht haben. Nur 36 % würden in einen zweiten Lebenszyklus über- und 15% würden zum Recycling abgegeben. Diese Arbeit fokussiert das LCA von Smartphones, da der Beitrag jener bald größer als der von Desktops, Laptops und Bildschirmen ist [CAS21]. So wird geschätzt, dass nach aktuellem Stand der Technik (durch fortschrittlicherer Recyclingtechnologien könnte die CO₂-Einsparung ca. 30% höher sein) einzig anschließendes Recycling von Smartphones den CO₂-Fußabdruck um 5% senken könne. Beim Kauf von wiederaufbereiteten Geräten könne der Fußabdruck sich sogar um die Hälfte reduzieren. Erhöhen der Austausch von Batterie (1%) und Bildschirm (9%) in den ersten zwei Nutzungsjahren zunächst den CO₂-Fußabdruck, führt eine verlängerte Nutzungsdauer durch einen Bildschirmaustausch schließlich jedoch zu einer Einsparung von bis zu 44% bei 4 Jahren, die von wirtschaftlichen Einsparungen für Konsument*innen begleitet wird. Die zunehmende Bildschirm- und Speichergröße von Smartphones sowie „deren zunehmende Marktdurchdringung und kurze Austauschzyklen“ [CAS21, S. 14] führten derzeit noch zu hohen Emissionen. Zudem würde „die Analyse von Materialeffizienzaspekten durch das Vorhandensein möglicher Zielkonflikte erschwert“ [CAS21, S. 14] und eine wirksame Umsetzung von Materialeffizienzstrategien hinge von Verhaltensaspekten und umfassenden Informationen der Nutzer*innen ab, welche schließlich ihr Verhalten nachhaltiger gestalten müssten. Dies bedarf mehr Informationen für Verbaucher*innen, wie Geräte effizienter verwendet, instandgehalten und nach dem Lebenszyklus richtig entsorgt werden können. Eine Materialeffizienzstrategie ist also neben dem Verhalten von Nutzer*innen auch von der Informationsverbreitung abhängig.

Als mögliche Einflussfaktoren auf das Verhalten gelten wirtschaftliche Erwägungen, Werte, Einstellungen und Normen, sowie praktische Aspekte des täglichen Lebens [BE08]. In der Studie Berkers werden diese Punkte auf das Thema „Rolle der IKT für das Energieverhalten der Haushalte Energieeffizienz zur Eindämmung der globalen Erwärmung“ [BA19, S. 2] angewendet. Mit Hilfe von Technologien wie intelligenten Stromzählern zur Optimierung des Stromverbrauchs könnten so etwa der Energieverbrauch von Haushalten in den USA bis zu 22% und in der EU bis zu 20% gesenkt werden. Bezüglich einer absoluten Entkoppelung von Umweltleistungen vom wirtschaftlichen Wachstum durch die Digitalisierung argumentieren Bol et al., dass die Unmöglichkeit der wirtschaftlichen Entkoppelung von Energieverbrauch und Treibhausgasen ein Grund der Zunahme der CO₂-Emissionen sei. So sei die Herausforderung, dass in unserem nicht-idealen Markt die „low-carbon“ Energie, welche Datenzentren verwenden, an anderen Orten fehle. Ihrer Meinung nach „bleibt die Entkopplung lokal, und auf globaler Ebene wird nur eine begrenzte Verringerung der Treibhausgasemissionen erreicht, da der Energie-Fußabdruck nicht kleiner wird“ [BPD21, S. 4]. Hinzu kommen die bereits diskutierten Anforderungen durch Nutzer*innen: Die hohe Austauschrate von Verbraucherendgeräten und die Schaffung künstlicher Bedürfnisse, wie 4K-Videostraming auf Smartphones oder IoT-Anwendungen, welche auch als „Internet-of-Shit“ bezeichnet werden [BPD21]. Damit eine absolute Entkoppelung irgendwann erreicht werden könnte, müssten die Ressourceneffizienz erhöht und gleichzeitig die Rebound-Effekte limitiert werden [SPL20]. Durch die Komplexität der Diskussion ist aber nicht sicher festzustellen, ob die Digitalisierung die Entkopplung mildert oder verstärkt. Jedoch sollten Politiker*innen nicht darauf hoffen, dass die Digitalisierung von alleine zu einer nachhaltigen absoluten Entkopplung führe

[SPL20]. „Die Wahl und das Verhalten des Nutzers [bleiben also] ein Schlüsselement im Hinblick auf das verbleibende Energiesparpotenzial“ [ST16, S. 6].

