

TEXTE

75/2026

Abschlussbericht

Rebound-Effekte durch digitale Leistungen und Produkte

von:

Dr. Siegfried Behrendt, Christine Henseling, Marguerite Sievi
IZT-Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH, Berlin
Ulrich Lorenz
Systemic Futures, Leipzig

Kai Neumann
Consideo GmbH, Lübeck

Prof. em. Dr. Lorenz Hilty
Universität Zürich

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 75/2026

REFOPLAN des Bundesministeriums Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3723 11 60 10

Abschlussbericht

Rebound-Effekte durch digitale Leistungen und Produkte

von

Dr. Siegfried Behrendt, Christine Henseling, Marguerite
Sievi
IZT-Institut für Zukunftsstudien und
Technologiebewertung gGmbH, Berlin

Ulrich Lorenz
Systemic Futures, Leipzig

Kai Neumann
Consideo GmbH, Lübeck

Prof. em. Dr. Lorenz Hilty
Universität Zürich

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

IZT Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH
Schopenhauerstraße, 26
14129 Berlin

Abschlussdatum:

Juni 2025

Redaktion:

Referat Z 2.3 Digitale Transformation und Beratungsstelle Green IT
Dirk Osiek

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8097>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Mai 2026

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen*Autoren

Kurzbeschreibung

Wenn erwartete Umweltentlastungseffekte von Digitalisierungslösungen durch Nebenwirkungen relativiert oder sogar überkompensiert werden, sprechen wir von Rebound-Effekten der Digitalisierung. Anhand von 28 konkreten Digitalisierungsbeispielen - vom Smart-Home über die 5G Netze bis hin zur Additiven Fertigung - hat das Projekt Wirkmechanismen der Digitalisierung untersucht. Dabei zeigt sich, dass Rebound-Effekte der Digitalisierung tief in wirtschaftliche Wachstumslogiken eingebettet sind. Immer effizientere digitale Produkte treiben die Nachfrage nach neuen Anwendungen, wodurch ältere Produkte schneller obsolet werden. Digitale Plattformen verfolgen datenbasierte Wachstumsstrategien, bei denen Effizienzgewinne dazu genutzt werden, neue Märkte zu erschließen und den Konsum zu steigern. Die Skalierung datengetriebener Geschäftsmodelle führt zu einem exponentiellen Anstieg des Datenverkehrs, was mit steigenden Infrastrukturbedarfen und steigendem Energieverbrauch einhergeht. Die systemische Analyse der Rebound-Effekte der Digitalisierung zeigt, dass es keine einfachen, eindimensionalen Lösungen gibt, um Rebound-Effekten entgegenzuwirken. Sechs zentrale umweltpolitische Hebel wurden identifiziert, die Rebound-Effekte mindern können. So können bessere Lösungen gefördert und gefordert werden (z. B. Top-Runner-Initiativen), kann der ökologische Rucksack der Lösungen minimiert werden (offene Schnittstellen, Recht auf Reparatur etc.), die Digitalisierung eingegrenzt werden (Digitalsteuer), können die Rohstoffe und Energiebedarfe besteuert werden und die Nutzer aufgeklärt werden (ökologische Fuß- und Handabdrücke von Produkten und Leistungen, Ermittlung und Kommunikation von Rebound-Effekten etc.). Schließlich kann durch eine lenkende Steuer auf nicht-nachhaltige Produkte die Verwendung der Effizienzgewinne durch Digitalisierung beeinflusst werden (z. B. durch differenzierte Steuersätze auf der Konsumseite). Die Wirkungszusammenhänge zeigen selbstverstärkende Wirkungsschleifen, welche die Wirksamkeit von Instrumenten und Maßnahmen verstärken können, und ausgleichende Wirkungsschleifen etwa über die Kaufkraft, welche auch die Rebound-Effekte relativieren. Technikzentrierte Effizienzstrategien reichen allein nicht aus, da sie häufig neue Konsummuster anregen – etwa durch niedrigere Kosten oder Komfortgewinne. Maßnahmen wie Caps, Digitalsteuern oder Regulierungen sind schwer umsetzbar in globalisierten Märkten. Deshalb ist eine mehrdimensionale, strategische Steuerung notwendig, die neben Effizienz auch Suffizienz (Weniger ist mehr) und Konsumqualität einbezieht. Aufklärung, transparente Produktinformationen, Kreislaufwirtschaft und differenzierte Steuern können helfen, Effizienzgewinne nicht in Mehrverbrauch münden zu lassen.

Abstract

When expected environmental benefits of digitalisation solutions are relativised or even overcompensated by side effects, we speak of rebound effects. Using 28 specific examples of digitalisation - from smart homes and 5G networks to additive manufacturing - the project has investigated the mechanisms of digitalisation. The results show that the rebound effects of digitalisation are deeply embedded in economic growth logic. Increasingly efficient digital products are driving demand for new applications, making older products obsolete more quickly. Digital platforms are pursuing data-based growth strategies in which efficiency gains are used to open up new markets and increase consumption. The scaling of data-driven business models leads to an exponential increase in data traffic, which is accompanied by rising infrastructure requirements and increasing energy consumption. The systemic analysis of the rebound effects of digitalisation shows that there are no simple, one-dimensional solutions to counteract rebound effects. Six central environmental policy levers were identified that can minimise rebound effects. For example, better solutions can be promoted and demanded (e.g. top-runner initiatives), the ecological rucksack of solutions can be minimised (open interfaces,

right to repair, etc.), digitalisation can be limited (digital tax), raw materials and energy requirements can be taxed and users can be educated (ecological footprints and handprints of products and services, identification and communication of rebound effects, etc.). Finally, a steering tax on non-sustainable products can influence the use of efficiency gains through digitalisation (e.g. through differentiated VAT rates). The interdependencies show self-reinforcing effect loops, which can strengthen the effectiveness of instruments and measures, and balancing effect loops, for example via purchasing power, which also relativise the rebound effects. Technology-centred efficiency strategies alone are not enough, as they often stimulate new consumption patterns - for example through lower costs or gains in convenience. Measures such as caps, digital taxes or regulations are difficult to implement in globalised markets. Multidimensional, strategic management is therefore necessary, which includes sufficiency (less is more) and consumption quality in addition to efficiency. Education, transparent product information, a circular economy and differentiated taxes can help to ensure that efficiency gains do not result in increased consumption.

Inhaltsverzeichnis

Kurzbeschreibung.....	5
Abstract	5
Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
Zusammenfassung.....	11
Summary	15
1 Einleitung.....	20
1.1 Zielsetzung der Studie	20
1.2 Was ist ein Rebound und was nicht?	21
1.3 Ermittlung von Rebound-Effekten	22
1.4 Wirkmechanismen	24
1.5 Vorgehensweise.....	27
2 Ergebnisse der Analyse von Fallbeispielen.....	29
2.1 Datenbasis.....	29
2.2 Rebound-Effekte auf Ebene der Haushalte	30
2.3 Rebound-Effekte im Bereich der Unternehmen	33
2.4 Rebound-Effekte auf Ebene der Technologien	38
2.5 Ausmaß von Rebound-Effekten	43
2.6 Rebound-verstärkende und Rebound-mindernde Faktoren	44
3 Umweltpolitische Maßnahmen und Instrumente zur Eindämmung von Rebound-Effekten	52
3.1 Handlungsansätze	53
3.2 Kritische Reflektion der identifizierten Maßnahmen	63
3.3 Vertiefende Fallbetrachtungen.....	63
3.3.1 Fall 1: E-Commerce	63
3.3.2 Fall 2: Künstliche Intelligenz in Logistik / Künstliche Intelligenz in Produktion und Fertigung.....	70
3.3.3 Fall 3: Zukunftstechnologie Metaverse.....	75
3.4 Reflexion zu den Maßnahmen und Instrumenten.....	81
4 Resümee: Diskussion und Schlussfolgerungen	84
A Anhang zu den Fallbeispielen.....	87
A.1 Haushalte	87
A.1.1 E-Commerce.....	87

A.1.2	Online-Plattformen für Peer-to-Peer Sharing.....	90
A.1.3	Online-Plattformen für Gebrauchtwarenhandel	93
A.1.4	Online-Plattformen für Tourismus/ Peer-to-Peer Apartment Sharing.....	97
A.1.5	Streaming Media.....	100
A.1.6	E-Books	104
A.1.7	Digitale Zeitung	106
A.1.8	Smart Home	109
A.1.9	Smart Metering.....	111
A.1.10	Autonomes Fahren	115
A.1.11	Routenplanungs- und Navigationsysteme.....	119
A.2	Unternehmen.....	120
A.2.1	Precision Farming.....	120
A.2.2	Cyber Physical Systems in der Produktion.....	123
A.2.3	Additive Fertigung.....	126
A.2.4	Digitaler Produktpass.....	129
A.2.5	Home-Office.....	132
A.2.6	Videokonferenzen.....	136
A.2.7	Mobility-as-a-Service	138
A.2.8	“Smarte” Transportlogistik	140
A.2.9	Metaverse	143
A.3	Technologie.....	146
A.3.1	Mobilfunknetze 5G/6G	146
A.3.2	Rechenzentren	149
A.3.3	Software.....	151
A.3.4	Cloud Computing	155
A.3.5	Künstliche Intelligenz	157
A.3.6	Augmented and Virtual Reality.....	160
A.3.7	Quantencomputing.....	164
A.3.8	Digitaler Zwilling	165
B	Anhang zur Systemanalyse.....	169
B.1	Vorgehensweise AP 2.....	170
B.2	Qualitatives Gesamtmodell über alle Fallbeispiele.....	171
B.3	Generisches Modell über die Rebound-Typen	174
B.4	Systemisches Modell über die zentralen Dynamiken	174

B.5	Mini-Modelle zur Veranschaulichung von Plattform-Logiken	177
	Literaturverzeichnis	180

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Unterscheidungsmerkmale bei Rebound-Effekten	22
Abbildung 2:	Vorgehensweise nach Arbeitsschritten	27
Abbildung 3:	Modellausschnitt zu den Dynamiken hinter Konsum	32
Abbildung 4:	Modellausschnitt zu den Dynamiken hinter Unternehmen.....	37
Abbildung 5:	Gefilterte Ansicht der Zusammenhänge zwischen den Fallbeispielen	41
Abbildung 6:	Modellausschnitt zu den Dynamiken mit Blick auf Suffizienz ..	51
Abbildung 7:	Ausschnitt aus dem systemischen Modell: Überblick über die Ansatzpunkte	55
Abbildung 8:	Vorgehensweise bei der systemischen Modellierung.....	170
Abbildung 9:	Screenshot der Software iMODELER mit Blick auf das detaillierte Gesamtmodell	172
Abbildung 10:	Screenshot einer Erkenntnis-Matrix aus dem detaillierten Gesamtmodell	173
Abbildung 11:	Screenshot der Software iMODELER mit Blick auf das generische Modell	174
Abbildung 12:	Systemisches Ursache-Wirkungsmodell über die zentralen Dynamiken.....	176
Abbildung 13:	Screenshot der Software iMODELER mit Blick auf das quantitative Mini-Modell	177
Abbildung 14:	Screenshot der Software iMODELER mit Blick auf das qualitative Mini-Modell	178

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Fallbeispiele mit nachgewiesenen oder vermuteten Rebound- Effekten	28
Tabelle 2:	Übersicht der identifizierten Rebound-Effekte in der untersuchten Literatur zu Fallbeispielen im Bereich Haushalte	30
Tabelle 3:	Übersicht der identifizierten Rebound-Effekte in der untersuchten Literatur zu Fallbeispielen im Bereich Unternehmen	33
Tabelle 4:	Übersicht der identifizierten Rebound-Effekte in der untersuchten Literatur zu Fallbeispielen im Bereich Technologie	38
Tabelle 5:	Rebound-verstärkende und Rebound-mindernde Faktoren.....	44

Tabelle 6: Maßnahmen und Instrumente zur Minderung von Rebound-Effekten58

Abkürzungsverzeichnis

5G/6G	5. bzw. 6. Mobilfunkgeneration
AR/VR	Augmented Reality/Virtual Reality
B2B	Business-to-Business
Bitkom	Branchenverband der deutschen Informations- und Telekommunikationsbranche
C2C	Consumer-to-Consumer
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism (CO2-Grenzausgleichsmechanismus)
CO₂-eq	Kohlendioxid (CO ₂)-Äquivalente
CPS	Cyber Physical Systems
DPP	Digitaler Produktpass
IKT	Informations- und Kommunikationstechniken
IoT	Internet of Things
GeSi	Global eSustainability Initiative
KI	Künstliche Intelligenz
LKW	Lastkraftwagen
Maas	Mobility-as-a-Service
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MLP	Multi-Level-Perspektive
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
P2P	Peer-to-Peer
PKW	Personenkraftwagen
PoS	Proof of Stake
PoW	Proof of Work
THG	Treibhausgas
V2x	Vehicle-to-everything
VDI	Virtuelle Desktop Infrastruktur

Zusammenfassung

Die Digitalisierung verspricht in unterschiedlichsten Bereichen große Effizienzgewinne und Umweltentlastungen – von der Produktion über den Konsum bis hin zur Optimierung von Infrastrukturen. Inwieweit die Potenziale zur Ressourcenschonung und zum Klimaschutz durch digitale Leistungen und Produkte tatsächlich realisiert werden, hängt aber stark von den Annahmen, Nutzungs- und Rahmenbedingungen ab. Rebound-Effekte haben dabei besondere Aufmerksamkeit verdient, da sie die Gefahr bergen, positive Effekte zu verringern oder gar ins Gegenteil zu verkehren.

Mit Blick darauf trägt das Forschungsprojekt dazu bei, Rebound-Effekte der Digitalisierung besser zu verstehen und daraus Schlussfolgerungen für den Umgang mit ihnen aus umweltpolitischer Perspektive abzuleiten.

Das Projekt ging dazu in drei Schritten vor:

1. Insgesamt 28 Beispiele für Digitalisierung aus den Bereichen Privathaushalte, Unternehmen und Technologie wurden anhand einer Literaturrecherche auf potenzielle Rebound-Effekte hin untersucht. Hieraus wurden generelle Wirkmechanismen identifiziert. Die Datenlage zu den Fallbeispielen ist dabei insgesamt recht dünn. Zudem zeigte sich, dass die Digitalisierung in ihrer technologischen Entwicklung und praktischen Anwendung ein sehr dynamisches und schnelllebiges Thema ist und auch insgesamt die Datenlage der Fallbeispiele begrenzt ist.
2. Die Fallbeispiele mit ihren Wirkmechanismen wurden in ein umfangreiches qualitatives Ursache-Wirkungsmodell übertragen. Daraus wurden die grundsätzlichen Preis-, Zeit-, Komfort-Rebound-Effekte sowie die materiellen und psychologischen Rebound-Effekte in ein zusammenfassendes Modell übernommen, um die Wirkmechanismen besser zu erfassen. Insbesondere mit der Betrachtung längerer Wirkungsketten werden systemisch einige übergeordnete Dynamiken deutlich, die zum einen Möglichkeiten der politischen Steuerung limitieren und zum anderen Hebel (oder deren Kombination) zur Beeinflussung von Rebound-Effekten nahelegen.
3. In einem Online-Expertenworkshop wurden die systemischen Erkenntnisse eingeordnet, bewertet und mögliche Handlungsbedarfe sowie -optionen für die Politik diskutiert. Darauf basierend wurden Hebel identifiziert und anhand von Vertiefungsbeispielen auf ihre Plausibilität hin geprüft, um letztlich Handlungsempfehlungen für die Politik zu geben.

Im Vergleich zu Rebound-Effekten bei der Energienutzung, die bislang im Fokus von Studien zu diesem Phänomen stehen, sind Rebound-Effekte durch Digitalisierung wenig untersucht. Sie sind deutlich vielschichtiger und es gibt zum Teil andere und komplexere Wirkmechanismen. Digitale Dienstleistungen, Technologien und Produkte wirken nicht nur direkt und indirekt auf die Umwelt ein, sie verändern auch Produktion, Konsummuster und Lebensstile. Die damit verbundenen ökologischen Effekte wirken systemisch und werden auf Makroebene erst langfristig sichtbar, wenn sie überhaupt eindeutig zuzuordnen sind.

Die Digitalisierung treibt durch datenbasierte Geschäftsmodelle, Künstliche Intelligenz und Plattformökonomien erhebliche Effizienzsteigerungen in zahlreichen Wirtschaftsbereichen voran. Beispiele hierfür sind die optimierte Ressourcennutzung durch digitale Zwillinge, KI-gesteuerte Logistik oder smarte Energiemanagementsysteme, die Reduktion materieller Produktion durch Virtualisierung von Prozessen (z. B. Cloud Computing, digitale Medien anstelle physischer Datenträger) und erweiterte Nutzungspotenziale durch Sharing-Modelle und Secondhand-Plattformen. Diese Effizienzgewinne werden jedoch häufig durch verschiedene Formen von Rebound-Effekten abgeschwächt oder sogar aufgehoben.

Wirkmechanismen

Vier Rebound-Typen lassen sich unterscheiden: **Preis-, Komfort-, Zeit- und materieller Rebound-Effekt**. Diese können sowohl zu direkten als auch zu indirekten Rebound-Effekten führen und sich makroökonomisch niederschlagen. Grundsätzlich wirken dieselben Mechanismen, wie sie bei der Energienutzung bekannt sind, auch bei Rebound-Effekten der Digitalisierung. Insbesondere sind **Preis-Rebound-Effekte** festzustellen:

- ▶ **Kostensenkungseffekte:** Kostensenkungen durch effizientere Hardware oder Software führen zu einer intensiveren Nutzung digitaler Technologien. Beispielsweise steigern effizientere Datenkomprimierung und Netzwerktechnologien den Datenverbrauch insgesamt.
- ▶ **Einkommenseffekte:** Durch Produktivitätssteigerungen infolge der Digitalisierung steigt das verfügbare Einkommen. Ein Teil dieses Einkommens wird für den Konsum zusätzlicher Produkte oder Dienstleistungen verwendet, was den Umweltvorteil der Effizienzgewinne neutralisieren kann.