3.4 Rebound-Effekt

Neben den direkten Effekten von IKT durch Material- und Energiebedarf [SC13] entstehen auch indirekte Effekte, die die Anwendung von IKT und die daraus resultierenden Verhaltens- und Struktureffekte umfassen [RO12]. Eine einheitliche und vollständige Zuordnung dieser Effekte in primäre, sekundäre und tertiäre oder Effekte höherer oder niedrigerer Ordnungen ist in der Literatur jedoch nicht zu finden [PHF19]. Dies gilt besonders für Effekte wie den Rebound-Effekt, der sich aus den Wechselwirkungen zwischen technischen Systemen und Nutzerverhalten ergibt [HSA16] und Situationen bezeichnet, in denen berechnete Einsparpotenziale durch Effizienzsteigerungen schließlich nicht oder nur teilweise realisiert werden können, weil die Reduktion an der einen zu einem höheren Verbrauch an anderer Stelle führt. Galvin argumentiert, dass diese klassische Einteilung in direkt und indirekt in der Anwendung von IKT deshalb unpassend sei, da Verbraucherbedürfnisse hier nicht befriedigt, sondern stetig neu geschaffen würden [GA15]. Andere teilen speziell bei IKT-Anwendungen auftretende Rebound-Effekte in direkte und indirekte wirtschaftliche sowie zeitliche und räumliche Rebound-Effekte ein [R113]. Weiterhin wurden bei der Analyse mehrerer Studien zu den Effekten von IKT-Anwendungen direkte Rebound-Effekte im Zusammenhang mit einer verstärkten Nutzung aufgrund von Kosten- und Zeiteinsparungen sowie durch unerwartetes Nutzungsverhalten festgestellt [PHF19]. Es wird außerdem auf die weniger erforschten Arten in Zusammenhang mit Zeit, Platz und Motivation hingewiesen [PHF19].

Diese verschiedenen Einordnungen und damit verbundenen abweichenden Definitionen gelten als Ursache für die stark voneinander abweichenden Studienergebnisse zur Stärke des Rebound-Effekts [GGD00]. Die Studien zum Rebound-Effekt fokussieren zumeist auf den Energieverbrauch und stehen nicht in direktem Zusammenhang mit IKT-Anwendungen [GGD00; So07]. In der zuvor beschriebenen Literaturrecherche wurden jedoch auch Studien identifiziert, die sich speziell auf den Rebound-Effekt von IKT-Anwendungen fokussieren. Takahashi et al. berechneten den Rebound-Effekt von IKT-Diensten in einer Fallstudie über Videokonferenzen, in der der Rebound-Effekt die erreichten Kohlenstoffeinsparungen um bis zu 20% verringern kann [TA04]. Joyce et al. fanden Rebound-Effekte im Zusammenhang mit der IKT-Nutzung in Schweden von über 100% [JO19]. Ray Galvin kommt in seiner Studie zu Rebound-Effekten des IKT- und Elektronik-Sektors ebenfalls zu Rebound-Effekten von über 100% [GA15]. Eine Effizienzsteigerung führe demnach zu einer Erhöhung des Energieverbrauchs. Ein weiterer Effekt, der auch als Miniaturisierungsparadoxon bekannt ist und sich den direkten Rebound-Effekten zuordnen lässt, wurde von Hilty untersucht. Hier wurde festgestellt, dass sich die durchschnittliche physische Masse eines Mobiltelefons zwischen 1990 und 2005 zwar um den Faktor 4,4 verringerte, die Gesamtmasse aller Telefone in der Schweiz jedoch um den Faktor 8 zunahm. Dies ist darauf zurückzuführen, dass „Rechenleistung schneller billiger wird, als

dass sie kleiner wird“ [Hi08]. Da es sich bei IKT häufig um Allzwecktechnologien handelt, kommen Einsparungen einem höheren Einkommen gleich, das in anderen Sektoren ausgegeben werden kann [MA11]. Dieser indirekte Rebound-Effekt wurde in einer Vielzahl von Studien festgestellt.