Darüber hinaus konnte eine Reihe von Mechanismen identifiziert werden, die im Kontext der Digitalisierung besonders relevant sind. Dazu gehören folgende Effekte:

- ▶ **Geringe Marktzutrittsschranken und Marktexpansionseffekte:** Der Wettbewerb innerhalb der Systemgrenzen einer digitalen Plattform ist geprägt von sehr geringen Marktzutrittsschranken. Dies ermöglicht es neuen Anbietern auf der Plattform sehr schnell als Konkurrenz aufzutreten. Die Folge sind weitgehend streitbare Märkte und so eine Erhöhung der Produktions- und Konsummengen.
- ▶ **Automatisierung und Komfort-Rebound-Effekte:** Effizienzsteigerungen durch digitale Services (z. B. Sprachassistenten, Smart Homes) senken psychologische Hürden für die Nutzung, wodurch Menschen diese häufiger und länger verwenden. Smarte Heizsysteme senken beispielsweise den Energieverbrauch pro Einheit, können aber dazu führen, dass Räume häufiger oder länger beheizt werden.
- ▶ **Zeit-Rebound-Effekte:** Effiziente Technik und Prozesse oder Arbeitszeitverkürzung pro Zeiteinheit ermöglichen durch die Zeiteinsparung weitere Handlungen mit zusätzlichem Energie- und Ressourcenverbrauch. Daher kann die tatsächliche Reduktion des Energie- und Ressourcenverbrauches durch weitere Handlungen geringer ausfallen als erwartet. Dies zeigt sich bei sehr vielen digitalen Anwendungen, z. B. bei Videokonferenzen, E-Commerce oder 5G-Mobilfunknetzen.
- ▶ **Materielle Rebound-Effekte:** Materielle Rebound-Effekte sind darauf zurückzuführen, dass effizientere Technologien eine Mehrnachfrage nach Energie und Material bewirken. Effizienzsteigerung von Energie- und Ressourcennutzung führt beispielsweise dazu, mehr Produkte abzusetzen, Produkte mit neuen Features auszustatten oder zum Angebot ganz neuer Produkte und Produktsysteme.
- ▶ **Verlagerung von Umweltbelastungen:** Eine Entlastung in einem Bereich kann zu neuen Belastungen in anderen führen. Beispielsweise kann eine Reduzierung des Energieverbrauchs durch effizientere Geräte mit einem erhöhten Bedarf an kritischen Rohstoffen für deren Herstellung einhergehen.
- ▶ **Software- und vernetzungsabhängige Pfadabhängigkeiten:** Digitale Technologien können bestehende Strukturen verfestigen oder neue Abhängigkeiten schaffen. Wenn beispielsweise eine Infrastruktur nur eine weniger effiziente Lösung unterstützt, kann eine

effektivere Alternative nicht mehr umgesetzt werden. Ein Beispiel ist die langfristige Bindung an proprietäre Software, die einen Wechsel zu nachhaltigeren oder kostengünstigeren Alternativen erschwert.

- ▶ **Indirekte Effekte:** Einige Wirkungen sind eher indirekt und schwer zu fassen. So kann etwa eine Verbesserung der Effizienz von Grafikkarten dazu führen, dass Nutzer mehr Videos in höherer Auflösung konsumieren, wodurch der Gesamtenergiebedarf der Rechenzentren von Streaming Plattformen weiter ansteigt.
- ▶ **Lock-In Effekte:** Digitale Produkte funktionieren oft besonders gut im Zusammenspiel mit anderen Geräten desselben Herstellers. Das führt zur Herstellerabhängigkeit und zu neuen Bedarfen.
- ▶ **Beschleunigung von Innovationszyklen:** Immer effizientere digitale Produkte treiben die Nachfrage nach neuen Anwendungen, wodurch ältere Technologien schneller obsolet werden. Fortschritte in der KI führen beispielsweise zu neuen Software-Generationen, die wiederum leistungsfähigere Hardware erfordern. Softwarebasierte Obsoleszenz ist ein spezieller Mechanismus. Er entsteht, wenn durch Softwareupdates oder neue Versionen bestehende Geräte unnötig veralten, obwohl die Hardware noch voll funktionsfähig ist. Dadurch werden funktionierende Geräte vermehrt ausgetauscht, was den Ressourcenverbrauch und die Umweltbelastung erhöht. Die Effizienzgewinne der Software werden somit durch die gesteigerte Gerätefluktuation wieder zunichtegemacht.
- ▶ **Skaleneffekte und Wachstumsimperative:** Digitale Plattformen (unter der Dominanz großer Tech-Konzerne) verfolgen datengetriebene Wachstumsstrategien, bei denen Effizienzgewinne dazu genutzt werden, neue Märkte zu erschließen und den Konsum zu steigern. Ein Beispiel sind automatisierte Werbealgorithmen. Algorithmen und personalisierte Werbung optimieren die Ansprache von Konsument*innen und erhöhen die Kaufwahrscheinlichkeit, was eine Intensivierung des Ressourcenverbrauchs zur Folge hat.

Die Digitalisierung ist stark in ökonomische Wachstumslogiken eingebettet, die eine absolute Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch erschweren. Dabei spielt die marktbeherrschende Stellung der großen Technologie-Konzerne und Plattformen eine zentrale Rolle. Plattformunternehmen wie *Amazon* oder *Google* profitieren von einer Zunahme des Datenverkehrs und des Online-Konsums, wodurch Wachstum gefördert wird, das Umweltbelastungen verstärkt. Datenökonomie, Konsumsteigerung und Ressourcenverbrauch hängen eng miteinander zusammen.

Umweltpolitische Maßnahmen und Instrumente zur Eindämmung von Rebound-Effekten

Die systemische Analyse der Rebound-Effekte der Digitalisierung zeigt, dass es keine einfachen, eindimensionalen Lösungen gibt. Es zeigt sich, dass vielschichtige Dynamiken vorhanden sind, die sowohl die Entstehung der Effekte als auch die Wirkung potenzieller Gegenmaßnahmen prägen. Um dieses Dilemma zu analysieren, wurde eine systemische Perspektive eingenommen. Dabei wurden vier zentrale Dynamiken identifiziert, die hinter Rebound-Effekten stehen: technologische Entwicklung, Konsumverhalten, unternehmerisches Handeln und gesellschaftliche Rahmenbedingungen. Sechs übergeordnete politische Hebel können auf diese Dynamiken einwirken:

- ▶ **Technologieentwicklung steuern:** Technologische Innovationen, besonders im digitalen Bereich, können sowohl Effizienzsteigerungen als auch neue Rebound-Potenziale schaffen. Fördermaßnahmen wie Top-Runner-Programme, die auf besonders ressourcenschonende

Geräte setzen, können Innovationen in eine nachhaltige Richtung lenken. Gleichzeitig muss jedoch vermieden werden, dass sich Gerätezyklen unnötig verkürzen oder neue Funktionen zu zusätzlichem Ressourcenverbrauch führen. Eine Balance zwischen technologischem Fortschritt und Umweltwirkungen ist entscheidend.

- ▶ **Den ökologischen Rucksack digitaler Produkte und Leistungen verringern:** Unabhängig vom Rebound-Potenzial muss der unmittelbare Fußabdruck digitaler Technologien reduziert werden. Maßnahmen wie Standards für Energie- und Materialverbrauch, Recyclingfähigkeit, Langlebigkeit und Reparierbarkeit digitaler Geräte (z. B. über Ökodesign-Richtlinien) können helfen, die Umweltlasten direkt zu senken. Zwar greifen diese Maßnahmen nicht direkt auf Rebound-Dynamiken ein, sie senken jedoch deren ökologische Auswirkungen. Zur Verringerung der Umweltbelastungen trägt auch die Förderung umweltorientierter Geschäftsmodelle bei (z. B. Open-Source-Plattformen, grüne Software, Vermeidung software-basierter Obsoleszenz).
- ▶ **Digitalisierung direkt begrenzen:** Maßnahmen wie Datenverkehrsgrenzen, Digitalsteuern oder Funktionsbeschränkungen könnten den übermäßigen Einsatz digitaler Technologien einschränken. In der Praxis stoßen solche Eingriffe jedoch auf großen Widerstand – sowohl von Seiten der Wirtschaft als auch der Konsument*innen, da sie mit Komfort- und Freiheitsverlusten verbunden sind. Solche restriktiven Maßnahmen sind daher nur begrenzt umsetzbar.
- ▶ **Verbrauch verteuern:** Eine Verteuerung von Energie, Rohstoffen oder Produkten kann Rebound-Effekte eindämmen, indem sie ressourcenintensiven Konsum unattraktiver macht. Gleichzeitig eröffnen Steuereinnahmen neue Handlungsspielräume – etwa zur Förderung nachhaltiger Alternativen oder sozialer Ausgleichsmaßnahmen. Problematisch ist dabei die internationale Wettbewerbsfähigkeit: Ohne Einbeziehung importierter Produkte könnten nationale Maßnahmen zu wirtschaftlichen Nachteilen führen.
- ▶ **Mehrkonsum entgegenwirken und Konsumreflexion fördern:** Ein wichtiger Faktor zur Verminderung von Rebound-Effekten ist die Reduktion zusätzlicher Konsumaktivitäten. Zum einen sollten Hersteller und Händler adressiert werden, damit Praktiken entgegengewirkt wird, die Konsument*innen dazu zwingen neue Geräte anzuschaffen und die Reparaturen bzw. eine langfristige Nutzung verhindern. Hier sind Maßnahmen zu nennen, wie Gewährleistung der Abwärtskompatibilität von Produkten, Bereitstellung von Softwareupdates für einen bestimmten Zeitraum und Produktdesign für Reparaturen. Zum anderen geht es um Maßnahmen, die bei den Konsument*innen ansetzen. Viele Rebound-Effekte entstehen durch psychologische Mechanismen – etwa das gute Gewissen, „nachhaltig“ zu konsumieren, was zu Mehrkonsum führt. Bildungsmaßnahmen, Aufklärung über Rebound-Effekte und suffizienzorientierte Kampagnen können das Bewusstsein schärfen und Konsumverhalten langfristig verändern. Wenn Menschen hinterfragen, ob ein neuer digitaler Dienst wirklich nötig ist, können sie sich bewusst für suffizientere Alternativen entscheiden.
- ▶ **Qualität des Konsums beeinflussen:** Durch eine differenzierte Besteuerung – z. B. über variierende Mehrwertsteuersätze oder ähnliches, welche den Konsum und nicht die anderenfalls nur inländische Produktion (etwa im Falle von Ressourcen- oder Energiesteuern für die Wirtschaft) besteuern – kann der Konsum qualitativ beeinflusst werden. Produkte mit hoher Umweltwirkung könnten teurer werden, während ressourcenschonende Alternativen günstiger sind. So lassen sich Effizienzgewinne in Richtung nachhaltiger Konsumformen lenken. Allerdings ist die Umsetzung solcher Systeme komplex und politisch umstritten.

Fazit: Ein integrierter Politikansatz ist nötig

Das Ausmaß von Rebound-Effekten und ihre Umweltauswirkungen lassen sich durch eine Kombination aus Informationspolitik, ökonomischen Anreizen, technologischer Steuerung und gesellschaftlicher Bewusstseinsbildung erheblich mindern. Dabei ist aber ein rein technischer Ansatz ebenso wenig zielführend wie ein moralisch überhöhter Verzichtsapell. Vielmehr braucht es eine kluge Kombination aus:

- ▶ ressourceneffizienter Infrastruktur
- ▶ langlebigen Geräten
- ▶ Suffizienz-orientierter Kommunikation
- ▶ steuerlichen Lenkungsinstrumenten und
- ▶ klaren regulatorischen Leitplanken

Insgesamt zeigt sich: Rebound-Effekte lassen sich nicht völlig vermeiden, wohl aber mindern – durch ein kluges Zusammenspiel aus politischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Maßnahmen. Digitalisierung muss dazu nicht nur effizient, sondern auch ressourcenbewusst gestaltet werden. Nur so kann sie zur ökologischen Transformation beitragen.

Summary

Digitalisation promises major efficiency gains and environmental benefits in a wide range of areas - from production and consumption to the optimisation of infrastructures. However, the extent to which the potential for resource conservation and climate protection through digital services and products is actually realised depends heavily on the assumptions, usage and framework conditions. Rebound effects deserve special attention, as they harbour the risk of reducing or even reversing positive effects.

With this in mind, the research project contributes to a better understanding of the rebound effects of digitalisation and derives conclusions for dealing with them from an environmental policy perspective.

The project proceeded in three steps:

1. A total of 28 examples of digitalisation from the areas of private households, companies and technology were examined for potential rebound effects on the basis of a literature review. General impact mechanisms were identified from this. Overall, the data available on the case studies is rather sparse. It also became apparent that digitalisation is a very dynamic and fast-moving topic in terms of its technological development and practical application, which is why the data available for the case studies is limited overall.
2. The case studies and their mechanisms of action were transferred to a comprehensive qualitative cause-and-effect model. From this, the basic price, time and comfort rebound effects as well as the material and psychological rebound effects were transferred to a summarising model in order to better capture the mechanisms of action. In particular, by looking at longer chains of effects, some overarching systemic dynamics become clear, which on the one hand limit the possibilities of political control and on the other hand suggest levers (or their combination) for influencing rebound effects.
3. In an online expert workshop, the systemic findings were categorised, evaluated and possible needs and options for policy action were discussed. Based on this, levers were

identified and checked for plausibility using in-depth examples in order to ultimately make recommendations for policy action.

Compared to rebound effects in energy use, which have been the focus of studies on this phenomenon to date, rebound effects caused by digitalisation have been little studied. They are much more multi-layered and there are sometimes other and more complex mechanisms of action. Digital services, technologies and products not only have a direct and indirect impact on the environment, they also change production, consumption patterns and lifestyles. The associated ecological effects have a systemic impact and only become visible at macro level in the long term, if they can be clearly attributed at all.

Digitalisation is driving significant efficiency gains in numerous economic sectors through data-based business models, artificial intelligence and platform economies. Examples of this include the optimised use of resources through digital twins, AI-controlled logistics or smart energy management systems, the reduction of material production through the virtualisation of processes (e.g. cloud computing, digital media instead of physical data carriers) and expanded usage potential through sharing models and second-hand platforms. However, these efficiency gains are often weakened or even cancelled out by various forms of rebound effects.

Mechanisms

Four types of rebound can be distinguished: Price, comfort, time and material rebound effects. These can lead to both direct and indirect rebound effects and have a macroeconomic impact. In principle, the same mechanisms that are known for energy use also have an impact on the rebound effects of digitalisation. In particular, price rebound effects can be observed:

- ▶ **Cost reduction effects:** Cost reductions through more efficient hardware or software lead to more intensive use of digital technologies. For example, more efficient data compression and network technologies increase data consumption overall.
- ▶ **Income effects:** Increases in productivity as a result of digitalisation increase disposable income. Some of this income is used to consume additional products or services, which can neutralise the environmental benefits of efficiency gains.

In addition, a number of mechanisms were identified that are particularly relevant in the context of digitalisation. These include the following effects:

- ▶ **Market expansion effects:** The reduction of transaction costs through digital platforms enables new providers to enter the market and thus increase production and consumption volumes.
- ▶ **Automation and convenience rebound effects:** Increases in efficiency through digital services (e.g. voice assistants, smart homes) lower psychological barriers to use, which means people use them more often and for longer. Smart heating systems, for example, reduce energy consumption per unit, but can lead to rooms being heated more often or for longer.
- ▶ **Time rebound effects:** Efficient technology and processes or a reduction in working hours per unit of time enable further actions with additional energy and resource consumption due to the time saved. As a result, the actual reduction in energy and resource consumption due to additional actions may be less than expected. This can be seen in many digital applications, e.g. video conferencing, e-commerce or 5G mobile phone networks.

- ▶ **Material rebound effects:** Material rebound effects are due to the fact that more efficient technologies cause an increase in demand for energy and materials. Increasing the efficiency of energy and resource utilisation leads, for example, to more products being sold, products being equipped with new features or completely new products and product systems being offered.
- ▶ **Shifting environmental burdens:** Easing the burden in one area can lead to new burdens in others. For example, a reduction in energy consumption due to more efficient appliances can go hand in hand with an increased demand for critical raw materials for their manufacture.
- ▶ **Software- and network-dependent path dependencies:** Digital technologies can solidify existing structures or create new dependencies. For example, if an infrastructure only supports a less efficient solution, a more effective alternative can no longer be implemented. One example is the long-term commitment to proprietary software, which makes it difficult to switch to more sustainable or more cost-effective alternatives.
- ▶ **Indirect effects:** Some effects are more indirect and difficult to grasp. For example, an improvement in the efficiency of graphics cards can lead to users consuming more videos in higher resolution, which further increases the overall energy requirements of the data centres of streaming platforms.
- ▶ **Lock-in effects:** Digital products often work particularly well in conjunction with other devices from the same manufacturer. This leads to manufacturer dependency and new requirements.
- ▶ **Acceleration of innovation cycles:** Increasingly efficient digital products are driving demand for new applications, making older technologies obsolete more quickly. Advances in AI, for example, are leading to new generations of software, which in turn require more powerful hardware. Software-based obsolescence is a special mechanism. It occurs when software updates or new versions make existing devices unnecessarily obsolete, even though the hardware is still fully functional. As a result, functioning devices are increasingly replaced, which increases resource consumption and environmental pollution. The efficiency gains of the software are thus cancelled out by the increased device fluctuation.
- ▶ **Economies of scale and growth imperatives:** Digital platforms (dominated by large tech companies) pursue data-driven growth strategies in which efficiency gains are used to tap into new markets and increase consumption. Automated advertising algorithms are one example. Algorithms and personalised advertising optimise the targeting of consumers and increase the probability of purchase, which results in an increase in the consumption of resources.

Digitalisation is strongly embedded in economic growth logic, which makes it difficult to completely decouple economic growth and resource consumption. The dominant market position of large technology companies and platforms plays a central role in this. Platform companies such as Amazon and Google benefit from an increase in data traffic and online consumption, which promotes growth that increases environmental pollution. The data economy, increased consumption and resource consumption are thus closely interlinked.

Environmental policy measures and instruments to curb rebound effects

The systemic analysis of the rebound effects of digitalisation shows that there are no simple, one-dimensional solutions. It shows that there are multi-layered dynamics that characterise both the emergence of the effects and the impact of potential countermeasures. In order to

analyse this dilemma, a systemic perspective was adopted. Four central dynamics behind rebound effects were identified: technological development, consumer behaviour, entrepreneurial action and social framework conditions. Six overarching political levers can influence these dynamics:

- ▶ **Managing technological development:** technological innovations, particularly in the digital sector, can create both efficiency gains and new rebound potential. Support measures such as Top Runner programmes, which focus on particularly resource-efficient devices, can steer innovations in a sustainable direction. At the same time, however, it must be avoided that appliance cycles are unnecessarily shortened or that new functions lead to additional resource consumption. A balance between technological progress and environmental impact is crucial.
- ▶ **Reducing the ecological rucksack of digital products and services:** Regardless of the rebound potential, the direct footprint of digital technologies must be reduced. Measures such as standards for energy and material consumption, recyclability, durability and reparability of digital devices (e.g. via ecodesign guidelines) can help to directly reduce the environmental impact. Although these measures do not have a direct impact on rebound dynamics, they do reduce their ecological impact. The promotion of environmentally orientated business models (e.g. open source platforms, green software, avoidance of software-based obsolescence) also helps to reduce the environmental impact.
- ▶ **Directly limit digitalisation:** Measures such as data traffic limits, digital taxes or functional restrictions could limit the excessive use of digital technologies. In practice, however, such interventions meet with great resistance - both from industry and consumers, as they are associated with a loss of convenience and freedom. Such restrictive measures can therefore only be implemented to a limited extent.
- ▶ **Making consumption more expensive:** Increasing the price of energy, raw materials or products can curb rebound effects by making resource-intensive consumption less attractive. At the same time, tax revenues open up new room for manoeuvre - for example to promote sustainable alternatives or social equalisation measures. International competitiveness is a problem here: without the inclusion of imported products, national measures could lead to economic disadvantages.
- ▶ **Counteracting increased consumption and promoting consumer reflection:** An important factor in reducing rebound effects is the reduction of additional consumption activities. On the one hand, manufacturers and retailers should be addressed in order to counteract practices that force consumers to purchase new devices and prevent repairs or long-term use. This includes measures such as ensuring the backward compatibility of products, providing software updates for a certain period of time and product design for repairs. On the other hand, there are measures that start with the consumer. Many rebound effects are caused by psychological mechanisms - such as a clear conscience about consuming 'sustainably', which leads to increased consumption. Educational measures, information about rebound effects and sufficiency-oriented campaigns can raise awareness and change consumer behaviour in the long term. If people question whether a new digital service is really necessary, they can make a conscious decision in favour of more sufficient alternatives.
- ▶ **Influence the quality of consumption:** Differentiated taxation - e.g. via varying VAT rates - can influence the quality of consumption. Products with a high environmental impact could become more expensive, while resource-saving alternatives could become cheaper. In this

way, efficiency gains can be channelled in the direction of sustainable forms of consumption. However, the implementation of such systems is complex and politically controversial.