Im Bereich des E-Learnings haben Herring und Roy festgestellt, dass bei verschiedenen Systemen zur Bereitstellung von Bildungsmaterialien eine elektronische Bereitstellung im Vergleich zum druckbasierten Fernunterricht nicht zu einer Verringerung des Energieverbrauchs oder der CO₂-Emissionen führt. Grund dafür sind Rebound-Effekte beispielsweise durch die Nutzung von Computern und der Heizung zu Hause [HR02]. Online-Unterricht führe jedoch zu einer Dematerialisierung [CLS13]. Auch im Bereich der Telearbeit kommt es zu erheblichen Rebound-Effekten. So kann Telearbeit zu längeren Pendelwegen führen, wenn die physische Anwesenheit im Büro erforderlich ist, da die Arbeitnehmer sich möglicherweise entscheiden, weiter von ihrem Arbeitsplatz entfernt zu wohnen, wenn sie wissen, dass sie die Möglichkeit zur Telearbeit haben [GO15]. Diese indirekten Rebound-Effekte übersteigen im Zusammenhang mit der gestiegenen Kaufkraft und den erhöhten Reisezeiten die direkten Effizienzgewinne bei weitem [HR02]. Weitere Einsparungen im Transportbereich, beispielsweise durch Teleshopping, werden durch die Zunahme des Verkehrs für andere Zwecke wie weitere Einkäufe oder durch andere Familienmitglieder zu großen Teilen zunichte gemacht [FA12]. Auch die Verwendung immer effizienter werdender Navigationsgeräte kann zu Einsparungen auf einzelnen Strecken führen, führt jedoch auch dazu, dass insgesamt mehr Fahrten getätigt werden [GO15].

Nach Hakansson und Finnveden [2015] können bei Effizienzsteigerungen in der Produktion von IKT-Geräten starke Rebound-Effekte auftreten. Bei Effizienzsteigerungen in der Verwendung von IKT-Geräten sind auftretende Rebound-Effekte jedoch wesentlich geringer. Hier kann es zu tatsächlichen Einsparungen im Ausstoß von CO₂-Emissionen kommen. Des Weiteren stellten Hakansson und Finnveden [2015] fest, dass erhöhte Investitionen in IKT-Produkte zwar einen Anstieg der Emissionen im IKT-Bereich zur Folge haben, diese aber einen „umgekehrten“ Rebound-Effekt aufweisen, also der Konsum in anderen Bereichen zurückgeht (Substitution). Außerdem fanden Hakansson und Finnveden [HF15] im Widerspruch zu Chitnis et al. [CH14] heraus, dass wohlhabendere Verbraucher stärkere Rebound-Effekte verursachen. Aus wirtschaftlicher Sicht ist ein hoher Rebound-Effekt jedoch wünschenswert, da Gewinne am höchsten sind, wenn der Rebound am höchsten ist [Hi12]. Deshalb müssen nach Hilty zur Vermeidung eines Rebound-Effekts regulierende Maßnahmen getroffen werden, die ein Wachstum verhindern [Hi12]. Er schlägt außerdem entgegen wirtschaftlicher Logik vor, nur Prozesse, deren begrenzender Faktor ein anderer als der Energieverbrauch ist, zu optimieren, da hier die Rebound-Effekte geringer sind. Ein solcher könnte zum Beispiel die benötigte Zeit sein. Andere betonen, dass technologischer Fortschritt wichtig sei, um Rebound-Effekte zu vermeiden und schlagen neben Energiepreismechanismen eine Umstrukturierung der Energiequellen vor [LW19]. So könne erneuerbare Energie dazu führen, den Rebound-Effekt abzuschwächen. Aus der neueren Literatur geht hervor, dass verschiedene wirtschaftliche Instrumente wie Umweltsteuern, die Bepreisung von Ressourcen oder die Fest-

legung von Grenzen für die Ressourcennutzung für die Vermeidung von Rebound-Effekten wirksam sein könnten [FV20].

4 Diskussion

Das IKT-Paradoxon beschreibt den Widerspruch, dass IKT einerseits negativ zur Klimakrise im Sinne von Ressourcennutzung, CO₂-Ausstoß und Energieverbrauch beitrage, andererseits jedoch durch intelligente Lösungen, eine Vereinfachung oder Erübrigung von Transportwegen und Energieeinsparungen hilfreich für die Bekämpfung der Klimakrise sein könne [QU19]. Die Betrachtung dieser Dualität ist deshalb relevant, weil „das IKT Paradoxon einige nützliche Einsichten in die Bewältigung von Umweltshocks des Klimawandels“ [QU19, S. 626] bietet. Daher werden im Folgenden die Herausforderungen und Potenziale von IKT in Bezug auf die nachhaltige Effizienz in der Klimakrise diskutiert.