Conclusion: An integrated policy approach is necessary

The extent and environmental impact of rebound effects can be significantly reduced through a combination of information policy, economic incentives, technological control and social awareness-raising. A purely technical approach is just as ineffective as a morally exaggerated appeal to do without. Rather, what is needed is a clever combination of:

- ▶ resource-efficient infrastructure
- ▶ durable devices
- ▶ sufficiency-orientated communication
- ▶ tax incentives and
- ▶ clear regulatory guidelines

Overall, it is clear that rebound effects cannot be completely avoided, but they can be reduced - through a clever combination of political, economic and social measures. Digitalisation must not only be efficient, but also resource-conscious. This is the only way it can contribute to the ecological transformation.

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung der Studie

Mit der Studie „Rebound-Effekte durch digitale Leistungen und Produkte“ soll eine Grundlage geschaffen werden, um die Ursachen für Rebound-Effekte der Digitalisierung besser zu verstehen. Rebound-Effekte sind bereits Gegenstand zahlreicher Studien. Eine Übersicht findet sich bei Santarius (2012), Peters et al. (2012), de Haan et al. (2015), sowie Buhl et al. (2021), Lange et al. (2021). Vor allem für den Energiebedarf wurden sie untersucht (u. a. Greening et al. 2000; Sorell et al. 2009; Semmling et al. 2016; de Haan et al. 2015; Golde 2016). Das Umweltbundesamt hat die Bedeutung der Rebound-Effekte für die Umweltpolitik untersucht und entsprechende Handlungsstrategien vorgelegt (de Haan et al. 2015; Golde 2016; Semmling et al. 2016)¹. Aus der Kenntnis der grundlegenden Prinzipien eines Rebound-Effektes sind wesentliche politische Ansatzpunkte zur Eindämmung eines Rebound-Effektes beschrieben worden.

Auch mit Blick auf Informations- und Kommunikationstechniken wurden Rebound-Effekte thematisiert (Erdmann et al. 2004; Fichter et al. 2012; Hilty & Bieser 2017; Bieser et al. 2022; Lange et al. 2023; Stede et al. 2024). Sie zeigen, dass Rebound-Effekte der Digitalisierung besondere Aufmerksamkeit verdienen, da sie die Gefahr bergen, positive Effekte zu verringern oder gar ins Gegenteil zu verkehren. Ohne Berücksichtigung von Rebound-Effekten könnten Einsparungen überschätzt werden, was zu falschen politischen Erwartungen und ineffektiven Politikmaßnahmen führt.

Im Rahmen dieses Projektes ist es daher ein zentrales Ziel, die Wirkmechanismen, die zu Rebound-Effekten durch Digitalisierung führen können, genauer zu verstehen, abzuschätzen, wie hoch diese ausfallen und welche Faktoren Rebound-Effekte fördern bzw. hemmen. Schließlich geht es um die Frage, wie Rebound-Effekte der Digitalisierung umweltpolitisch eingedämmt werden können. Unterscheiden sich die Wirkmechanismen bei Rebound-Effekten der Digitalisierung von den klassischen Rebound-Effekten? Was bedeutet dies für die Gestaltung von umweltpolitischen Maßnahmen?

Eine besondere Herausforderung besteht darin, die Systemgrenzen für digitale Leistungen und Produkte richtig abzustecken. Für einzelne Geräte ist es wichtig, den gesamten Lebenszyklus zu betrachten. Bereits bei der Produktion digitaler Endgeräte werden große Mengen an Energie sowie zum Teil kritische Rohstoffe benötigt. Während der Nutzung geht es nicht nur um den direkten Ressourcenverbrauch des Geräts selbst, sondern auch um die notwendige Infrastruktur wie Rechenzentren und Leitungen, die ebenfalls erhebliche Ressourcen beanspruchen. Am Ende der Nutzungsphase stellt sich die Frage, ob das Gerät verwertet oder endgültig entsorgt wird. Zusätzlich müssen auch digitale Dienstleistungen wie Software und Datennutzung berücksichtigt werden. Speziell in diesem Bereich gibt es starke Marktverzerrungen, da einige große Unternehmen eine erhebliche Marktmacht besitzen. Wenige Tech-Unternehmen dominieren zentrale digitale Infrastrukturen, Plattformen und datenbasierte Geschäftsmodelle.

Im Projekt wurde folgendermaßen vorgegangen: mittels einer umfangreichen Literaturanalyse wurden 28 Fallbeispiele zu digitalen Produkten und Leistungen gesammelt und beschrieben. Entlang der Fallbeispiele wurden Wirkmechanismen identifiziert, die zu Rebound-Effekten führen sowie Einflussfaktoren herausgearbeitet und in ein qualitatives systemisches Ursache-Wirkungsmodell übertragen. Auf dieser Grundlage wurden Handlungsansätze zur Eindämmung

¹ Dazu wurden Studien unter den folgenden Titeln veröffentlicht: Rebound-Effekte: Ihre Bedeutung für die Umweltpolitik (de Haan et al. 2015), Rebound-Effekte - Empirische Ergebnisse und Handlungsstrategien, Hintergrund (Golde 2016), Rebound-Effekte: Wie können sie effektiv begrenzt werden? Ein Handbuch für die umweltpolitische Praxis (Semmling et al. 2016).

der negativen Umwelteffekte von Rebound-Effekten abgeleitet und in einem Expertenworkshop diskutiert. Die eher klassische Betrachtung von umweltpolitischen Maßnahmen wurde dazu um Konzepte und Erkenntnisse aus der Transformations- und Komplexitätsforschung, erweitert, die eine systemische Bewertung der politischen Maßnahmen hinsichtlich des erwarteten Effektes ermöglichen.

1.2 Was ist ein Rebound und was nicht?

Die Bemessung von Rebound-Effekten der Digitalisierung ist keineswegs einfach. Bereits die uneinheitliche Verwendung des Begriffs erfordert zunächst eine klare Definition. Ohne diese besteht die Gefahr, dass Diskussionen über Effizienzsteigerungen im Kontext der Digitalisierung auf falschen Annahmen basieren. Klare Abgrenzungen helfen dabei, die Analyse zu fokussieren und Missverständnisse zu minimieren.

Der Grundmechanismus eines Rebound-Effektes ist der, dass Umweltentlastungseffekte infolge von Effizienzverbesserungen in der Praxis nicht in dem Maße wirksam werden, wie es erwartet oder beabsichtigt wird. Die angestrebte Reduktion des absoluten Ressourcenverbrauchs und der damit verbundenen Umweltbelastungen bleiben geringer als erwartet. Verantwortlich dafür ist ein Mechanismus, der sich auf verschiedene Weise manifestieren kann: eine Mehrnachfrage nach mehr Produkteinheiten ("mehr Einheiten"), eine häufigere Nutzung desselben Produkts ("häufigere Nutzung") oder die Nutzung eines ressourcenintensiveren Produkts - jeweils als Folge der Effizienzverbesserungen.

Dieser Mechanismus wurde erstmals von Wilhelm Stanley Jevons beschrieben (Jevons 1865). Er stellte fest, dass die Einführung neuer Dampfmaschinen trotz besserer Effizienz zu einer Erhöhung des Kohleverbrauchs führte, da die Dampfmaschine nun in vielfältigeren Anwendungsgebieten eingesetzt werden konnte. Kahzzoom (1980) und Brookes (1990) haben diesen Effekt in die aktuelle wissenschaftliche Diskussion eingeführt. Seither hat die Forschung zu Rebound-Effekten stark zugenommen, und das Begriffs- sowie Konzeptverständnis hat sich ausdifferenziert. Nach Greening et al. (2000) können direkte, indirekte und makroökonomische, also wirtschaftsweite, Rebound-Effekte unterschieden werden.

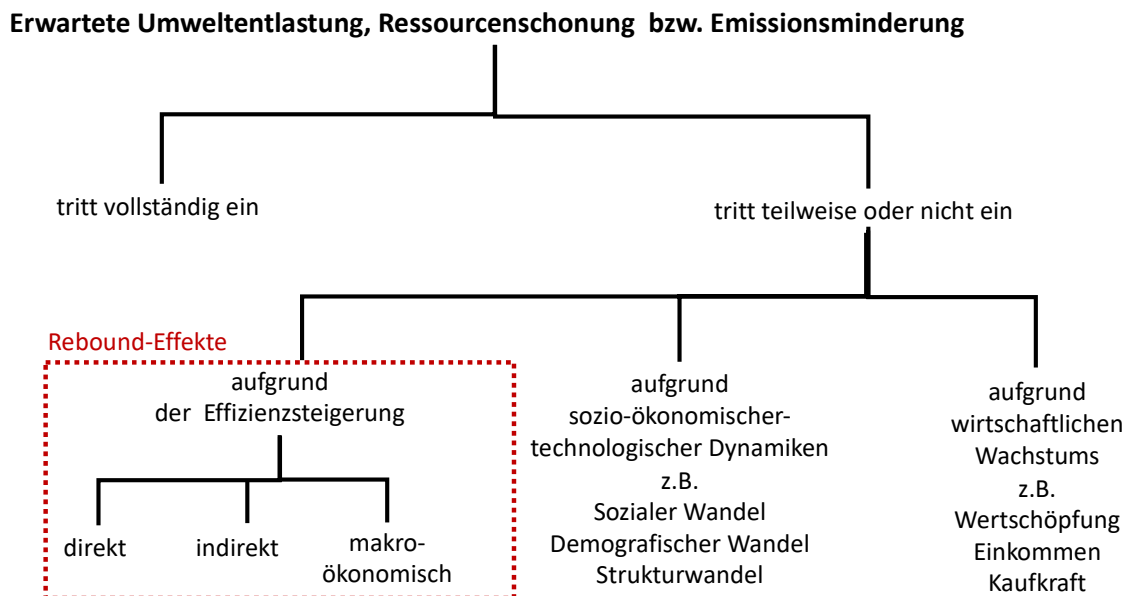
- ▶ **Direkter Rebound-Effekt:** Dieser äußert sich in einer erhöhten Nachfrage nach demselben Gut. Eine Leistung, die effizienter erstellt wird, wird beispielsweise billiger. Was billiger wird, wird stärker nachgefragt. Direkte Rebound-Effekte im Zusammenhang mit Produktpreisen entstehen, wenn verbesserte Ressourceneffizienz den effektiven Preis für ein Produkt senkt, was eine vergrößerte Nachfrage nach diesem Produkt erwarten lässt.
- ▶ **Indirekter Rebound-Effekt:** Dieser zeigt sich in einer erhöhten Nachfrage nach alternativen Gütern. Wer aufgrund einer Effizienzsteigerung Ressourcen und damit Geld oder Zeit spart, nutzt das Geld oder die Zeit gegebenenfalls für andere Konsumgüter oder Aktivitäten, die ebenfalls Ressourcen verbrauchen und die Umwelt belasten.
- ▶ **Makroökonomischer Rebound-Effekt:** Während direkte und indirekte Rebound-Effekte in der Regel bereits auf der Mikroebene wirksam werden, gibt es vermittelte Effekte, die erst makroökonomisch sichtbar werden, beispielsweise in Form von effizienzinduzierten neuen Anwendungs-, Absatz- und Marktmöglichkeiten. Die Erschließung dieser Potenziale kann zur Kompensation der Umweltentlastung durch Effizienzgewinne beitragen.

Abgrenzung des Rebound-Effektes

Von Rebound-Effekten abzugrenzen sind andere Faktoren, die dazu führen können, dass mögliche Umweltentlastungen geringer ausfallen als durch Effizienzsteigerungen erwartet. Dazu

zählen sozio-ökonomische Faktoren wie sozialer Wandel, demografischer Wandel oder wirtschaftlicher Strukturwandel sowie technologische Entwicklungen und Dynamiken. Ebenfalls von Rebound-Effekten abzugrenzen ist wirtschaftliches Wachstum, das einen Mehrverbrauch von Ressourcen erzeugen kann. Hier spielen Wertschöpfungswachstum, Einkommenszuwachs und höherer Pro-Kopf-Wohlstand eine wesentliche Rolle.

Abbildung 1: Unterscheidungsmerkmale bei Rebound-Effekten



Quelle: eigene Darstellung, IZT.

Abbildung 1 zeigt verschiedene Faktoren und grenzt sie von Rebound-Effekten (im hier verwendeten Sinne des Projektes) ab. Ohne klare Unterscheidung dieser Varianten können Analysen zu inkonsistenten Ergebnissen führen. Für politische Maßnahmen ist es wichtig, zu wissen, welchen Rebound-Effekt sie adressieren.

1.3 Ermittlung von Rebound-Effekten

Die Bestimmung des Rebound-Effektes setzt zwei Aspekte voraus: Erstens ist er das **Ergebnis der Wirkung einer Effizienzsteigerung**, zweitens ist er im Kontext mit einer **Absicht oder Erwartung** zu sehen.

Quantitativ wird der Rebound-Effekt definiert als jener Prozentsatz des Einsparpotenzials der dadurch verloren geht, dass der Verbrauch einer Ressource infolge der Effizienzerhöhung ansteigt. Um dies zu ermitteln, bedarf es der Unterscheidung zwischen einerseits dem theoretisch und technisch machbaren Effizienzpotenzial und andererseits dem tatsächlich realisierten Ressourcenverbrauch. Wenn der Rebound-Effekt so stark zunimmt, dass der gesamte Einspareffekt überkompensiert wird, spricht man von Backfire-Effekten (wenn der Rebound-Effekt größer als 100 % ist). Nicht als Rebound-Effekte sind solche Phänomene zu bezeichnen, die zwar der Effizienzmaßnahme entgegenwirken, aber nicht von ihr verursacht werden.

Von einem Rebound-Effekt spricht man, wenn eine Effizienzverbesserung mit der Erwartung oder Absicht verbunden ist, den Input zu senken, diese Wirkung aber nicht eintritt, sondern der Output steigt. Dass diese Erwartung nicht (vollständig) erfüllt wird, erklärt die Bezeichnung „Rebound“ („Zurückprallen“). Die Einordnung von Rebound-Effekten hängt wesentlich von der Akteursperspektive ab (Hilty et al. 2003) - von Unternehmen, Privathaushalten und Staat.

- ▶ Die **Unternehmensperspektive** auf Rebound-Effekte der Digitalisierung variiert je nach Akteur. Dabei lassen sich drei Akteurstypen unterscheiden: Tech-Unternehmen (Hersteller von Informations- und Kommunikationstechnologie, IKT), Plattformunternehmen (digitale Marktplätze und Dienstleister) und Anwenderunternehmen (Unternehmen, die digitale Technologien einsetzen). Hardware- und Softwarehersteller streben danach, ihre Produkte effizienter zu gestalten, um Marktanforderungen gerecht zu werden und ihre Absatzchancen zu verbessern. Der technische Fortschritt bei IKT-Geräten – etwa in Form energieeffizienterer Prozessoren, sparsamer Displays oder verbesserter Speichermedien – dient vor allem dazu, die Leistungsfähigkeit zu steigern und gleichzeitig Energieverbrauch pro Recheneinheit zu senken. Plattformen wie *Amazon*, *Google* oder *Meta* fördern Rebound-Effekte durch datenbasierte Geschäftsmodelle, die auf Skaleneffekten und massenhaftem Datenverkehr beruhen. Obwohl sie oft mit energieeffizienten Rechenzentren werben und auf nachhaltige Infrastrukturprojekte hinweisen, liegt ihr wirtschaftliches Interesse darin, die Nutzungsintensität und Verweildauer zu maximieren. Für Anwenderunternehmen, die digitale Technologien nutzen, steht die Steigerung der betrieblichen Effizienz im Vordergrund. Automatisierung, digitale Prozessoptimierung und datenbasierte Geschäftsmodelle ermöglichen eine Senkung der Betriebskosten und eine Erhöhung der Produktivität. Durch die günstige Verfügbarkeit von Speicher und Rechenleistung werden immer mehr Daten gesammelt und verarbeitet, wodurch sich der Ressourcenverbrauch insgesamt erhöhen kann.
- ▶ Aus Sicht von **Privathaushalten** entsteht ein Rebound-Effekt, wenn digitale Technologien oder Anwendungen dazu führen, dass erwartete Einsparungen bei Energie oder Ressourcen nicht eintreten, sondern durch veränderte Nutzungsgewohnheiten reduziert oder sogar kompensiert oder überkompensiert werden. Dies geschieht vor allem deshalb, weil Effizienzsteigerungen die Nutzung attraktiver und kostengünstiger machen, was letztlich den Gesamtverbrauch erhöhen kann. Ein Beispiel ist der zunehmende Einsatz von Smart-Home-Technologien. Obwohl sie Heizungssteuerung und Stromverbrauch optimieren können, entwickeln sie sich zu Komforttechnologien, die den Gesamtenergieverbrauch im Haushalt eher erhöhen. Die Nutzung ist also nicht allein auf Einsparung, sondern auch auf Komfort und Bequemlichkeit ausgerichtet, wodurch die ursprünglich geplanten Einsparungen konterkariert werden
- ▶ Der **Staat** ergreift zahlreiche Maßnahmen in der Absicht, den Input (in der Volkswirtschaft) zu reduzieren, etwa durch die Senkung des Energieverbrauchs und die Ressourceninanspruchnahme. Die Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz ist deshalb ein zentraler Ansatz. Eine Vielzahl umweltpolitischer Initiativen soll zu einer Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz beitragen, wie z. B. Energie- und Material-Effizienzvorgaben für Produkte im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie, die Schaffung von Energieeffizienzkennzeichen oder die Unterstützung von betrieblichen Ressourceneffizienzmaßnahmen, in der Hoffnung, so den Verbrauch zu reduzieren. Gleichzeitig ist die Politik bestrebt, die Digitalisierung voranzutreiben. Ziel der Digitalstrategie der Bundesregierung ist es, die Rahmenbedingungen für das Vorankommen der Digitalisierung in allen Bereichen zu verbessern. Zivilgesellschaft, Wirtschaft, Bildung und Wissenschaft sollen noch besser und einfacher die Chancen der Digitalisierung und die Gestaltungsmöglichkeiten des digitalen Wandels nutzen können (BMDV 2023b). Die Digitalstrategie zielt beispielsweise auf den flächendeckenden Gigabitausbau und die Verbesserung der Verfügbarkeit von Daten als grundlegende Voraussetzung für digitale Wertschöpfung. Mit der umweltpolitischen Digitalagenda des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz verfolgt die

Bundesregierung das Ziel, die Digitalisierung umweltfreundlicher zu gestalten. Gleichzeitig ist festzustellen, dass eine immer effizientere und leistungsfähigere IKT immer häufiger genutzt wird. Die Effizienzgewinne wurden bislang immer ausgeglichen. Der Ressourcenbedarf der IKT ist sogar gestiegen (Hintemann 2017). Die Gründe sind vielfältig: neben Rebound-Effekten spielen vor allem sozio-ökonomische und technologische Entwicklungen sowie wirtschaftlich beabsichtigtes Wachstum eine Rolle – Faktoren, die insgesamt die Wirksamkeit politischer Ressourceneffizienzmaßnahmen schmälern können.