4.1 Herausforderungen und Potenziale von IKT in der Klimakrise

Vor allem unter dem Begriff Greening von IKT wurde festgehalten, dass IKT sich *negativ* auf das Klima auswirken kann. Demnach können sowohl Produktion, Wartung, Betrieb als auch Entsorgung und Recycling die Umweltbilanz von IKT negativ beeinflussen. Insgesamt sei IKT für ca. 2,1-3,9% der globalen Emissionen verantwortlich [FR21]. Ein Problem im Umgang mit aktuellen Zahlen zu den Umweltauswirkungen von IKT stellt dabei häufig die Fokussierung in Forschung und Datensammlung dar [HA14B, AL14, GO18, HA15]. Dabei würde sich etwa ausschließlich an den Betriebskosten orientiert und verwendete Materialien, Produktions- und Entsorgungskosten, sowie Rebound Effekte ignoriert [HA14B, AL14, GO18, HA15]. Auch die Effizienz von Geräten und Netzwerken hätten noch Verbesserungspotenziale [GO18, AL14]. Nach Bol et al. kann daher „die Verbesserung der Effizienz [...] nicht das einzige ökologische Ziel sein, da sie eher zur Erzielung wirtschaftlicher Gewinne als zur Verringerung des globalen Fußabdrucks eingesetzt wird“ [BPD21, S. 24]. Zusätzlich argumentieren sie, dass der zunehmende IKT-Wohlstand und das daraus folgende Wirtschaftswachstum nicht durch Innovation vorangetrieben werden sollten, weil dies oft nicht mit den Grenzen unseres Planeten vereinbar sei [BPD21]. Ebenso sei zu bedenken, dass die Entkoppelung durch die Digitalisierung, zumindest in den nächsten ein bis zwei Jahrzehnten, noch verstärkt würde [SPL20]. Weiterhin stellt sich die Frage, ob die Verbraucher*innen ihr Verhalten zu mehr Nachhaltigkeit anpassen und dadurch auch mehr für nachhaltige Produkte und Services zahlen würden [ebd.]. Aktuell ginge die Tendenz eher zu Geräten, welche einen höheren CO₂-Fußabdruck haben [BPD21; CAS21]. Da ein hoher Rebound-Effekt aus wirtschaftlicher Sicht wünschenswert sei [Hi12], bestünde eine besondere Herausforderung darin, diesen zu vermeiden. Derzeit kämen Einsparungen durch Effizienzsteigerungen dem Verbraucher als zusätzliches Einkommen zugute, das wiederum in anderen Bereichen ausgegeben werden kann, sodass Einsparungen in dem einen Bereich zu einem Konsumanstieg in einem anderen führen.

Weiter konnte festgestellt werden, dass sich IKT auch durchaus *positiv* auf die Klimakrise auswirken kann. Eine Lösung für die einseitige Kostenbetrachtung in Forschung und Datenerhebung könnte das „Life Cycle Assessment“ darstellen, wonach die ganze Lebenszeit eines IKT-Produktes für die Evaluation beachtet wird. Ein Ansatz zur Effizienzsteigerung sind vor allem die von Gorbenko et al. eingeführten „Green Economics“ sowie deren Herausforderungen Reduzierung, Erhöhung, Reuse und Recycle, sowie Recover und Renew [Go18]. Auch eine effiziente Zusammenarbeit von Software und Hardware sowie genaue Messungen der Umweltkosten könnten hier Abhilfe schaffen [St16, AL14, Go18]. Ebenfalls sollten Modelle und Konzepte zur Effizienzsteigerung entwickelt und umgesetzt werden [Go18]. Weitere Potenziale von IKT liegen in ihrer Ausweitung. So könne IKT in anderen Disziplinen wie der Industrie, Landwirtschaft und Verkehr eine Effizienzsteigerung bewirken, die sich positiv auf Emissionen, Energie und Ressourcennutzung auswirkt [SPL20, AL14]. Auch die technischen Innovationen, die IKT mit sich bringt, könnten zu einer erhöhten Interkonnektivität und geringeren Transfer- und Kommunikationskosten führen [MS21, WL12]. Der Umwelteinfluss sollte ebenso eine Rolle beim Erstellen eines Produktes sein wie die funktionalen Leistungsmerkmale und das ästhetische Design [St16]. Hierbei sollte den Nutzer*innen mehr Informationen geliefert werden, wie sie ihre Geräte effizienter nutzen können, um den Lebenszyklus eines Gerätes zu verlängern und dadurch den CO₂-Fußabdruck zu verringern. Genauso wird die Forschung vorangetrieben, neue, nachhaltigere, und besser recyclebare Materialien zu finden, um die Materialeffizienz jedes Geräts zu steigern. Rebound-Effekte bieten auch Potenziale zur Verbesserung der Umweltbelastung. So beschreiben Hilty et al. einen umgekehrten Rebound-Effekt, bei dem umweltfreundliche IKT-Produkte umweltschädliche Produkte aus anderen Bereichen substituieren [HLW11].

4.2 Zusammenwirkungen von Herausforderungen und Potenzialen

Einerseits kann eine höhere Effizienz in Industrie, Landwirtschaft Verkehr und Transport dazu beitragen, weniger Ressourcen zu verbrauchen und somit ökologisch nachhaltiger zu werden. Andererseits können die Folgen durch Rebound-Effekte und dem damit einhergehendem Wirtschaftswachstum zu einer noch stärkeren ökologischen Belastung führen. Negative Rebound-Effekte durch Substituierung von umweltschädlichen Produkten durch IKT-Produkte können dagegen zur ökologischen Nachhaltigkeit beitragen. Der Einfluss von IKT auf das Konsumverhalten der Nutzer*innen könnte hierbei eine Rolle spielen. Vor allem die Materialeffizienz ist hier in Verbindung zur Suffizienz und Konsistenz zu betrachten [HLW11]. Zum einen ist es wichtig, neue, nachhaltigere, besser recyclebare Materialien zur Herstellung der Geräte zu finden, aber zum anderen ebenso den Nutzer*innen den gesamten CO₂-Fußabdruck ihrer Geräte näher zu bringen.

Herausforderung	Potenzial
<ul style="list-style-type: none"> • Fokus von Forschung und Datenerhebungen • Produktions-, Wartungs-, Nutzungs- und Entsorgungskosten (Effizienz von Geräten) • Vermeidung von Rebound-Effekten • Konsumverhalten der Nutzer*innen 	<ul style="list-style-type: none"> • Life Cycle Assessment • Green Economics, Zusammenarbeit von Software und Hardware, genaue Messungen, Modelle und Konzepte zur Effizienzsteigerung • Effizienzerhöhung in Industrie, Landwirtschaft, Verkehr und Transport • Interkonnektivität und geringere Transfer-Kommunikationskosten • Positive Auswirkung auf Produktivität, Bildung und Wirtschaftswachstum • Substituierung umweltschädlicher Produkte durch umweltfreundliche IKT-Produkte

Tab. 2: Herausforderungen und Potenziale von IKT

5 Fazit

In dieser Arbeit wurden die Herausforderungen und Potenziale von IKT in Bezug auf die nachhaltige Effizienz in der Klimakrise untersucht und dargestellt. Dabei wurden vor allem Green IKT und der Rebound-Effekt mit Blick darauf betrachtet, wie sich diese auf die Nachhaltigkeit und Effizienz auswirken. Die in der Literaturrecherche identifizierten Überthemen Greening durch IKT, Greening von IKT, Einfluss der Nutzer*innen und Rebound Effekt strukturierten folglich die Rechercheergebnisse, um die Herausforderungen und Potenziale von IKT und deren Wechselwirkungen darzustellen. Limitiert ist diese Recherche dabei durch die begrenzte Anzahl der untersuchten Artikel und die eingeschränkten Suchbegriffe. Insgesamt zeigt sich, dass es bislang an Studien und Betrachtungen von IKT in Bezug auf das Zusammenspiel der drei Nachhaltigkeitsstrategien Effizienz, Suffizienz und Konsistenz in der Klimakrise mangelt. Diese Arbeit stellt jedoch eine Vielzahl an Möglichkeiten der Effizienzsteigerungen von und durch IKT dar, die das enorme Potenzial von IKT zum Umweltschutz verdeutlichen.

Die großen Einflüsse von IKT und die komplexen Verstrickungen über alle drei Säulen der Nachhaltigkeit hinweg sind in ihrer Gesamtheit schwer zu erfassen. So führt technologischer Fortschritt als Ursache für Effizienzsteigerungen im IKT-Bereich in erster Linie zu einem Wirtschaftswachstum, dessen Nachhaltigkeit nicht zwangsläufig gegeben ist. Um diese zu gewährleisten, müssten Inputfaktoren begrenzt werden. Potenzielles Wachstum müsse also aufgrund von Effizienzsteigerungen durch Konzepte der nachhaltigen Suffizienz oder Konsistenz reguliert werden. Dieses Zusammenspiel der drei Nachhaltigkeitsstrategien sollte in zukünftigen Forschungsarbeiten genauer untersucht werden. Um die Chancen und Potenziale von IKT zu nutzen und die Herausforderungen zu bewältigen ist

also eine interdisziplinäre Zusammenarbeit notwendig. Somit bleibt es zukünftigen Forschungsarbeiten offen, aktuelle Erkenntnisse zu den dargestellten Themen einzuholen. Dabei kann diese Arbeit als Orientierung für zu beobachtende Herausforderungen und Potenziale und deren Wechselwirkungen dienen. Auch Weiterentwicklungen in den genannten Bereichen können auf diese Arbeit aufbauen.

Danksagung

Diese Arbeit wurde aus Mitteln des Zweckvermögens des Bundes bei der Landwirtschaftlichen Rentenbank im Rahmen des Projekts GeoBox II sowie AgriRegio gefördert.