Angesichts der Vielschichtigkeit und Wechselwirkungen verschiedener Einflussfaktoren ist die Ermittlung von Rebound-Effekten in der Praxis sehr herausfordernd. So stellt eine Metaanalyse zu den Nachhaltigkeitseffekten der Digitalisierung (Stede et al. 2024) fest, dass Rebound-Effekte in quantitativen Bewertungen digitaler Technologien häufig unberücksichtigt bleiben. Vorhandene Quantifizierungen fokussieren sich meist auf die Potenziale, besonders auf die Enabling-Effekte. Die Bedeutung der Rebound-Effekte wird zwar erwähnt, doch ihre quantitative Erfassung bleibt selten.

Ein wesentliches Problem ist die Abgrenzung von gewollten Wachstumseffekten. So verfolgen Hersteller von IKT das Ziel, die Attraktivität ihrer Geräte zu steigern und damit den Absatz zu erhöhen. Gleichzeitig bringt die vermehrte Nutzung von IKT häufig wirtschaftliche Vorteile für die Anwender mit sich (Hintemann 2017).

Trotz dieses Abgrenzungsproblems zeigt sich, „dass eine immer effizientere und leistungsfähigere IKT auch stärker genutzt wird. Die Effizienzgewinne wurden so in der Vergangenheit immer ausgeglichen - und der Ressourcenverbrauch der IKT ist sogar angestiegen“ (Hintemann 2017, S. 44). Hinzu kommen die Effekte durch Anwendung von IKT-Lösungen in anderen Bereichen. Die in den Studien beschriebenen Ressourceneinsparpotenziale konnten bis heute kaum in der Form realisiert werden, dass sie sich messbar auswirken (Hintemann 2017). Die Wahrscheinlichkeit, dass Wachstums- und Rebound-Effekte die Umweltentlastungspotenziale verringern, ist hoch. In der Smarter2030-Studie der Global eSustainability Initiative (GeSi 2015) wurden die CO₂-Minderungspotenziale durch die Nutzung von IKT für die Bereiche Mobilität, Produktion, Landwirtschaft, Gebäude und Energie analysiert. Dabei wurde geschätzt, dass Rebound-Effekte die möglichen Emissionseinsparungen um ca. 11% verringern würden. Die Annahmen der Studie wirken angesichts der bisherigen Entwicklung „sehr optimistisch“ (Hintemann 2017, S. 49). Die Minderungspotenziale werden tendenziell eher überschätzt, die Rebound-Effekte eher unterschätzt. Andere Studien zeigen ein ambivalentes Bild (Hilty & Bieser 2017; Bieser et al. 2022; Stede et al. 2024). Dabei zeigt sich, dass die Ergebnisse stark abhängig sind von den Potenzialabschätzungen. Dabei spielen die Rahmenbedingungen zur Erschließung dieser Potenziale ebenso eine Rolle wie Daten- und Zukunftsunsicherheiten.

1.4 Wirkmechanismen

Das Entstehen von Rebound-Effekten hängt von verschiedenen Wirkmechanismen ab. Wirkmechanismen beschreiben das Zustandekommen von Rebound-Effekten in Form von Ursache-Wirkungsbeziehungen (Lange & Santarius 2020). Sie bestimmen unmittelbar Rebound-Effekte und sind endogener Art. Für die Beschreibung von Rebound-Effekten erscheinen aus bisherigen Forschungsbefunden vor allem vier grundlegende Wirkmechanismen relevant: Preis-, Komfort-, Zeit- und materieller Rebound-Effekt. Diese können sowohl zu direkten als auch zu indirekten Rebound-Effekten führen und sich makro-ökonomisch niederschlagen (Hilty et al. 2003; Jenkins 2011; Paech 2011; Madlener & Acott 2011; Santarius 2012; Fichter et al. 2012; de Haan et al. 2015; Gossart 2015).

- ▶ **Preis-Rebound-Effekt:** Werden Güter durch Effizienzgewinne kostengünstiger, führt dies ökonomisch betrachtet wahrscheinlich zu einer Nachfragerhöhung bzw. zu Mehrkonsum. Kosteneinsparungen können in eine relative Preisreduktion und/oder Einkommensgewinne übersetzt werden, die wiederum eine höhere Nachfrage stimulieren. Niedrige Produktpreise führen bei Elektronikprodukten auch zu kürzeren Erneuerungszyklen, da Reparaturen im Verhältnis zum Einkaufspreis nicht wirtschaftlich erscheinen. Dabei spielt das Verhältnis von Energiekosten und Produktkosten (bei energieeffizienten Produkten) eine Rolle. Zwar wird de facto Energie eingespart, jedoch steigt meist der Materialeinsatz und damit die CO₂-Emissionen. Drei finanzielle Mechanismen können unterschieden werden (Santarius 2012), die alle durch die Kosteneinsparungen infolge von Effizienzmaßnahmen beeinflusst werden: Einkommens-Effekte, Re-Investitions-Effekte und Marktpreis-Effekte.
 - Der **Einkommens-Effekt** entsteht, wenn Einkommenszuwächse Verbraucher*innen dazu anregen, mehr von denselben oder anderen Gütern und Dienstleistungen zu konsumieren. Auch wenn Produkte aufgrund von Effizienzmaßnahmen günstiger werden, ist mit einem Mehrkonsum zu rechnen. g
 - **Re-Investitions-Effekte** treten auf Unternehmensseite auf, wenn höhere Gewinne entweder in die Ausweitung der Produktion des ursprünglichen Gutes oder in Investitionen in neue Produkte, Dienstleistungen bzw. die Erweiterung der Produktpalette fließen. Dazu gehören auch Investitionen in das Re-Design des herkömmlichen Produkts, um z. B. eine attraktivere Version davon zu entwickeln.
 - Der **Marktpreis-Effekt** bewirkt gesamtgesellschaftliche Wirkungen, wenn die Nachfrage in einem Sektor die Nachfrage in anderen Sektoren stimuliert.
- ▶ **Materieller Rebound-Effekte** sind darauf zurückzuführen, dass effizientere Technologien eine höhere Nachfrage nach Energie und Material auslösen. Dazu zählen Embodied-Energy-Effekte, Neue-Märkte-Effekte, Konsum-Akkumulations-Effekte und Re-Materialisierungs-Effekte. Effizienzsteigerungen bei Energie- und Ressourcennutzung führen zu mehr Angeboten und/oder Nachfrage, was den Energie- und Ressourcenverbrauch insgesamt steigen lässt. Die tatsächliche Reduktion des Energie- und Ressourcenverbrauchs kann so durch das geänderte Verhalten auf Angebots- und Nachfrageseite geringer ausfallen als erwartet bzw. von der Effizienzsteigerung allein ermöglicht. In der IKT führen Effizienzsteigerungen häufig zu höheren Leistungsanforderungen, „so dass sich nicht der Ressourcen-Input pro Gerät reduziert, sondern der Leistungs-Output erhöht“ (Hilty et al. 2003, S. 187).
 - Ein Beispiel für den **Embodied-Energy-Effekt** ist ein ungedämmtes Haus, das zwar mehr Heizenergie im Betrieb benötigt als ein gedämmtes, doch die Produktion und der Einbau der Dämmung bringen einen Energieaufwand mit sich, der bei einem ungedämmten Haus nicht entsteht (Santarius 2012).
 - Beruht die Realisierung von Effizienzfortschritten auf neuen Produkten und Infrastrukturen, spricht man von einem **Neue-Märkte-Effekt** (Paech 2011).
 - Der **Konsum-Akkumulations-Effekt** beschreibt, dass effizientere, umweltfreundlichere Produkte nicht immer die bisherigen Produkte ersetzen, sondern häufig zusätzlich zu ihnen genutzt werden. (Santarius 2012).

- Digitale Medien wie digitale Dokumente oder e-paper substituieren physische Produkte. Werden sie dennoch ausgedruckt, entstehen zusätzliche Umweltbelastungen – der sogenannte **Re-Materialisierungs-Effekt**.
- ▶ **Zeit-Rebound-Effekt:** IKT werden häufig in der Absicht eingesetzt, Prozesse zu beschleunigen und Zeit zu sparen. Effizienzsteigerung ist zwar nicht das alleinige Motiv für den Einsatz von IKT, aber ein wichtiges und zugleich ein gemeinsamer Nenner der vielfältigen Anwendungen (Hilty et al. 2005). Der Rebound-Effekt kann bei zeitsparenden Innovationen dazu führen, dass sie nicht unbedingt zu wirklichen Zeitersparnissen beitragen, sondern stattdessen neue Verhaltensmuster entstehen (Binswanger 2001). Die Zeiteffizienzsteigerung führt zu einer größeren Anzahl von Handlungen pro Zeiteinheit. Effiziente Technik, optimierte Prozesse oder verkürzte Arbeitszeiten ermöglichen weitere Aktivitäten mit zusätzlichem Energie- und Ressourcenverbrauch. Die tatsächliche Reduktion des Energie- und Ressourcenverbrauches kann dadurch geringer ausfallen als erwartet bzw. von der Effizienzsteigerung alleine ermöglicht.
- ▶ **Komfort-Rebound-Effekt:** Komfortgewinn kann ein Motiv für Mehrkonsum und/oder häufigere Nutzung von Gütern sein. Besonders digitale Plattformen spielen hier eine große Rolle, da sie verschiedene Nutzergruppen zusammenbringen und die Transaktionskosten senken, die für den Kauf und Verkauf von Waren oder zur Inanspruchnahme von Dienstleistungen notwendig sind. So ermöglichen Online-Plattformen einen bequemen Einkauf von zuhause, unabhängig von Ladenöffnungszeiten und mit großer Angebotsvielfalt. Viele IT-Lösungen zielen auf Komfortgewinne bei der Nutzung von Produkten und Dienstleistungen, was das Konsum- und Nutzungsverhalten verändert. Die Reduktion des Energie- und Ressourcenverbrauches kann so durch einen Mehrkonsum und/oder häufigere bzw. intensivere Güternutzung geringer ausfallen als erwartet.

Die beschriebenen Wirkmechanismen treten nicht isoliert voneinander auf, sondern preis-, zeit-, komfort-induzierte und materielle Rebound-Effekte überlagern sich. Dabei zeigt sich ein komplexes Zusammenspiel einer Vielzahl von Einflussfaktoren, die mittelbar die Wirkmechanismen von Rebound-Effekten beeinflussen, indem sie diese fördern oder auch vermindern können. Diese Faktoren lassen sich unterscheiden: ökonomisch, geräte- und infrastrukturbezogen (ressourcenbezogen), sozial, wissensbezogen und psychosozial.

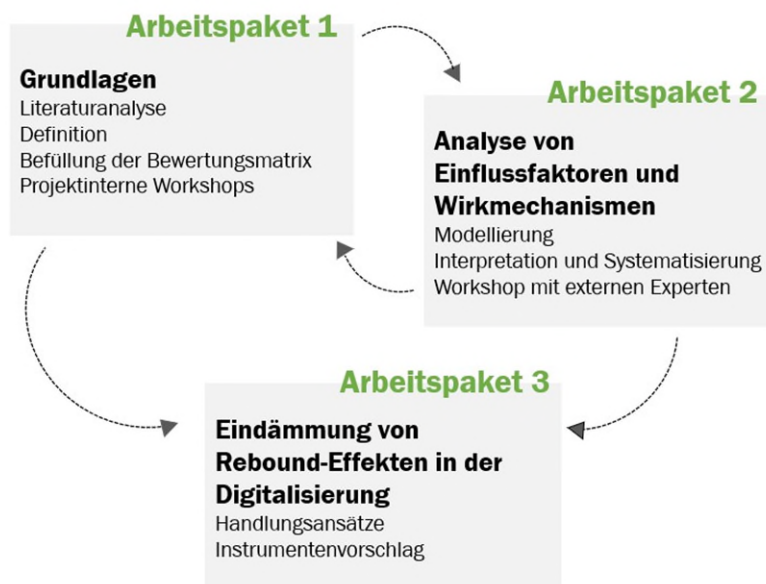
- ▶ **Ökonomische Faktoren:** dazu zählen Kosteneinsparungen, Einkommen, Re-Investitionen, Markt-, Preis- und Nachfrageelastizitäten, Geschäftsmodelle (wie Flatrates) und Marktsättigung.
- ▶ **Infrastruktur und gerätebezogene Faktoren:** sie umfassen Zustand und Effizienz der IT-Geräte und Infrastrukturen, die genutzt werden, sowie der Produkte und Infrastrukturen, in deren Kontext die IT eingebettet ist bzw. genutzt wird.
- ▶ **Soziale Faktoren:** Werte, Normen, Motive und Einstellungen sowie Bedürfnisbefriedigung, die das Konsum- und Nutzungsverhalten maßgeblich beeinflussen.
- ▶ **Wissensbezogene Faktoren:** Hierunter fallen mangelnde Informationen oder fehlendes Wissen bei Nutzer*innen über die Auswirkungen von Produkten oder Technologien sowie über die damit verbundenen Konsumhandlungen, bzw. mangelndes Wissen über Handlungsalternativen sowie mangelnde Kenntnisse über die korrekte Nutzung der Technologien.

- **Psychologische Faktoren:** Dazu gehören kognitive Verzerrungen. Insbesondere (personalisierte) Werbung und Medien können das Verhalten der Konsument*innen beeinflussen. In diesem Zusammenhang ist auch die kognitive Dissonanz (bzw. deren Abbau) zu verorten: Selbst wenn „eigentlich“ ein Bewusstsein vorhanden ist, finden Konsument*innen oft Gründe, um umweltschädliches Verhalten dennoch zu rechtfertigen und auszuüben.

1.5 Vorgehensweise

Die Studie basiert auf drei Arbeitsschritten (Abbildung 2): der Erfassung von Fallbeispielen mittels Literaturanalyse, der Analyse der Wirkmechanismen sowie der Rebound-fördernden und -hemmenden Faktoren und anschließend der Ableitung von Maßnahmen zur Eindämmung von digitalen Rebound-Effekten.

Abbildung 2: Vorgehensweise nach Arbeitsschritten



Quelle: Eigene Darstellung, IZT.

Im ersten Schritt wurden mittels einer umfangreichen Literaturanalyse vielfältige Fallbeispiele recherchiert. Die gesichteten Studien thematisieren ein breites Spektrum unterschiedlicher Ebenen der Digitalisierung. Das Ergebnis ist eine Sammlung von 28 Fallbeispielen mit nachgewiesenen oder vermuteten Rebound-Effekten (Tabelle 1), die die Bereiche Haushalte, Unternehmen und Technologien abdecken. Die Fallbeispiele wurden in Form von Fact Sheets erfasst. Darin wurden auf Basis der Literaturanalysen die Ziele und Einsatzbereiche der digitalen Produkte und Leistungen beschrieben, die erwarteten Umweltpotenziale dargestellt und die Rebound-Effekte mit ihren Wirkmechanismen erläutert. Sofern entsprechende Ergebnisse in der Literatur zu finden waren, wurden auch Angaben zum Ausmaß der Rebound-Effekte gemacht. Schließlich wurden Einflussfaktoren benannt, die Rebound-Effekte verstärken oder vermindern. Die Fact Sheets sind im Anhang A dokumentiert.

Tabelle 1 Fallbeispiele mit nachgewiesenen oder vermuteten Rebound-Effekten

Haushalte	Unternehmen	Technologien
1. E-Commerce	12. Präzisionslandwirtschaft	21. Mobilfunknetze 5G/6G
2. Online-Plattformen für Peer-to-Peer-Sharing	13. Cyberphysical Systems in der Produktion	22. Rechenzentren
3. Online-Plattformen für Gebrauchtgüterhandel	14. Additive Fertigung	23. Grüne Software
4. Online-Plattformen für Tourismus	15. Digitaler Produktpass	24. Cloud Computing
5. Streaming Media	16. Home-Office	25. Künstliche Intelligenz
6. E-Books	17. Videokonferenzen	26. Augmented and Virtual Reality
7. Digitale Zeitung	18. Mobility-as-a-Service	27. Quantencomputing
8. Smart Home	19. "Smarte" Transportlogistik	28. Digitaler Zwilling
9. Smart Metering	20. Metaverse	
10. Autonomes Fahren		
11. Routenplanung- und Navigationssysteme		

Quelle: eigene Darstellung, IZT.

Der zweite Arbeitsschritt umfasst die Querauswertung der 28 Fallbeispiele, um verallgemeinerbare Aussagen zu treffen, die ein besseres Verständnis von Rebound-Effekten der Digitalisierung ermöglichen. Dazu wurde die Literaturanalyse mit einer explorativen, qualitativen Ursache-Wirkungsmodellierung verknüpft. Eine ausführliche Beschreibung des Vorgehens bei der systemischen Modellierung findet sich in Anhang B. Die Auswertung umfasst die Analyse der Wirkmechanismen, die zu Rebound-Effekten der Digitalisierung führen, die Abschätzung ihres Ausmaßes sowie die Identifikation und Beschreibung des Zusammenspiels Rebound-fördernder und Rebound-hemmender Faktoren. Die Ergebnisse wurden auf einem Online-Workshop am 2. September 2024 einem Expertenkreis vorgestellt und diskutiert.

Darauf aufbauend wurden schließlich im dritten Arbeitsschritt mögliche Hebel ("Leverage Points") für politische Maßnahmen und Instrumente zur Eindämmung von Rebound-Effekten der Digitalisierung untersucht. Im Fokus standen dabei E-Commerce, Künstliche Intelligenz (Logistik und Wertschöpfung) und Metaverse als beispieldetaillierte digitale Anwendungen bzw. Zukunftstechnologien. Diese Analyse basiert auf einer Literaturanalyse, berücksichtigt die Umweltentlastungspotenziale und die Gründe, warum diese ggf. nicht erreicht werden. Die möglichen Maßnahmen bzw. Politikansätze sollen helfen, die Potenziale auszuschöpfen und Rebound-Effekte zu mindern oder idealerweise ganz zu vermeiden.

2 Ergebnisse der Analyse von Fallbeispielen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Querauswertung und der systemischen Analyse der untersuchten Fallbeispiele vorgestellt. Dieses Kapitel beantwortet folgende Fragen: Wie ist – vor dem Hintergrund der Literaturanalyse – die wissenschaftliche Datenbasis zu Rebound-Effekten der Digitalisierung zu bewerten? Welche Rebound-Effekte und Wirkmechanismen bei Produkten und Dienstleistungen treten in den Bereichen Haushalte, Unternehmen und Technologien auf? In welche systemischen Dynamiken sind die Rebound-Effekte eingebettet?

2.1 Datenbasis

Die Auswertung der Fallbeispiele zeigt, dass die wissenschaftliche Datenbasis zu Rebound-Effekten der Digitalisierung stark fragmentiert ist. Es dominieren eher qualitative Beschreibungen von Wirkmechanismen, die auf Plausibilitätsüberlegungen basieren, quantitative Abschätzungen liegen bislang kaum vor. Nur vereinzelt liegen sozial-empirische Studien vor, die die Auswirkungen von Rebound-Effekten von digitalen Technologien und Anwendungen auf tatsächliche Wirtschafts- und Konsumprozesse untersuchen.

Außerdem variieren die methodischen Ansätze der ausgewerteten Studien erheblich. Das bedeutet, dass sich der Einfluss von digitalen Technologien und Anwendungen auf die Umwelt nur innerhalb einer Studie sinnvoll miteinander vergleichen lässt. Ein Vergleich zwischen verschiedenen Studien ist nur unter großen Einschränkungen möglich. Die Einschätzungen schwanken stark, bewegen sich in einer hohen Bandbreite - bedingt durch unterschiedliche Methodiken, betrachtete Anwendungen, Zeiträume, Datengrundlagen, Systemgrenzen und Annahmen.

Trotz dieser empirisch fragmentierten Datenlage lassen sich aus den Fallanalysen wichtige Hinweisen auf Wirkmechanismen, Ausmaß und Einflussfaktoren von Rebound-Effekten der Digitalisierung ableiten. Diese werden im Folgenden entlang der drei Bereiche Haushalte, Unternehmen und Technologien beschrieben.

Die Wirkungsbeziehungen der 28 Fallbeispiele wurden in ein sehr umfangreiches Ursache-Wirkungsmodell überführt (siehe Anhang B), aus dem ein abstrahiertes systemisches Modell über die Dynamiken hinter der Digitalisierung im Allgemeinen (siehe Abbildung 7) entwickelt wurde. Dieses Modell dient später (Kapitel 3) der Begründung der Maßnahmen und Instrumente. Die als "Modellausschnitte" betitelten Abbildungen beziehen sich auf das abstrahierte systemische Modell. Sie zeigen das Modell aus unterschiedlichen Perspektiven – erkennbar am blau umrandeten Faktor - und gefiltert mit nicht allen Faktoren. Maßnahmen sind durch Faktoren mit grüner Schrift gekennzeichnet. Faktoren mit roter Schrift sind Probleme. Faktoren, die als Ziele der Gesellschaft angesehen werden können, haben eine gelbe Schrift. Der Faktor "Konsum: Komfort, Zeit, gutes Gefühl" ist mit blauer Schrift noch mal gesondert hervorgehoben. Die übrigen Faktoren haben eine schwarze bzw. graue Schrift. Die Polaritäten der Pfeile zeigen an, ob ein Faktor direkt zu mehr (+) oder weniger (-) von einem anderen Faktor führt. Die Pfeildicken deuten nur grob an, ob ein Einfluss vergleichsweise stark oder schwach ist. Rote Pfeile bilden selbstverstärkende Wirkungsschleifen, in denen sich Wirkungen im Zeitverlauf erhöhen. Blaue Pfeile bilden ausgleichende Wirkungsschleifen, welche Wirkungen im Zeitverlauf relativieren. Der Text auf einigen Pfeilen dient der Erläuterung der Wirkung. Zwei Pfeile zeigen zudem durch ein Symbol an, dass die Wirkung im Zeitverlauf zunimmt bzw. verzögert eintritt, etwa die Möglichkeit, dank der Effizienzgewinne und Steuereinnahmen weniger zu arbeiten.

2.2 Rebound-Effekte auf Ebene der Haushalte

Die Digitalisierung hat das Konsumverhalten in vielerlei Hinsicht tiefgreifend verändert und dabei häufig Rebound-Effekte auf Konsumebene begünstigt. Bei den untersuchten digitalen Produkten und Leistungen wurden auf der Ebene der Haushalte insbesondere Preis-, Komfort- und Zeit-Rebound-Effekte festgestellt. Materielle Rebound-Effekte treten hingegen seltener auf (Tabelle 2).

Tabelle 2: Übersicht der identifizierten Rebound-Effekte in der untersuchten Literatur zu Fallbeispielen im Bereich Haushalte

11 Fallbeispiele im Bereich Haushalte	Materieller Rebound-Effekt	Komfort-Rebound-Effekt	Preis-Rebound-Effekt	Zeit-Rebound-Effekt
E-Commerce		x	x	x
Online-Plattformen für Peer-to-Peer-Sharing		x	x	
Online-Plattformen für Gebrauchtwarenhandel		x	x	x
Online-Plattformen für Tourismus	x	x	x	x
Streaming Media	x	x	x	x
E-Books	x	x	x	x
Digitale Zeitungen		x	x	x
Smart Home	x	x	x	x
Smart Metering	x	x	x	
Autonomes Fahren	x	x	x	x
Routenplanung- und Navigationssysteme		x		x

Quelle: Eigene Darstellung, IZT.

Digitale Produkte und Dienstleistungen machen Konsumprozesse oft schneller, bequemer, zugänglicher und in vielen Fällen auch kostengünstiger im Vergleich zu ihren analogen Alternativen. Dies zeigt sich besonders in Bereichen wie dem E-Commerce, auf Online-Plattformen für Gebrauchtwarenhandel und für Peer-to-Peer Apartment Sharing oder bei digitalen Zeitungen und Smart Home-Technologien. Durch die ständige Verfügbarkeit und kostengünstige Abo- und Flatrate-Modelle, etwa bei Streamingdiensten oder Mobility-as-a-Service, nutzen viele Verbraucher*innen diese Angebote intensiver und häufiger, was zu einem deutlichen Mehrkonsum führen kann.

Ein zentraler Aspekt von Rebound-Effekten ist die komplementäre Nutzung digitaler und analoger Konsumpraktiken. Viele Konsument*innen nutzen sowohl digitale als auch physische Produkte parallel, statt digitale Angebote als Ersatz zu verwenden. Ein Beispiel sind digitale Zeitungen und E-Books, die häufig zusätzlich zur Print-Ausgabe gelesen werden. Dadurch steigt die Umweltbelastung insgesamt, da sowohl die Produktion als auch die Verbreitung analoger und digitaler Güter Ressourcen beanspruchen. Ähnlich verhält es sich im E-Commerce, wo Konsument*innen sich teilweise im stationären Handel beraten lassen, um anschließend aufgrund niedrigerer Preise online zu bestellen. Diese Verlagerung spart zwar kurzfristig Kosten, führt aber zu einer stärkeren Beanspruchung von Logistik- und Lieferketten und erhöht die Umweltauswirkungen.

Gleichzeitig erweitern digitale Plattformen den Zugang zu Konsumoptionen, was zu einem allgemeinen Anstieg des Konsums führen kann. Dies zeigt sich etwa bei der Online-Vermittlung von Privatunterkünften, die Reisen günstiger und zugänglicher macht, wodurch insgesamt mehr Reisen unternommen werden. Auch im E-Commerce wecken ständige Verfügbarkeit, breite Warenvielfalt und oft niedrige Preise neue Konsumbedürfnisse, die ohne die Digitalisierung nicht in gleichem Maße entstanden wären.

Digitale Konsumprozesse führen häufig zu Zeitersparnis, und in der Folge zu neuen, beschleunigten Konsumweisen. Online-Shopping ist schnell, bequem und nicht an gesetzliche Ladenöffnungszeiten gebunden, was Konsum jederzeit und überall ermöglicht. Maßnahmen der Online-Händler wie personalisierte Werbung, Produkt-Alerts und stark vereinfachte Kaufprozesse (Einkäufe nur mit nur einem Klick) setzen zusätzlich starke Konsumanreize. Diese Entwicklungen beschleunigen das Konsumverhalten insgesamt. Auch indirekte und wirtschaftsweite Rebound-Effekte spielen hierbei eine wichtige Rolle: auf Wiederverkaufsplattformen wird das durch den Verkauf gebrauchter Artikel gesparte Geld oft für neue Käufe verwendet. Zwar kaufen einige Nutzer*innen Gebrauchsgüter, um Geld zu sparen und Neukäufe zu vermeiden, andere hingegen nutzen das Ersparte für zusätzlichen Konsum, was den ursprünglichen ressourcenschonenden Ansatz wieder aufhebt. Auch im Bereich Tourismus ist der Aufwand für Urlaubsplanung, Informationsbeschaffung und Buchung deutlich gesunken. Dadurch werden Reisen spontaner und kurzfristig gebucht.

Die Digitalisierung bringt zudem neue Dienstleistungen hervor, wie etwa Streaming Media und Clouddienste, die stetig leistungsfähigere digitale Infrastrukturen erfordern. Diese benötigen enorme Mengen an Energie und Ressourcen, um den wachsenden Bedarf an Datenverarbeitung und -übertragung zu decken.

Ein weiteres Beispiel für Rebound-Effekte ist die Einführung digitaler Produkte und Dienstleistungen, die oft nicht nur der Ressourcenschonung, sondern auch der Befriedigung neuer Konsumbedürfnisse dienen. Ein Beispiel sind Smart-Home-Technologien - digitale Systeme, automatisierte Verfahren und vernetzte, ferngesteuerte Geräte in Wohnräumen. Zum Einsatz kommen sogenannte IoT-Geräte (Internet-of-things), wie smarte Steckdosen, Glühbirnen und LED-Streifen, Jalousien, Heizungskörperthermostate, Smart-TVs und vernetzte Lautsprecherboxen mit digitalen Sprachassistenten. Sie sind über zentrale Steuerungseinheiten verknüpft, die über mobile Endgeräte oder Computer bedient werden. Anbieter bewerben Smart Home-Lösungen offensiv mit dem Argument, dass sie dazu beitragen, Energie einzusparen (durch automatische Steuerung von Heizung, Lüftungs- und Klimaanlage sowie Beleuchtung und durch die Überwachung und Steuerung des Verbrauchs der Geräte). Smart Home-Technologien erfüllen nicht nur das Bedürfnis nach Energieeinsparung, sondern wecken zugleich neue Bedürfnisse nach mehr Komfort, Sicherheit und Entertainment, was zu einem gesteigerten Konsum von Geräten und Dienstleistungen führt (z. B. Öffnen und Schließen von Rollläden bei Ferienabwesenheit, Reinigen der Fußböden auch bei Abwesenheit, Stimmungsbeleuchtung der Innenräume, Vorheizen von Räumen von „unterwegs“). Des Weiteren treten Komfort- und Zeit-Rebound-Effekte auf: Wenn etwa durch autonome Haushaltsgeräte (z. B. Saugroboter) Zeit eingespart und diese für andere ressourcenintensivere Handlungen eingesetzt wird. Der Übergang zwischen Komfortansprüchen und dem Energiesparaspekt ist dabei fließend.

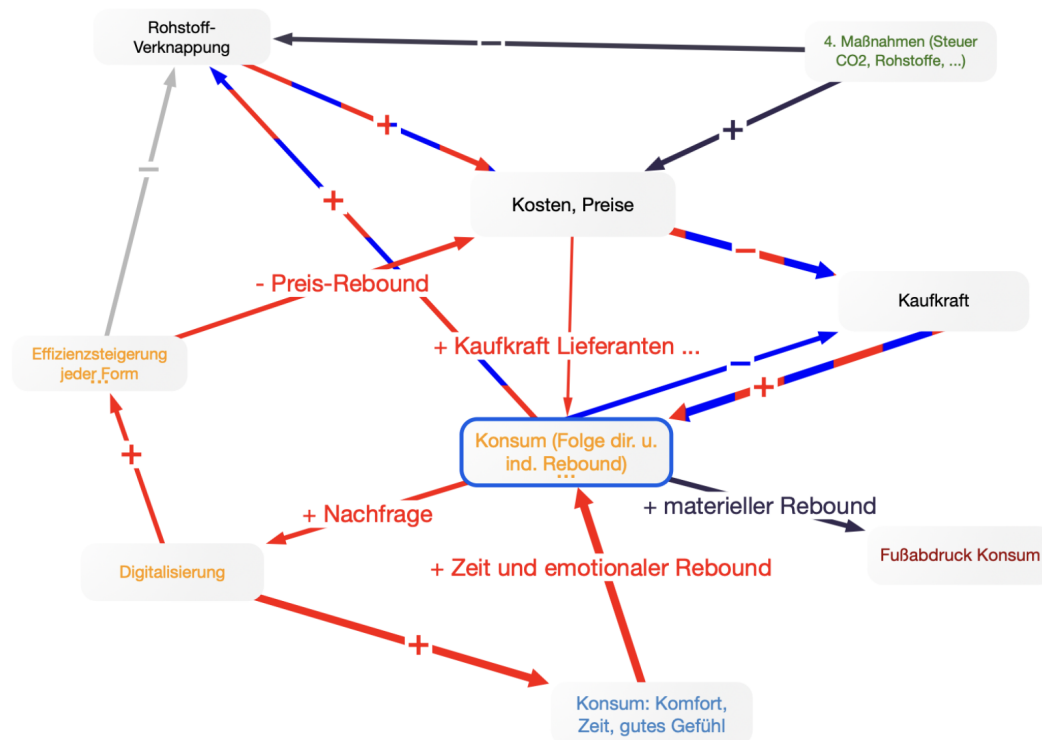
Auch im Bereich des Carsharings treten Rebound-Effekte auf, da Sharing-Optionen teilweise den öffentlichen Nahverkehr ersetzen, anstatt als Ergänzung zu dienen. Dadurch wird der ursprüngliche Umweltnutzen reduziert.

Darüber hinaus erweitert die Digitalisierung kontinuierlich die Funktionen digitaler Angebote und schafft neue Vertriebskanäle wie Instant Shopping, Social Commerce oder die Delegation von Konsumententscheidungen an digitale Assistenten. Diese neuen Wege des Konsums senken die Barrieren für den Kauf und beschleunigen Konsumententscheidungen. Insbesondere marktmächtige Plattformen sind mit ihren Geschäftsmodellen auf die Maximierung des Konsums ausgerichtet. Da sie sich oft über transaktionsabhängige Gebühren finanzieren, sind sie daran interessiert, die Verkaufs- oder Nutzungszahlen kontinuierlich zu steigern. Dies wird durch personalisierte Werbung, Social Media-Kampagnen, Rabatt-Aktionen, Gutscheine und Produkt-Alerts unterstützt, die Konsument*innen dazu verleiten, mehr zu konsumieren, als sie ursprünglich geplant hatten (Skaleneffekte und Wachstumsimperative).

Systemische Dynamiken aus der Perspektive privater Haushalte

Im Wirkungszusammenhang betrachtet führen Effizienzverbesserungen (durch Digitalisierung) sowohl in privaten Haushalten als auch auf Seiten der Unternehmen letztlich über die Kaufkraft zu mehr Konsum. Und mehr Konsum wird umgekehrt begrenzt (ausgleichende Wirkungsschleife) durch die Kaufkraft und etwaig die Verknappung von Rohstoffen. Abbildung 3 zeigt diese Dynamik zusammen mit den selbstverstärkenden Wirkungsschleifen aus Angebot und Nachfrage mit weiteren Effizienzsteigerungen sowie den ebenfalls selbstverstärkend wirkenden Zeit-, Komfort- und psychologischen Rebound-Effekten. Eine Besonderheit ist in diesem Zusammenhang der potenzielle Mehrkonsum von elektronischen Geräten durch die privaten Haushalte, wenn Smart-Home Technologien zum Energiesparen auch zum Kauf weiterer Smart-Home Technologien, die nur dem Komfort dienen, führen. Hier ist dann nicht allein das gesparte Geld durch die Energieeinsparung Treiber, sondern Komfort und Psychologie führen zum Kauf von mehr Geräten mit ökologischem Rucksack, aber eben auch mit Geld, welches an anderer Stelle nicht ausgegeben werden kann.

Abbildung 3: Modellausschnitt zu den Dynamiken hinter Konsum



Quelle: Eigene Darstellung, Consideo.

Die Digitalisierung verändert ökonomische und soziale Prozesse tiefgreifend – nicht nur hinsichtlich der Produktion und Distribution von Gütern und Dienstleistungen, sondern insbesondere auch im Hinblick auf das Konsumverhalten privater Haushalte. Vor dem Hintergrund begrenzter Budgetrestriktionen steht jede konsumtive Entscheidung unter dem Einfluss verfügbarer Ressourcen (Zeit, Geld, Aufmerksamkeit) und individueller Präferenzen. In mikroökonomischer Perspektive agieren Haushalte unter einer Budgetrestriktion: Einkommen (einschließlich Transfers und Ersparnissen) begrenzt den Spielraum für Konsum, Investition und Sparverhalten. Digitalisierung kann jedoch – direkt oder indirekt – finanzielle und zeitliche Ressourcen freisetzen: etwa durch kostengünstigere digitale Alternativen (z. B. Videostreaming statt Kinobesuch), automatisierte Prozesse (z. B. smarte Haushaltsgeräte) oder den Zugang zu Plattformökonomien (z. B. Gebrauchthandel, Sharing). Diese Einsparungen ermöglichen es Haushalten, Konsum in anderen Bereichen auszuweiten, ohne ihr Budget zu überschreiten. Systemisch betrachtet verschieben sich dabei die Allokationen innerhalb des Konsumbündels: Wird an einer Stelle weniger ausgegeben, entsteht Freiraum für Mehrkonsum an anderer Stelle. Diese Verschiebung kann jedoch ökologisch hochrelevant sein, wenn der Folge- oder Ersatzkonsum ressourcenintensiver ausfällt als das ursprüngliche Verhalten.

Daraus ergibt sich eine zentrale Frage für die Umweltpolitik: Wie lässt sich Konsum systemisch so steuern, dass Effizienzgewinne durch Digitalisierung nicht in eine Zunahme des Ressourcenverbrauchs münden? Eine mögliche Antwort liegt in der Einführung von marktkompatiblen Steuerungsinstrumenten. Eine „qualitätsdifferenzierte Steuer auf Konsum“, die Produkte und Dienstleistungen gemäß ihrer Umweltwirkung differenziert besteuert, wäre ein potenziell wirksames Instrument. Sie könnte Preissignale senden, die umweltfreundlichen Konsum attraktiver machen, ohne pauschale Verbote zu erfordern. Beispiele wären reduzierte Steuersätze für langlebige, energieeffiziente oder wiederverwendete Produkte. Eine solche Steuerung müsste jedoch sozial abgefedert werden – etwa durch ein bedingungsloses Grundeinkommen oder zielgerichtete Transfers –, um regressiven Verteilungseffekten entgegenzuwirken. Gleichzeitig sind administrative Herausforderungen zu beachten: Die genaue ökologische Bewertung von Produkten, die Abgrenzung zwischen Güterkategorien sowie die potenzielle Einflussnahme von Interessengruppen erhöhen die Komplexität und erfordern hohe Transparenz. Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt aus dem Systemischen Modell, in dem u. a. die selbstverstärkende Wirkungsschleife der Nachfrage nach Produkten der Digitalisierung aufgrund ihres Nutzens, sowie die ausgleichende Wirkungsschleife über die Kaufkraft dargestellt ist.