Literaturverzeichnis

- [ACP19] Akande, A., Cabral, P., und Casteleyn, S.: Assessing the Gap between Technology and the Environmental Sustainability of European Cities. *Inf Syst Front* 21/ 3, pp. 581–604, 2019
- [AL14] Aleksic, S.: Green ICT for sustainability: A holistic approach. In 37th International Convention, pp. 426–431, 2014.
- [AGS17] Añón Higón, D., Gholami, R., und Shirazi, F.: ICT and environmental sustainability: A global perspective. *Telematics and Informatics* 34/4, pp. 85–95, 2017.
- [ALB17] Asongu, S., Le Roux, S., und Biekpe, N.: Enhancing ICT for Environmental Sustainability in Sub-Saharan Africa. *SSRN Journal*, 2017.
- [BA19] Bastida, L., Cohen, J.J., Kollmann, A., Moya, A., und Reichl, J.: Exploring the role of ICT on household behavioural energy efficiency to mitigate global warming. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, pp. 455–462, 2019.
- [BE08] Berker, T.: Energienutzung im Heim als soziotechnische Praxis. In (Fischer, C., ed): *Strom sparen im Haushalt. Oekom, München*, pp. 175-192, 2008.
- [BH18] Bieser, J., und Hilty, L.: Assessing Indirect Environmental Effects of Information and Communication Technology (ICT): A Systematic Literature Review. *Sustainability* 10/8, 2662, 2018.
- [BM16] Bokolo, A.J., und Mazlina, A.M.: Development of a Green ICT Model for Sustainable Enterprise Strategy. *JSCDSS*, 3/3, pp. 1-12, 2016.
- [BPD21] Bol, D., Pirson, T., und Dekimpe, R.: Moore's Law and ICT Innovation in the Anthropocene, pp. 19–24, 2021.
- [R113] Rivera, M., Håkansson, C., Svenfelt, Å., und Finnveden, G.: Including second order effects in environmental assessments of ICT. *Environmental Modelling & Software* 56, pp. 105–115, 2014.
- [CLS13] Caird, S., Lane, A., und Swithenby, E.: ICTs and the Design of Sustainable Higher Education Teaching Models: An Environmental Assessment of UK Courses. In (CAIRO,

- S., FILHO, W.L., JABBOUR, C. UND AZEITEIRO, U.M: ED.), *Sustainability Assessment Tools in Higher Education Institutions*. Springer International Publishing, Cham, pp. 375–385, 2013.
- [CE14] Cecere, G., Corrocher, N., Gossart, C., und Ozman, M.: Technological pervasiveness and variety of innovators in Green ICT: A patent-based analysis. *Research Policy* 43/10, pp. 1827–1839, 2014.
- [CH21] Chatti, W.: Moving towards environmental sustainability: information and communication technology (ICT), freight transport, and CO2 emissions. *Heliyon* 7/10, e08190, 2021.
- [CH14] Chitnis, M., Sorrell, S., Druckman, A., Firth, S.K., und Jackson, T.: Who rebounds most? Estimating direct and indirect rebound effects for different UK socioeconomic groups. *Ecological Economics*, 106, pp. 12–32, 2014.
- [CAS21] Cordella, M., Alfieri, F., und Sanfelix, J.: Reducing the carbon footprint of ICT products through material efficiency strategies: A life cycle analysis of smartphones. *Journal of Industrial Ecology* 25/2, pp. 448–464, 2021.
- [Do00] Downey, M.: Workshop on implications of the new digital economy on transportation: developing research and data needs, 2000.
- [DR13] Drangmeister, J., Kern, E., Naumann Stefan, Sparmann, G., und Guldner, A.: *Greening Software with Continuous Energy Efficiency Measurement*, 2013.
- [FA12] Falch, M.: Environmental Impact of ICT on the Transport Sector. In (HADJANTONIS, A.M. AND STILLER, B. ed.) *Telecommunication Economics*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 126–137, 2012.
- [FV20] Freire-Gonzalez, J., und Vivanco, D.F.: Pandemics and the Environmental Rebound Effect: Reflections from COVID-19. *Environ Resource Econ*, 2020.
- [FR21] Freitag, C., Berners-Lee, M., Widdicks, K., Knowles, B., Blair, G.S., und Friday, A.: The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations. *Patterns* (New York, N.Y.) 2/9, pp. 0–18, 2021.
- [GA15] Galvin, R.: The ICT/electronics question: Structural change and the rebound effect. *Ecological Economics* 120, pp. 23–31, 2015.
- [Go18] Gorbenko, A., Tarasyuk, O., Kor, A.-L., und Kharchenko, V.: Green economics: A roadmap to sustainable ICT development. In (IEEE ed.) *9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, pp. 561–567, 2018.
- [Go15] Gossart, C.: Rebound Effects and ICT: A Review of the Literature. In (HILTY, L.M. ed.) *ICT Innovations for Sustainability*, Springer International Publishing AG, Cham, pp. 435–448, 2015.
- [GGD00] Greening, L.A., Greene, D.L., und Difiglio, C.: Energy efficiency and consumption — the rebound effect — a survey. *Energy Policy* 28/6-7, pp. 389–401, 2000.
- [HF15] Hakansson, C. und Finnweden, G.: Indirect rebound and reverse rebound effects in the ICT-sector and emissions of CO2. *Proceedings of EnviroInfo and ICT for Sustainability 2015. Advances in Computer Science Research*, 66-73, 2015.