2.3 Rebound-Effekte im Bereich der Unternehmen

Im Bereich Unternehmen zeigt die Analyse digitaler Produkte und Dienstleistungen vor allem Preis- und materielle Rebound-Effekte. Zeit- und Komfort-Rebound-Effekte kommen hingegen weniger häufig vor (Tabelle 3).

Tabelle 3: Übersicht der identifizierten Rebound-Effekte in der untersuchten Literatur zu Fallbeispielen im Bereich Unternehmen

9 Fallbeispiele im Bereich Unternehmen	Materieller Rebound-Effekt	Komfort-Rebound-Effekt	Preis-Rebound-Effekt	Zeit-Rebound-Effekt
Präzisionslandwirtschaft	x		x	
Cyberphysical Systems in der Produktion	x		x	
Additive Fertigung	x	x	x	

9 Fallbeispiele im Bereich Unternehmen	Materieller Rebound-Effekt	Komfort-Rebound-Effekt	Preis-Rebound-Effekt	Zeit-Rebound-Effekt
Digitaler Produktpass	x			
Home-Office	x	x	x	x
Videokonferenzen	x	x	x	x
Mobility-as-a-Service		x	x	
“Smarte” Transportlogistik	x	x	x	x
Metaverse	x	x		x

Quelle: Eigene Darstellung, IZT.

Die Digitalisierung führt in Unternehmen zu erheblichen Effizienzgewinnen, die jedoch häufig Rebound-Effekte auslösen können, wodurch die erwarteten Einsparungen an Ressourcen oder Energie durch gesteigerten Konsum oder Produktionseffekte kompensiert werden. Ein zentraler Mechanismus solcher Rebound-Effekte besteht darin, dass erzielte Effizienzgewinne häufig genutzt werden, um Leistung, Komfort oder Sicherheit von Produkten zu erhöhen. Statt den Ressourcenverbrauch zu senken, führt die Effizienzsteigerung oft dazu, dass neue Produkte und Dienstleistungen entwickelt werden, die die Nachfrage weiter ankurbeln. Ein Beispiel hierfür ist der Einsatz von Technologien wie Precision Farming in der Landwirtschaft oder autonomes Fahren in der Automobilindustrie. Diese Innovationen basieren auf den Effizienzgewinnen der Digitalisierung, erschaffen jedoch zugleich neue Märkte und Konsumbedürfnisse, die den Ressourcenaufwand erhöhen können (Skaleneffekte und Wachstumsimperative).

Weiterhin bewirken Effizienzgewinne durch die Digitalisierung, dass Produkte kostengünstiger hergestellt werden können, etwa durch die Einführung von cyberphysikalischen Systemen, Künstlicher Intelligenz, Digitaler Zwilling oder Additiver Fertigung (3D-Druck). Diese Technologien können eine kostengünstigere und schnellere Produktion ermöglichen, was zu einer Nachfragesteigerung führt (Kostensenkungseffekte). Wenn Produkte billiger werden, erhöht sich oft auch die Konsumneigung, da mehr Menschen sich diese Produkte leisten können. Ein solches Verhalten verstärkt den Konsum und führt dazu, dass trotz der Effizienzgewinne die Gesamtnachfrage nach Ressourcen steigt. In diesen Fällen wird also nicht der Ressourcenaufwand verringert, sondern der Leistungs-Output erhöht, was die Umwelt- und Ressourcenschonung einschränkt.

Ein weiterer Aspekt der Rebound-Effekte zeigt sich in der Automatisierung von Arbeitsprozessen, bei denen Arbeit zunehmend durch Energie und Material ersetzt wird. Unternehmen setzen durch die Digitalisierung weniger auf menschliche Arbeitskraft, sondern verstärkt auf automatisierte Systeme, was zwar kurzfristig zu Kosteneinsparungen führt (Kostensenkungseffekte), gleichzeitig jedoch den Ressourcenverbrauch durch Maschinen und energieintensive Prozesse erhöht. Während dies die Arbeits- und häufig auch die Kapitalproduktivität erhöht, steigt gleichzeitig der Energieverbrauch in den Produktionsprozessen.

Die flexible Anpassung der Produktion an individuelle Kundenwünsche, die durch digitalisierte und automatisierte Systeme ermöglicht wird, ist ebenfalls ein wichtiger Treiber für Rebound-Effekte. Die Individualisierung von Produkten führt oft zu einer erhöhten Nachfrage, da Kund*innen spezifische Produkte nach ihren Wünschen gestalten können. Dies verstärkt den Konsum, zumal individualisierte Produkte häufig als höherwertiger wahrgenommen werden.

Ein besonders auffälliges Beispiel ist der Austausch elektronischer Geräte wie Smartphones weit vor dem Ende ihrer technischen Lebensdauer. Durch fortwährende Innovationen und verbesserte Funktionalitäten entstehen immer neue Produktvarianten, die Konsument*innen dazu anregen, ihre Geräte früher als notwendig zu ersetzen, was die Lebensdauer der Produkte verkürzt und den Ressourcenbedarf erhöht (Beschleunigung von Innovationszyklen).

Zusätzlich führt die Individualisierung der Produktion durch Technologien wie Additive Fertigung und cyberphysikalische Systeme dazu, dass die Produktvielfalt stark zunimmt. Während dies den Wünschen der Konsument*innen entgegenkommt, hat es zugleich negative Auswirkungen auf die Umwelt, da die Vielfalt und Spezialisierung von Produkten das Recycling erheblich erschweren. Verschiedene Materialien und Komponenten, die durch diese individualisierte Fertigung entstehen, sind oft schwer zu recyceln, was den Ressourcenverbrauch in der Entsorgungsphase verstärkt.

Auch im Bereich der Transportlogistik zeigt sich, dass die Digitalisierung zu Rebound-Effekten führen kann. Durch die Einführung von Assistenzsystemen, optimiertes Flottenmanagement oder die Bündelung von Transportleistungen über digitale Plattformen können Unternehmen ihre Logistikprozesse zwar effizienter gestalten, doch diese Effizienzgewinne führen häufig zu einer Steigerung der Transportnachfrage. So kann es zur Verlagerung des Güterverkehrs von der Schiene auf die Straße kommen, da digitale Systeme den Straßengüterverkehr effizienter und kostengünstiger machen. Somit steigen die CO₂-Emissionen trotz der Optimierung von Logistikprozessen (Kapitel 3.2.2).

Die genaue Ausprägung der Rebound-Effekte variiert je nach Branche, verwendeter Technologien, Anwendungen und Unternehmenspraktiken. Besonders Prozesseffizienz, Kosteneinsparungen, Preiseffekte und Preiselastizität der Nachfrage sind entscheidende Faktoren, die darüber bestimmen, wie stark die Rebound-Effekte in einem Unternehmen oder einer Branche ausfallen. Unternehmen, die stark auf Preisanreize setzen oder die Effizienzgewinne vor allem für die Entwicklung neuer, leistungsfähigerer Produkte nutzen, verstärken Rebound-Effekte eher als solche, die Effizienzsteigerungen gezielt zur Ressourcenschonung einsetzen. Insgesamt zeigt sich: Effizienzgewinne durch die Digitalisierung führen oft zu einer Erhöhung des Konsums und neutralisieren dadurch teilweise die potenziellen Vorteile für Umwelt und Ressourcen.

Systemische Dynamiken aus der Perspektive der Unternehmen

Wie beschrieben, beziehen sich die Digitalisierung und Effizienzsteigerung in Unternehmen auf die effizientere Bereitstellung von Produkten und Dienstleistungen. Diese Effizienzsteigerung ist dabei selbstverstärkend durch technologische Entwicklungen möglich und wird durch Nachfrage finanziert.

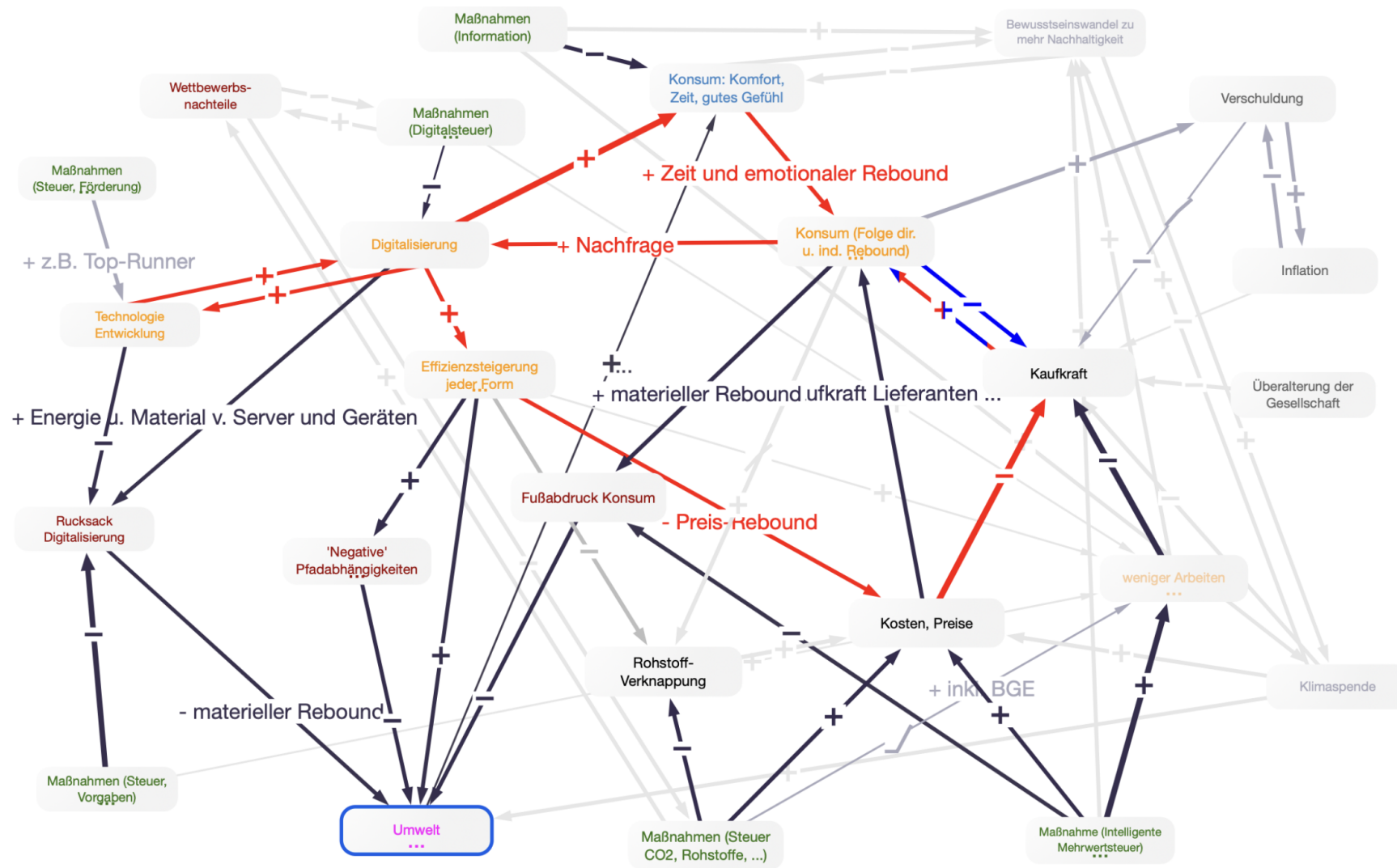
Der Hintergrund der Digitalisierung in Unternehmen ist systemisch: Unternehmen investieren, um wettbewerbsfähig zu sein. Investitionen erfordern Zinsen und damit Produktivitätssteigerungen. Digitalisierung im Unternehmensbereich verspricht solche Effizienzsprünge und ist damit, unabhängig von potenziellen Umweltentlastungspotenzialen, zunächst eine logische Konsequenz.

Über eine weitergegebene Preissenkung sparen die Kund*innen dann Geld, welches sie für andere Produkte mit Umweltbelastung oder mehr von dem gleichen Produkt ausgeben können. Das Unternehmen selbst erzielt dadurch in der Regel mit den gleichen Kund*innen keine Umsatzsteigerung, hat jedoch das Potenzial, in Konkurrenz zu anderen Unternehmen neue Kund*innen zu gewinnen. Das, was an Umsatz anderen Unternehmen dadurch genommen wird, nivelliert dann aber potenziell wieder die Umweltbelastung.

Nicht weitergegebene Preissenkungen führen potenziell zu einer Expansion des Unternehmens im gleichen oder in einem anderen Bereich oder zur Ausschüttung an die Eigner. So führen auch nicht weitergegebene Preissenkungen potenziell zu mehr Umweltbelastung.

Treiber digitaler Lösungen in Unternehmen sind nicht nur die einzelnen Unternehmen, sondern ganze Branchen und deren Vertreter, die über Werbung und Lobbyarbeit Einfluss nehmen. Eine Besteuerung der Digitalisierung (Formen der Digital- oder Roboter-Steuer) erscheint daher wenig sinnvoll, da sie sowohl die Wettbewerbsfähigkeit als auch das Potenzial für Effizienzverbesserungen gleichermaßen gefährden könnten. Ähnliches gilt für eine Besteuerung des Energieverbrauchs und der Rohstoffinanspruchnahme in Unternehmen. Auch diese gefährdeten unmittelbar die Wettbewerbsfähigkeit in einem globalen Wettbewerbsmarkt - es sei denn, entsprechende Maßnahmen würden international abgestimmt und so ausgestaltet, dass keine Verlagerung der Produktion stattfindet. Beispiele dafür sind Ausgleichsmechanismen wie der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM).

Abbildung 4: Modellausschnitt zu den Dynamiken hinter Unternehmen



Quelle: Eigene Darstellung, Consideo.

Wenn eine internationale Abstimmung und der Schutz vor Billigimporten ohne Besteuerung wirtschaftspolitisch nicht durchsetzbar sind, bleibt im Grunde nur eine Besteuerung des ökologischen Rucksacks von Produkten und Dienstleistungen oder entsprechende Auflagen. Das beträfe wie beim Beispiel CBAM auch importierte Produkte und gefährdete nicht den Export. Allerdings sind mit solchen Mechanismen teilweise erhebliche Verwaltungsaufwände und Abgrenzungsprobleme verbunden.

2.4 Rebound-Effekte auf Ebene der Technologien

Die Untersuchung ausgewählter digitaler Produkte und Dienstleistungen im Bereich Technologien zeigt insbesondere finanzielle und materielle Rebound-Effekte, wohingegen Zeit- und Komfort-Rebound-Effekte seltener auftreten (Tabelle 4).

Tabelle 4: Übersicht der identifizierten Rebound-Effekte in der untersuchten Literatur zu Fallbeispielen im Bereich Technologie

8 Fallbeispiele im Bereich Technologie	Materieller Rebound-Effekt	Komfort-Rebound-Effekt	Preis-Rebound-Effekt	Zeit-Rebound-Effekt
Mobilfunknetze 5G/6G	x		x	x
Rechenzentren	x		x	
Software	x	x	x	x
Cloud Computing			x	x
Künstliche Intelligenz	x		x	
Augmented/Virtual Reality	x	x		
Quantencomputing	x		x	
Digitaler Zwilling	x			

Quelle: Eigene Darstellung, IZT.

Die Rebound-Effekte der Digitalisierung auf technologischer Ebene entstehen durch Mechanismen, die mit den stetigen Fortschritten bei der Ressourceneffizienz und Leistungsfähigkeit digitaler Technologien zusammenhängen. Ein zentraler Mechanismus ist der durch das Koomey's Law beschriebene Zusammenhang, wonach die Energieeffizienz von Informationstechnik alle paar Jahre deutlich zunimmt - ähnlich wie Moore's Law bei der Rechenleistung. Diese fortschreitende Ressourceneffizienz führt zu permanenten Leistungssteigerungen bei der IKT, wodurch anspruchsvolle Technik wie leistungsstarke Computer oder mobile Geräte zunehmend erschwinglicher werden - auch im Konsumbereich. Da die Produkte kostengünstiger und leistungsstärker werden, steigt die Nachfrage nach solchen Technologien, was die positiven Effekte der Effizienzsteigerung häufig wieder ausgleicht.

Zudem werden technologische Fortschritte genutzt, um neue Produkte, Produktvarianten und Dienstleistungen zu entwickeln, welche ihrerseits den Konsum weiter anregen. Technologien wie Künstliche Intelligenz, Digitaler Zwilling, Quantencomputing oder Augmented/Virtual Reality schaffen nicht nur neue Anwendungsmöglichkeiten, sondern auch neue Konsumbedürfnisse, indem sie den Markt mit innovativen Produkten erweitern (Skaleneffekte und Wachstumsimperative). Solche Technologien finden in verschiedenen Sektoren breite Anwendung - von Mobilität und Industrie über Bildung und Gesundheit bis hin zu Medien und Unterhaltung. Diese Entwicklung steigert den technologischen Konsum insgesamt und sorgt

dafür, dass immer mehr Produkte und Dienstleistungen auf Basis neuer Technologien entwickelt werden, was zu Mehrkonsum führt und den Ressourcenverbrauch weiter antreibt.

Ein besonders signifikanter Aspekt der technologischen Dynamik hinter den Rebound-Effekten ist die Einführung von Mobilfunknetzen wie 5G und 6G, die erheblich mehr Infrastrukturtechnik für die Datenübertragung benötigen und zahlreiche neue Anwendungsmöglichkeiten schaffen. In der Mobilität könnten etwa autonome Fahrzeuge und vernetzte Verkehrssysteme auf diese Netzwerke zurückgreifen, während in der Industrie eine noch stärkere Automatisierung und Digitalisierung von Prozessen ermöglicht wird. Auch in den Bereichen Bildung und Gesundheit eröffnen sich durch diese Netzwerke neue Möglichkeiten für Fernunterricht, Telemedizin und weitere digitale Dienstleistungen. Diese neuen Anwendungen vergrößern jedoch den technologischen Konsum erheblich, da sie zusätzliche digitale Infrastruktur erfordern und oft neue Endgeräte für die Nutzung benötigen. Trotz Effizienzgewinnen in der Datenübertragung und -verarbeitung führen diese Fortschritte zu einer Erhöhung des Gesamtkonsums an Ressourcen (Verlagerung von Umweltbelastungen).

Ein weiterer Rebound-Effekt entsteht durch die kurzen technologischen Innovationszyklen digitaler Produkte und Dienstleistungen, die häufig in Alltagsgegenstände integriert sind. Produkte wie Smart Home-Geräte oder Augmented/Virtual Reality-Technologien veralten immer schneller, da neue Generationen von Geräten mit verbesserten Funktionen auf den Markt kommen. Diese verkürzten Innovationszyklen führen zu einer verkürzten Lebens- und Nutzungsdauer der Produkte, da Konsument*innen dazu neigen, ältere Geräte durch neue, leistungsstärkere Modelle zu ersetzen, bevor die technische Lebensdauer erreicht ist. Dieser beschleunigte Austausch führt zu einem erhöhten Ressourcenverbrauch und verschärft das Problem der Elektroschrottsorgung. Darüber hinaus erfordert die Nutzung der Smart Home-Technik häufig ein Smartphone eines bestimmten Herstellers und einer bestimmten Hardware-Generation. Diese Anforderung kann dazu führen, dass das vermeidlich ältere Smartphone aufgegeben und ein aktuelles angeschafft wird. Auch funktionieren digitale Produkte oft im Zusammenspiel mit anderen Geräten desselben Herstellers, was also zur Herstellerabhängigkeit und zu neuen Bedarfen (Lock-In-Effekte) führen kann.

Darüber hinaus führt die ständige Steigerung der Leistungsperformance neuer Produkte bei ähnlich hoch bleibenden Preisen zu einer Verringerung der Attraktivität von Wiederverwendung (Reuse) oder Reparaturen digitaler Produkte. Sind leistungsfähigere Produkte zu ähnlichen Kosten erhältlich wie ältere Modelle, entscheiden sich Konsument*innen eher für den Neukauf statt für die Reparatur oder Wiederverwendung älterer Geräte. Dies verstärkt den Ressourcenverbrauch, da die Nachfrage nach neuen Produkten kontinuierlich steigt, während die Nutzung älterer Geräte zurückgeht.

Weiterhin hängt die Nutzungsdauer smarterer Produkte davon ab, dass aktuelle Softwareupdates und ggf. eine Cloud-Plattform verfügbar sind. Zudem setzen Smart Home-Produkte, um sie (risikolos) im Heimnetz betreiben zu können, ein aktuelles Softwareupdate und häufig auch eine Cloud-Plattform voraus (Software- und vernetzungsabhängige Pfadabhängigkeiten) (Jaeger-Erben et al. 2023). Sind beide Faktoren nicht für eine überschaubare lange Zeit gewährleistet, sinkt die Attraktivität von Reuse-Produkten für Konsument*innen.

Ein weiterer Rebound-Effekt entsteht durch die zunehmende Produktvielfalt, die durch technologische Fortschritte ermöglicht wird. Die Individualisierung von Produkten führt dazu, dass immer mehr spezialisierte und vielfältige Varianten digitaler Produkte auf den Markt kommen. Dies erschwert jedoch das Recycling erheblich, da die verschiedenen Materialien und Komponenten in diesen spezialisierten Produkten oft schwer zu trennen und wiederzuverwerten sind. Dadurch wird die Ressourcenschonung im Produktlebenszyklus weiter

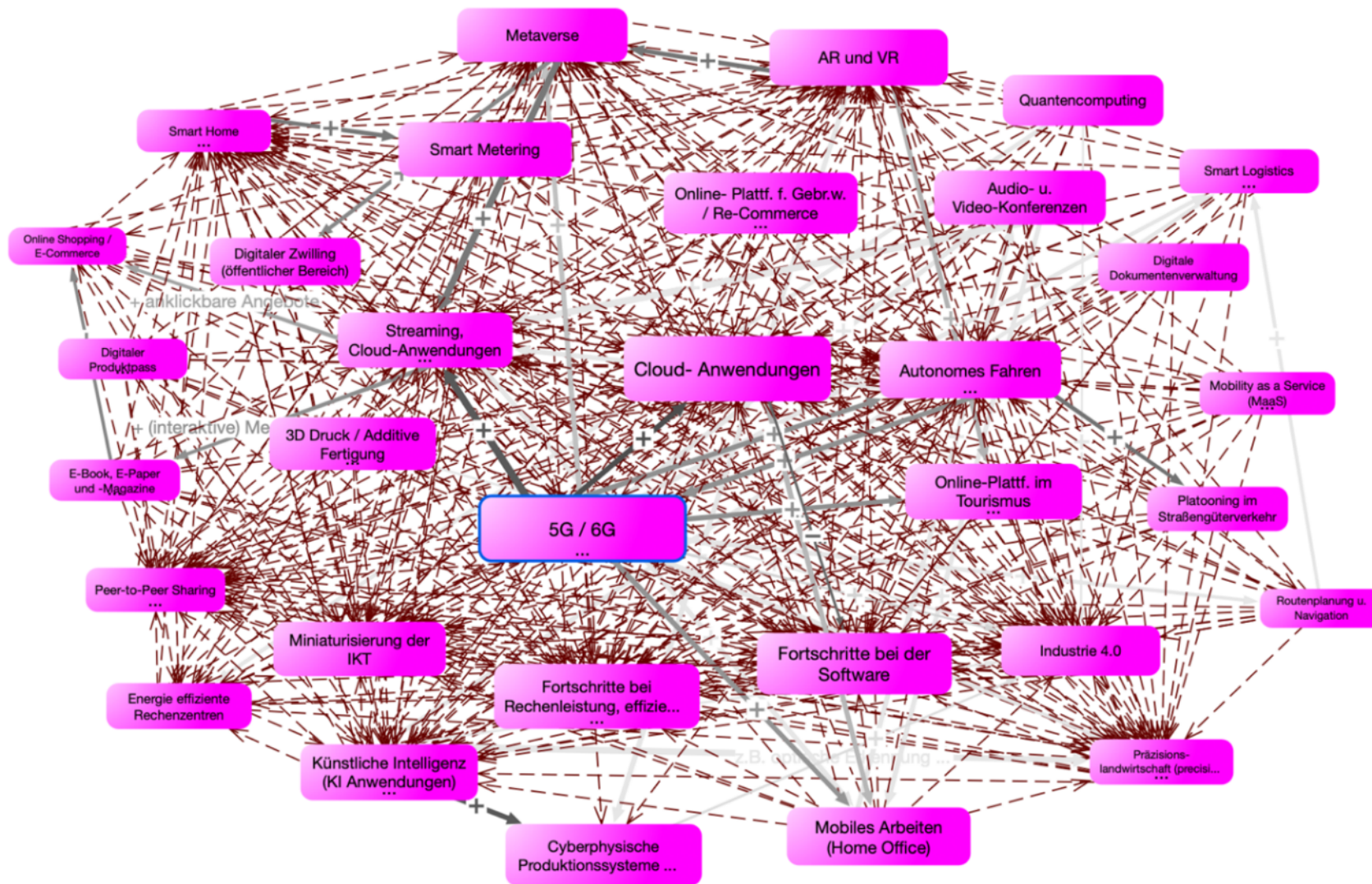
eingeschränkt, da das Recycling ineffizienter wird und mehr Primärrohstoffe für die Produktion neuer Geräte benötigt werden.

Systemische Dynamiken aus der Perspektive der Technologien

Viele Bereiche der Digitalisierung sind eng miteinander verknüpft und verstärken sich gegenseitig. So begünstigt die Weiterentwicklung von 5G- und 6G-Funktechnologien sowohl das autonome Fahren als auch Industrie 4.0. Gleichzeitig treiben Fortschritte in diesen Bereichen wiederum die Weiterentwicklung und den Ausbau der Mobilfunktechnologien voran. Wird Augmented Reality oder Virtual Reality für Industrie 4.0 genutzt, so finden diese Technologien auch im Freizeit- oder Bildungsbereich Anwendung – und umgekehrt. Der Künstlichen Intelligenz kommt dabei die Sonderrolle zu, da das Erkennen von Sprache und Objekten im Raum in allen Bereichen einsetzbar wird – von der Industrie- und Dienstleistungs-Robotik über autonomes Fahren und digitale Landwirtschaft bis hin zu privaten Haushalten.

Abbildung 5 zeigt eine gefilterte Darstellung des qualitativen Gesamtmodells. Sie veranschaulicht, wie sich die systemischen Dynamiken im Modell – unter Einbeziehung aller Fallbeispiele aus AP 1 – entfalten. Dabei wird deutlich, dass die Fallbeispiele durch ein komplexes Netz wechselseitiger Beziehungen miteinander verknüpft sind. Teilweise handelt es sich um direkte technologische Zusammenhänge, teilweise aber auch um ökonomische oder gesellschaftliche Zusammenhänge, etwa wenn Kosteneinsparungen neue Möglichkeiten schaffen oder ein Wertewandel die Nachfrage entweder antreibt oder bremst.

Abbildung 5: Gefilterte Ansicht der Zusammenhänge zwischen den Fallbeispielen



Quelle: Eigene Darstellung, Consideo.

In der Dynamik hinter und zwischen den Technologien überlagern sich diverse Effekte: verkürzte Produktlebenszyklen und geringere Economies of Scale, Innovationen in einem Bereich, die gleichzeitig Innovationen in ganz anderen Bereichen auslösen, eine Finanzwirtschaft, die auf der Suche nach Renditen Technologien und Anwendungen antreibt sowie Kaufmotive (Distinktion, Attribution, Energiesparen, Unterhaltung, etc.), die nach immer mehr Neuem fragen, dadurch die Produktlebenszyklen verkürzen und Verbraucher*innen weiter zu Neukäufen animieren.

Ein wesentlicher Faktor für die verkürzten Lebenszyklen digitaler Produkte sind marktbeherrschende Akteure, die gerade im Bereich der Digitalisierung durch Netzwerkeffekte zunehmend an Einfluss gewinnen. Indem sie die rechtliche, finanzielle oder organisatorische Kontrolle über zentrale Plattformen und Technologien übernehmen, bestimmen sie maßgeblich die Innovationsdynamik und den Wettbewerb in der Digitalisierung. Das ist ein ambivalentes Phänomen: einerseits wird der Wettbewerb um Effizienzverbesserungen eingeschränkt, andererseits sind die Forschungsbudgets – durch die großen Gewinne in wenigen Unternehmen konzentriert – riesig und ermöglichen technologische Entwicklungen, die für kleinere Unternehmen kaum denkbar wären². Der Kontext vergrößert sich, wenn es alternativ um die universitäre Forschung und deren staatliche Finanzierung geht. Nicht zuletzt vor diesem Hintergrund sind verpflichtende Standards – etwa hinsichtlich Kompatibilität – und Vermeidung von Monopolen durch staatliche Maßnahmen von großer Bedeutung. Ob es sich um Rebound-Effekte handelt, wenn Unternehmen ihre Marktmacht benutzen und kürzere Lebenszyklen bedingen, hängt letztlich davon ab, ob die Neukäufe aufgrund der Umweltversprechen getätigt werden.

Auch spielen in vielen Bereichen Pfadabhängigkeiten eine große Rolle, wenn durch Digitalisierung gesellschaftlich problematische Optionen nachhaltiger werden und aus ökologischer und gesellschaftlicher Sicht zu präferierende Optionen unattraktiver werden. Die Präzisionslandwirtschaft zum Beispiel kann die kapitalintensive, industrielle Landwirtschaft mit Einsatz konventioneller Spritz- und Düngemittel begünstigen und so eine resilientere, kleinteiligere, ökologische oder regenerative Landwirtschaft verhindern. In bestimmten Ausprägungen – etwa bei der mechanischen Beikrautvernichtung durch KI – kann die Präzisionslandwirtschaft die ökologische Landwirtschaft aber auch fördern.

Ein anderes Beispiel für Pfadabhängigkeiten ist die Digitalisierung des Straßenverkehrs, die diesen effizienter und attraktiver macht und damit den Schienenverkehr in Bezug auf Investition und Nutzung kannibalisiert. Investitionen reichen dabei vom Ausbau von Straßen (neue Straßen, Fahrspuren und Plätze für autonom fahrende Taxis) über die Optimierung von Fahrbahnmarkierungen und vernetzte Verkehrsleitsysteme bis zur perspektivischen Installation von V2x Sensorik zur Vernetzung von Fahrzeugen – nicht nur untereinander, sondern auch mit Verkehrsleitsystemen, Ladestationen etc.

Auf politischer Ebene können gewünschte Technologien durch gezielte Förderung oder Vorgaben, z. B. für ein modulares Design, längere Lebensdauern, Reparierbarkeit, standardisierte Schnittstellen und Recycling, begünstigt werden.

Insgesamt müssen auch Verlagerungseffekte mitbetrachtet werden, d. h. ob etwa die Reduktion von Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von Technologien durch eine Mehrinanspruchnahme von Ressourcen „erkauft“ wird. Hier könnte die Kommunikation eines Handabdrucks (Kühnen et al. 2017) als handlungsleitende Orientierungshilfe dienen.

² <http://www.imodeler.info/ro?key=CGZXRWtnD9FOHkoL93Bcasw>

2.5 Ausmaß von Rebound-Effekten

Dieses Kapitel untersucht, welche Aussagen zum Ausmaß von Rebound-Effekten bei digitalen Produkten und Leistungen auf Basis der betrachteten Literatur getroffen werden können.

Die Wahrscheinlichkeit, dass digitale Leistungen und Produkte zu Rebound-Effekten führen, ist hoch. Beispielsweise wird eine ressourceneffizientere Produktion die Produkte günstiger machen, sodass mehr davon abgesetzt werden können. Ein flüssigerer Verkehr wird zusätzlichen Verkehr attraktiv machen. Oder: Digitale Plattformen erweitern den Zugang zu Konsumoptionen, was zu mehr Konsum führen kann. Allerdings ist die Quantifizierung möglicher Rebound-Effekte – wie die Fallbeispiele im Anhang A zeigen – komplex und mit großen Unsicherheiten verbunden. Bereits die Bemessung der Umweltentlastungspotenziale als Referenzbasis zur Ermittlung von Rebound-Effekten ist schwierig. Dies gilt erst recht für die Quantifizierung möglicher Wirkmechanismen, die dazu führen, dass Effizienzpotenziale infolge von Rückkopplungen nicht erschlossen werden. Es fehlt an Transparenz, um die Annahmen und Berechnungen der jeweiligen Umweltentlastungspotenziale und Folgen der Wirkmechanismen kausal im Detail nachvollziehen zu können. Dies gilt insbesondere auch für Studien der Bitkom, die unter dem Titel „Klimaeffekte der Digitalisierung“ mediale Aufmerksamkeit erhalten haben. Bitkom ist der Verband der Informations- und Telekommunikationsbranche, die naturgemäß ein Interesse daran hat, die Vorteile des Einsatzes ihrer Produkte darzustellen. Die erste Bitkom-Studie zu diesem Thema, welche 2021 veröffentlicht wurde, prognostizierte, dass digitale Technologien je nach Verbreitungsgeschwindigkeit ca. 23 bis 34 % zum deutschen Emissionsreduktionsziel 2030 beitragen können. Die zweite Studie prognostiziert einen Beitrag von ca. 14 bis 26 % zum Emissionsreduktionsziel (Bitkom 2024). Das Umweltbundesamt kommt in einem Positionspapier (2024) zu der Einschätzung, dass auch die zweite Studie „keine valide Grundlage für eine Abschätzung des Klimabeitrags der Digitalisierung darstellt. Das technisch mögliche Einsparpotenzial, gemessen in Kohlenstoffdioxidäquivalenten (CO₂e), für die jeweilige digitale Anwendung ist oft unplausibel hoch. Demgegenüber fällt die Berechnung zum CO₂e-Fußabdruck der digitalen Infrastrukturen ausgesprochen niedrig aus, was teilweise an der schlechten Datenlage, unplausiblen Annahmen zu Rechen- und Speicherleistungen, den optimistischen Annahmen zum Ausbau erneuerbarer Energien in den Zulieferländern und der engen Bilanzgrenze Deutschland liegt“ (Axenbeck et al. 2024, S. 1).

In der #SMARTer 2030-Studie (2015) der GeSI, einem internationalen Zusammenschluss von großen Unternehmen aus dem IT-Sektor, wurde versucht, die Rebound-Effekte der Digitalisierung über die Treibhausgasemissionen zu quantifizieren. Insgesamt wurde geschätzt, dass die durch Rebound-Effekte zu erwartende Mehr-Emissionen das Reduktionspotenzial nur um 11 % reduzieren. Allerdings sind die in der Studie getroffenen Annahmen wenig transparent und kaum nachvollziehbar. Vielmehr erscheinen die Annahmen unter Berücksichtigung der bisherigen Entwicklung sehr optimistisch (Hintemann 2017). In der Bitkom-Studie „Klimaeffekte der Digitalisierung 2.0“ werden Rebound-Effekte mit Verweis auf die #SMARTer 2030-Studie thematisiert. Aufgrund der Komplexität erfolgt in dieser Studie jedoch keine Berechnung der Rebound-Effekte. Grundsätzlich zeigt die Literaturrecherche, dass für die Quantifizierung der Rebound-Effekte der Digitalisierung keine gesicherte Datenbasis existiert³.

³ Die Studien von Bitkom (2021; 2024) bzw. von GeSI (2015) bleiben bei den Fallbeispielen unberücksichtigt. Hauptkritikpunkt ist die fehlende Transparenz, um die Annahmen und Berechnungen der jeweiligen Umweltentlastungspotenziale im Detail nachvollziehen zu können. Was die Abschätzung von Rebound-Effekten anbetrifft, können die Daten in den meisten Fällen nicht nachvollzogen werden, einige Daten wurden aus veralteten Studien übernommen und die wissenschaftliche Qualität der Daten ist oft nicht ausreichend.

2.6 Rebound-verstärkende und Rebound-mindernde Faktoren

Im Folgenden werden Rebound-verstärkende und Rebound-mindernde Faktoren dargestellt, die in der Literaturanalyse und in der systemischen Analyse identifiziert wurden.

Im Vergleich zu „klassischen“ Rebound-Effekten, wie sie vor allem bei der Energienutzung festgestellt und untersucht wurden, können Rebound-Effekte durch Digitalisierung vielschichtiger sein. Dabei treten teils andere und komplexere Wirkmechanismen auf. Rebound-Effekte können sowohl „innerhalb“ auf der Ebene digitaler Geräte und Dienstleistungen, Software und Infrastrukturen (Rechenzentren, Netze, etc.) als auch durch neue digitale Produkte und Leistungen (Effizienzgewinne durch digitale Anwendungen) entstehen.

Digitale Dienstleistungen, Technologien und Produkte verändern zudem Produktion, Konsummuster und Lebensstile. Die damit verbundenen ökologischen Effekte wirken systemisch und zeichnen sich häufig erst langfristig ab. Lösungen, die zur Entkopplung von Digitalisierung und Ressourcenverbrauch beitragen sollen, können daher nur aus einer systemischen Perspektive entwickelt werden. Es ist wenig zielführend, Rebound-Effekte auf einzelne Produkte und Prozesse zu beschränken. Vielmehr sollten sie in eine systemische Perspektive und Dynamik von Angebot, Nachfrage und Konsum eingeordnet werden.

Die Digitalisierung ist stark in ökonomische Wachstumslogiken eingebettet, die eine absolute Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch erschweren. Dabei spielt die marktbeherrschende Stellung großer Tech-Konzerne und Plattformen eine zentrale Rolle. Plattformunternehmen wie *Amazon* oder *Google* profitieren von der Zunahme des Datenverkehrs und des Online-Konsums, wodurch Wachstum gefördert wird, das Umweltbelastungen verstärkt. Algorithmen und personalisierte Werbung optimieren die Ansprache von Konsument*innen und erhöhen die Kaufwahrscheinlichkeit, was eine Intensivierung des Ressourcenverbrauchs zur Folge hat (Skaleneffekte und Wachstumsimperative).

KI-Modelle und mobile Endgeräte verursachen trotz Effizienzsteigerungen weiterhin hohe Umweltbelastungen. Die Herstellung digitaler Geräte erfordert seltene Erden und metallische Rohstoffe, deren Abbau mit erheblichen ökologischen und sozialen Folgen verbunden ist (Verlagerung von Umweltbelastungen). Datenökonomie, Konsumsteigerung und Ressourcenverbrauch sind somit eng miteinander verbunden.