- [HA14] Hankel, A.: Understanding Higher Order Impacts of Green ICT, 2014.
- [HA14B] Hankel, A., Oud, L., Saan, M., und Lago, P.: A Maturity Model for Green ICT: The case of the SURF Green ICT Maturity Model, 2014.
- [HR02] Herring, H., und Roy, R.: Sustainable services, electronic education and the rebound effect. *Environmental Impact Assessment Review* 22/5, pp. 525–542, 2002.
- [HK20] Hickel, J., und Kallis, G.: Is Green Growth Possible? *New Political Economy* 25/4, pp. 469–486, 2020
- [Hi12] Hilty, L.: Why energy efficiency is not sufficient—some remarks on “Green by IT”. In (Arndt, H.-K., Knetsch, G. und Pillmann, W., eds.): *EnviroInfo Dessau 2012, Part 1: Core Application Areas*. Shaker Verlag, Aachen, 2012.
- [HLW11] Hilty, L., Lohmann, W., und Huang, E.M.: Sustainability and ICT - An overview of the field. *Notizie di Politeia* 27/104, pp. 13-28, 2011. <https://www.zora.uzh.ch/id/eprint/55640/>.
- [Hi08] Hilty, L.M.: Information technology and sustainability. *Essays on the relationship between ICT and sustainable development*. Books on Demand, Norderstedt, 2008.
- [HA15] Hilty, L.M., und Aebischer, B.: ICT for Sustainability: An Emerging Research Field. In (HILTY, L.M. ed.) *ICT Innovations for Sustainability*, Springer International Publishing AG, Cham, pp. 3–36, 2015.
- [HRA21] Hofmann, J., Ricci, C., und Ansu-Holz, D.: IT und Nachhaltigkeit – eine Einführung. *HMD* 58/1, pp. 6–23, 2021.
- [HR02] Hoogeveen, M.J., und Reijnders, L.: E-commerce, paper and energy use: a case study concerning a Dutch electronic computer retailer. *IJEP* 18/6, 541, 2002.
- [HSA16] Horner, N.C., Shehabi, A., und Azevedo, I.L.: Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology. *Environ. Res. Lett.* 11/10, 103001, 2016.
- [Jo19] Joyce, P.J., Finnveden, G., Håkansson, C., und Wood, R.: A multi-impact analysis of changing ICT consumption patterns for Sweden and the EU: Indirect rebound effects and evidence of decoupling. *Journal of Cleaner Production* 211, pp. 1154–1161, 2019.
- [KSA20] Khan, F.N., Sana, A., und Arif, U.: Information and communication technology (ICT) and environmental sustainability: a panel data analysis. *Environ Sci Pollut Res Int* 27/29, pp. 36718–36731, 2020.
- [Ku2] Kuntke, F., Linsner, S., Steinbrink, E., Franken, J., Reuter, C.: Resilience in Agriculture: Communication and Energy Infrastructure Dependencies of German Farmers. *International Journal of Disaster Risk Science (IJDRS)*, 13, pp. 214–229, 2022.
- [LW19] Liao, M., und Wang, L.: China's Energy Consumption Rebound Effect Analysis Based on the Perspective of Technological Progress. *Sustainability* 11/5, p. 1461, 2019.
- [Li21] Linsner, S., Kuntke, F., Steinbrink, E., Franken, J., Reuter, C.: The Role of Privacy in Digitalization – Analysing the German Farmers’ Perspective Proceedings on Privacy Enhancing Technologies. *Proceedings on Privacy Enhancing Technologies (PoPETs)*, 3, pp. 334–350, 2021.

-
- [MS21] Mahdavi, S., und Sojoodi, S.: Impact of ICT on Environment, 2021. PREPRINT (Version 1) available at Research Square [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1020622/v1>].
- [MA18] Majeed, M.T.: Information and Communication Technology (ICT) and Environmental Sustainability in Developed and Developing Countries. *Pakistan Journal of Commerce and Social Sciences* 12/3, pp. 758–783, 2018.
- [MA21] Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, N. Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., und Zhou, B.: IPCC, 2021: Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, IPCC, Cambridge University Press, 2021.
- [MA11] Maxwell, D., McAndrew, L., Owen, P., Muehmel, K., und Neubauer, A.: Addressing the Rebound Effect. A report for the European Commission DG Environment, 2011.
- [Ni20] Nizam, H.A., Zaman, K., Khan, K.B., Batool, R., Khurshid, M.A., Shoukry, A.M., Sharkawy, M.A., Aldeek, F., Khader, J., und Gani, S.: Achieving environmental sustainability through information technology: "Digital Pakistan" initiative for green development. *Environ Sci Pollut Res Int* 27/9, pp. 10011–10026, 2020.
- [NÜ18] Nüssel, M.: Landwirtschaft 4.0 – die Waffe gegen Hunger und Umweltzerstörung? In (C. BÄR, T. GRÄDLER UND R. MAYR ED.) *Digitalisierung im Spannungsfeld von Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Recht*, Springer Gabler, Berlin, pp. 343–363, 2018.
- [PHF19] Pohl, J., Hilty, L.M., und Finkbeiner, M.: How LCA contributes to the environmental assessment of higher order effects of ICT application: A review of different approaches. *Journal of Cleaner Production* 219, pp. 698–712, 2019.
- [QU19] Qureshi, S.: Climate change adaptation for sustainable development: the information and communication technology (ICT) paradox. *Information Technology for Development* 25, 4, pp. 625–629, 2019.
- [RO12] Röpke, I.: The unsustainable directionality of innovation – The example of the broadband transition. *Research Policy* 41, 9, pp. 1631–1642, 2012.

- [SPL20] Santarius, T., Pohl, J., und Lange, S.: Digitalization and the Decoupling Debate: Can ICT Help to Reduce Environmental Impacts While the Economy Keeps Growing? *Sustainability* 12, 18, 7496, 2020.
- [Sc13] Schien, D., Shabajee, P., Yearworth, M., und Preist, C.: Modeling and Assessing Variability in Energy Consumption During the Use Stage of Online Multimedia Services. *Journal of Industrial Ecology* 17, 6, pp. 800–813, 2013.
- [So07] Sorrell, S.: The Rebound Effect: An Assessment of the Evidence for Economy-Wide Energy Savings from Improved Energy Efficiency. UK Energy Research Centre, 2007. <https://ukerc.ac.uk/publications/the-rebound-effect-an-assessment-of-the-evidence-for-economy-wide-energy-savings-from-improved-energy-efficiency/>
- [SBB20] Stephan, B., Büttner, L., und Breitkreuz, A.: Arbeiten nach Corona. Warum Homeoffice gut fürs Klima ist. Werkstattbericht / IZT, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung 119. Greenpeace e.V, Hamburg, 2020.
- [St16] Stobbe, L., Proske, M., Beucker, S., Hintemann, R., und Lang, K.-D.: Energy efficiency of ICT: Further improvement through customized products. In (IEEE ed.) 2016 Electronics Goes Green 2016+ (EGG), pp. 1–7, 2016.
- [SR02] Sui, D.Z., und Rejeski, D.W.: Environmental impacts of the emerging digital economy: the e-for-environment e-commerce? *Environmental management* 29, 2, pp. 155–163, 2002.
- [TA04] Takahashi, K.I., Tatemichi, H., Tanaka, T., Nishi, S., und Kunioka, T.: Environmental impact of information and communication technologies including rebound effects. In (IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRONICS AND THE ENVIRONMENT ed.), Conference Record, pp. 13–16, 2004.
- [VE17] Verdecchia, R., Ricchiuti, F., Hankel, A., Lago, P., und Procaccianti, G.: Green ICT Research and Challenges. In (V. WOHLGEMUTH, F. FUCHS-KITTOWSKI UND J. WITTMANN, Eds.) *Advances and New Trends in Environmental Informatics*, Springer International Publishing, Cham, pp. 37–48, 2017.
- [Vo09] vom Brocke, J., Simons, A., Niehaves, B.B., Riemer, K., und Cleven, A.: Reconstructing the Giant: On the Importance of Rigour in Documenting the Literature Search Process, 2009.
- [WL12] Welfens, P.J.J., und Lutz, C.: Green ICT dynamics: key issues and findings for Germany. *Miner Econ* 24, 2-3, pp. 155–163, 2012.
- [YT07] Yi, L., und Thomas, H.R.: A review of research on the environmental impact of e-business and ICT. *Environment international* 33, 6, pp. 841–849, 2007.
- [ZTB09] Zapico, J.L., Turpeinen, M., und Brandt, N.: Proceedings of the 4th International Conference on Persuasive Technology. ACM Other conferences. ACM, New York, NY, 2009.