Inwieweit Potenziale zur Ressourcenschonung und zum Klimaschutz durch digitale Leistungen realisiert werden, hängt wesentlich von den Nutzungs- und Rahmenbedingungen ab. Dabei sind Rebound-verstärkende und Rebound-mindernde Faktoren zu unterscheiden (Tabelle 5).

Tabelle 5: Rebound-verstärkende und Rebound-mindernde Faktoren

Rebound-verstärkende Faktoren	Rebound-mindernde Faktoren
<p>Haushalte</p> <p>Konsumverhalten bestimmter Nutzertypen, das auf einen Mehrkonsum (Konsum zusätzlicher Produkte und Dienstleistungen, beschleunigter Konsum) ausgerichtet ist.</p> <p>Unreflektierte Mediennutzung mit datenintensiven Leistungen (Videostreaming, nicht selektives Surfen im Internet).</p>	<p>Vermeidung von Mehrkonsum durch suffizientes Konsumverhalten</p> <p>Reduktion von unnötigem Konsum (z. B. Abspielen von Videos im Hintergrund)</p> <p>Verpflichtung von Herstellern und Händlern, die Produkte und Funktionssysteme auf Langlebigkeit auszurichten (z. B. durch Politikinstrumente, die</p>

Rebound-verstärkende Faktoren	Rebound-mindernde Faktoren
<p>Verlagerung von Aktivitäten durch Einsparung von Zeit und Geld in ressourcenintensive Konsumfelder (z. B. Fernreisen).</p> <p>Bisher langlebige Haushaltsprodukte werden durch die smarte Technologie und den hohen Grad an Vernetzung kürzer genutzt (insbes. durch softwarebedingte Obsoleszenz).</p> <p>Innovationen der Digitalisierung führen zu neuen Bedarfen und kürzerer Nutzung (z. B. wenn bei einem Gerät neue Features hinzukommen).</p>	<p>Mindeststandards setzen, den Wettbewerb fördern und Transparenz schaffen).</p>
<p>Unternehmen</p>	
<p>Flatrate-Angebote der Telekommunikationsunternehmen und Portale, die Nutzung pauschaler Datenmengen bzw. unbegrenzte Nutzung von Diensten erlauben.</p> <p>Kurze Innovationszyklen digitaler Produkte/ Leistungen führen zu einer Verkürzung der Lebens-/ Nutzungsdauer.</p>	<p>Nachhaltige Gestaltung der Geschäftsmodelle von Plattformen (z. B. Angebote, Algorithmen, die umweltfreundliches Verhalten und nachhaltige Produkte fördern)</p> <p>Verringerung der Datenmenge (z. B. durch die Anpassung der Standardauflösung an die Displaygröße der Endgeräte, Vernetzung autonomer Fahrzeuge).</p>
<p>Technologien</p>	
<p>Nutzung relativ wenig effizienter digitaler Infrastrukturen (Glasfaser vs. Kabel, Mobilfunknetz vs. WLAN, normales Fernsehen vs. Live-Stream, Wahl der Auflösung SD, HD, Ultra HD etc. und des Endgeräts)</p>	<p>Ressourcenarme, THG-neutrale digitale Infrastrukturen (Rechenzentren, Telekommunikation, etc.)</p> <p>Offene Schnittstellen und Standards</p> <p>Abwärtskompatibilität von Produkten</p> <p>Software-Updates für mind. 10 Jahre</p> <p>Produktdesign für Reparaturen und Recycling</p> <p>Transparenz über Energie- und Ressourcenverbrauch</p> <p>Souveränität der Nutzer*innen über ihre Daten</p>

Quelle: eigene Darstellung, IZT.

Rebound-verstärkende Faktoren

Rebound-Effekte werden durch verschiedene Faktoren begünstigt. Dabei spielen Einstellungen, Konsumgewohnheiten, technologische Entwicklungen, Ausrichtung der Geschäftsmodelle und strukturelle Merkmale der digitalen Infrastruktur eine zentrale Rolle. Ein wesentlicher Rebound-fördernder Faktor sind die häufig auf eine Konsumsteigerung ausgerichteten Geschäftsmodelle. Ein Beispiel dafür ist die Art und Weise, wie digitale Plattformen den Konsum von Gütern und Dienstleistungen erleichtern. Online-Shopping-Plattformen ermöglichen es, mit wenigen Klicks rund um die Uhr Produkte zu bestellen – oft ohne die physischen Grenzen des Einzelhandels. Der einfache Zugang zu diesen Angeboten verführt dazu, mehr Produkte zu kaufen, da digitale Transaktionen schneller und oft weniger reflektiert erfolgen.

Digitale Plattformen wie soziale Netzwerke oder Streaming-Dienste sind darauf ausgelegt, Nutzer*innen in einen kontinuierlichen Konsummodus zu versetzen – sei es durch personalisierte Empfehlungen oder das Prinzip des “endlosen Scrollens”. Durch solche Praktiken

werden Konsument*innen dazu animiert, digitale Effizienzgewinne zu nutzen, um mehr Inhalte oder Produkte in kürzerer Zeit zu konsumieren, was den Ressourcenverbrauch trotz technischer Verbesserungen erhöht.

Auch das Phänomen des beschleunigten Konsums wird durch die Digitalisierung verstärkt. Streaming-Plattformen wie *Netflix* oder *YouTube* ermöglichen es Nutzer*innen, Inhalte auf Abruf zu konsumieren, oft in hohen Datenmengen und Auflösungen. Diese Konsumgewohnheiten führen dazu, dass Nutzer*innen immer mehr Inhalte in kürzester Zeit konsumieren wollen, was die technische Effizienz moderner Übertragungswege und Datenkomprimierung wieder untergräbt. Die kontinuierliche Verfügbarkeit von Gütern und Dienstleistungen im digitalen Raum fördert somit einen Lebensstil, der auf maximalen Konsum in möglichst kurzer Zeit ausgerichtet ist, was zu einer Erhöhung des Gesamtenergieverbrauchs führt.

Das Konsumverhalten wird darüber hinaus auch dadurch geprägt, welchem Konsum- oder Nutzungstyp eine Person angehört. Beispielsweise stellte eine Studie, die das Nutzerverhalten auf Secondhand-Plattformen untersucht, fest, dass das Ausmaß der Rebound-Effekte sich erheblich zwischen verschiedenen Nutzertypen unterscheidet. Während in der Gruppe der „Reduzierer“ tatsächlich Ressourceneinsparungen festgestellt wurden, war dies in der Gruppe der „Beschleuniger“ nicht der Fall (Henseling 2019).

Ein weiteres Problemfeld der Digitalisierung ist die unreflektierte Mediennutzung datenintensiver Dienste. Besonders Videostreaming hat sich in den letzten Jahren rasant entwickelt und ist heute ein wesentlicher Treiber des globalen Datenverkehrs. Viele Nutzer*innen sind sich nicht bewusst, dass das Streamen von Videos in hoher Auflösung oder über mobile Netzwerke sehr energieintensiv ist, da große Datenmengen verarbeitet und übertragen werden müssen. Zudem fehlt es an Transparenz darüber, welche Energiemenge solche Anwendungen außerhalb des eigenen Haushalts verursachen. Die Bequemlichkeit dieser Angebote führt oft dazu, dass Filme und Serien gleichzeitig auf mehreren Geräten oder in höchstmöglicher Auflösung gestreamt werden, ohne dass dies hinterfragt wird. Ähnlich verhält es sich beim ziellosen Surfen im Internet, bei dem permanent neue Inhalte geladen und angezeigt werden, was die Datenlast weiter erhöht. Diese Art der Mediennutzung wird häufig als selbstverständlich betrachtet und selten hinterfragt, wodurch Einsparungen durch technologische Fortschritte schnell aufgehoben werden. Die automatische Wiedergabe von Videos wird von vielen Geschäftsmodellen eingesetzt und Anbieter gestalten ihre Angebote so, dass sie jederzeit mobil verfügbar sind.

Durch die Effizienzsteigerungen, die die Digitalisierung ermöglicht, sparen Konsument*innen oft Zeit und Geld, welches sie anschließend in andere, oft ressourcenintensivere Konsumbereiche verlagern. Während das Arbeiten im Home-Office Zeit und Energie einsparen kann, investieren bestimmte Konsumentengruppen die gewonnene Zeit und das eingesparte Geld in Freizeitaktivitäten oder zusätzlichen Konsum. Auch der Trend des „Workation“ (Arbeiten von einem Urlaubsort) trägt zu Rebound-Effekten bei. Flugreisen sind energieintensiv. Durch die Digitalisierung eingesparte Ressourcenverbräuche können durch solche Reisen mehr als ausgeglichen werden. Ebenso kann das durch günstigere digitale Dienstleistungen eingesparte Geld in den Kauf ressourcenintensiver Güter oder in Freizeitaktivitäten fließen, die den gesamten ökologischen Fußabdruck vergrößern.

Ein weiterer wichtiger Rebound-fördernder Faktor sind die Flatrate-Angebote von Telekommunikationsunternehmen und digitalen Plattformen. Diese ermöglichen Nutzer*innen eine pauschale Datennutzung oder unbegrenzten Zugang zu Diensten, ohne dass diese direkt auf den individuellen Ressourcenverbrauch achten müssen. Flatrates für mobile Daten, Internetverbindungen oder Streaming-Dienste verleiten dazu, digitale Angebote intensiver und

weniger bewusst zu nutzen, da der direkte Bezug zwischen Konsum und Kosten verschwimmt. Die Möglichkeit, Daten oder Inhalte “unbegrenzt” zu nutzen, führt oft zu einem erheblich höheren Datenverkehr und Energieverbrauch. Diese pauschalen Angebote ermutigen Nutzer*innen, mehr digitale Dienstleistungen zu konsumieren, als sie es sonst tun würden, da der Anreiz, sparsam mit der Ressource Daten umzugehen, stark reduziert wird.

Die Digitalisierung zeichnet sich durch kurze Innovationszyklen aus, bei denen Produkte und Dienstleistungen in schnellen Abständen aktualisiert oder ersetzt werden. Dies führt zu einer Verkürzung der Lebens- und Nutzungsdauer digitaler Geräte. Smartphones, Tablets, Laptops und andere digitale Endgeräte werden oft bereits nach wenigen Jahren durch neuere Modelle ersetzt, obwohl die alten Geräte noch funktionstüchtig wären. Dieser schnelle Austausch von Technologie führt zu einer erheblichen Steigerung des Ressourcenverbrauchs, sowohl in der Produktion als auch in der Entsorgung. Selbst wenn neue Geräte energieeffizienter sind, wird dieser Effizienzvorteil durch die kurze Lebensdauer und die Ressourcenintensität der Herstellung wieder aufgehoben. Auch digitale Dienstleistungen wie Software oder Apps unterliegen ständigen Updates, die oft den Bedarf an leistungsfähigeren Geräten oder besseren Datenverbindungen erhöhen. Ein weiteres Phänomen besteht darin, dass zwar die Leistung pro Einheit energieeffizienter bereitgestellt wird, die neuen Geräte jedoch häufig in der Nutzung mehr Energie verbrauchen, da sie größer oder mit neuen Features ausgestattet sind (z. B. Fernseher, Monitore oder Smartphones).

Technisch gesehen bieten bestimmte digitale Infrastrukturen – etwa Glasfasernetze im Vergleich zu Kupferleitungen oder WLAN gegenüber mobilen Datenverbindungen – deutliche Effizienzvorteile im Hinblick auf Energieverbrauch pro übertragener Datenmenge. Diese Effizienzgewinne bleiben jedoch häufig ungenutzt, weil Nutzer*innen aus Bequemlichkeitsgründen die energieintensivere, aber sofort verfügbare Option wählen. Beispielhaft zu nennen ist das Streaming großer Datenmengen über Mobilfunkverbindungen unterwegs, obwohl ein späterer Zugriff über ein stationäres, energieeffizienteres WLAN technisch möglich und ökologisch sinnvoller wäre. Der Verzicht auf das Warten zugunsten sofortiger Nutzung erzeugt zusätzlichen Energieverbrauch, obwohl technische Alternativen zur Verfügung stünden – nicht wegen infrastruktureller Ineffizienz, sondern durch das konsumseitige Verhalten. Ein ähnliches Muster zeigt sich in der Wahl der Auflösung bei Video- oder Streamingdiensten. Obwohl viele Inhalte auch in SD-Qualität verfügbar sind, bevorzugen Nutzer*innen häufig hochauflösende Formate wie HD oder Ultra HD, was einen erheblich höheren Energie- und Datenbedarf nach sich zieht. Auch hier steht nicht die technische Ineffizienz im Vordergrund, sondern der individuell gewählte Qualitäts- und Komfortanspruch, der den potenziellen Effizienzgewinn überkompensieren kann.

Rebound-vermindernde Faktoren

Um die Rebound-Effekte der Digitalisierung zu vermindern, sind mehrere Faktoren entscheidend, die das Konsumverhalten sowie die technische und geschäftliche Gestaltung digitaler Infrastrukturen betreffen. Diese Faktoren zielen darauf ab, unnötigen Mehrkonsum zu vermeiden, ressourcenschonende Alternativen zu fördern und digitale Technologien umweltfreundlicher zu gestalten.

Plattformbetreiber und Unternehmen haben eine wichtige Rolle bei der Reduzierung von Rebound-Effekten. Die nachhaltige Gestaltung von Geschäftsmodellen kann dazu beitragen, umweltfreundliches Verhalten von Nutzer*innen zu fördern. Dies könnte beispielsweise durch Angebote oder Algorithmen geschehen, die nachhaltige Produkte und Dienstleistungen bevorzugt anzeigen oder Nutzer zu ressourcenschonendem Verhalten anregen, bspw. in dem der Energieverbrauch und CO₂-Fußandruck transparent gemacht wird. Plattformen könnten etwa

umweltfreundliche Produkte besonders hervorheben oder Anreize schaffen, nachhaltige Optionen zu wählen. Zudem könnten sie Mechanismen einführen, die Nutzer*innen über den Ressourcenverbrauch bestimmter Angebote informieren, sodass diese eine fundierte Entscheidung treffen können. Solche Geschäftsmodelle würden nicht nur den Konsum lenken, sondern auch das Bewusstsein der Verbraucher*innen für die ökologischen Auswirkungen ihres digitalen Handelns schärfen.

Ein wichtiger Faktor zur Verminderung von Rebound-Effekten ist die Reduktion zusätzlicher Konsumaktivitäten. Hier sind Faktoren auf zwei verschiedenen Ebenen zu betrachten. Zum einen sollten Hersteller und Händler adressiert werden. Hier ist es maßgeblich, Praktiken zu reduzieren, die Konsument*innen dazu zwingen, neue Geräte anzuschaffen und Reparaturen bzw. eine langfristige Nutzung verhindern. Hier sind Maßnahmen zu nennen, wie Gewährleistung der Abwärtskompatibilität von Produkten, Bereitstellung von Software-updates für mindestens 10 Jahre, Produktdesign für Reparaturen und Recycling, Schaffung von Transparenz über Energie- und Ressourcenverbräuche. Des Weiteren sollten, um Rebound-Effekte zu reduzieren, Praktiken der Online-Plattformen, die auf eine Steigerung des Konsums zielen (z. B. personalisierte Werbung, Produkt-Alerts, etc.), kritisch hinterfragt werden. Die zweite Ebene betrifft das Konsumentenverhalten. Dies wird besonders deutlich am Beispiel E-Commerce und Sharing. Durch den Online-Handel können nahezu alle benötigten Produkte einfach und bequem am Rechner oder Smartphone bestellt werden. Insgesamt können durch den Online-Handel für Verbraucher*innen Effizienzsteigerungen in drei Bereichen auftreten: erstens finanzielle Einsparungen, zweitens Zeitersparnisse und drittens verringerter Transaktionsaufwand (Convenience). Wie (d. h. für welche zusätzlichen Handlungen) diese Einsparungen genutzt werden, beeinflusst maßgeblich, ob es zu Rebound-Effekten kommt und wie hoch diese ausfallen. Um hier bewusste Entscheidungen treffen zu können, müssen Konsument*innen transparente Informationen über den Ressourcen- und Energieverbrauch digitaler Produkte und Dienstleistungen erhalten.

Ein weiterer Faktor zur Verminderung von Rebound-Effekten ist die Reduktion unnötiger digitaler Konsumaktivitäten. Dies betrifft beispielsweise das Abspielen von Videos oder Musik im Hintergrund, während diese gar nicht aktiv genutzt werden. Besonders in Situationen, in denen Videos lediglich zur Geräuschkulisse dienen, wird unnötig Energie und Datenvolumen verbraucht. Indem Nutzer*innen ein Bewusstsein für diese Art des Konsums entwickeln und beispielsweise Hintergrundvideos ausschalten, können sie ihren ökologischen Fußabdruck reduzieren. Auch das Minimieren von exzessivem, nicht zielgerichtetem Surfen im Internet kann einen wichtigen Beitrag leisten. Hier geht es darum, digitale Dienste effizient zu nutzen und unbewussten Datenverbrauch zu vermeiden.

Die Reduktion der Datenmenge spielt dabei ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Verminderung von Rebound-Effekten. Dies kann durch technische Anpassungen erreicht werden, wie beispielsweise die Anpassung der Standardauflösung von Videos an die Displaygröße des verwendeten Endgeräts. Statt Videos in Ultra-HD-Qualität auf einem kleinen Smartphone-Display abzuspielen, wäre es ressourcenschonender, die Auflösung automatisch an die tatsächlichen Bedürfnisse anzupassen. Auf Daten und Streaming-Flatrates sollte verzichtet werden. Verträge können so gestaltet werden, dass Datensparsamkeit belohnt wird. Weitere Beispiele betreffen die Datenübertragung und -verarbeitung in der Vernetzung von autonomen Fahrzeugen, wo durch eine intelligente und effiziente Datensystemarchitektur große Mengen an Energie eingespart werden könnten. Insgesamt könnte durch die Reduktion unnötiger Datenvolumina der Energieverbrauch erheblich gesenkt werden, ohne dass damit unbedingt Komforteinbußen für Nutzer*innen einhergehen müssten.

Schließlich ist die Entwicklung ressourcenarmer und treibhausgasneutraler digitaler Infrastrukturen relevant, um Rebound-Effekte zu minimieren. Besonders Rechenzentren und Telekommunikationsinfrastrukturen verbrauchen immense Mengen an Energie. Deren Effizienz sollte weiter verbessert werden. Rechenzentren könnten beispielsweise stärker auf erneuerbare Energien umgestellt werden und effizientere Kühlsysteme sowie energieoptimierte Servertechnologien nutzen. Auch die Telekommunikationsnetze könnten umweltfreundlicher gestaltet werden, etwa durch den vermehrten Einsatz von Glasfasernetzen, die weniger Energie verbrauchen als herkömmliche Kupfernetze. Zudem sollten mobile Datenverbindungen gezielt durch energieeffizientere WLAN-Verbindungen ersetzt werden, wo dies möglich ist. Der Einsatz effizienter digitaler Infrastrukturen ist ein wesentlicher Hebel, um den steigenden Energie- und Ressourcenbedarf der Digitalisierung zu minimieren und die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Zwar werden durch solche Maßnahmen Rebound-Effekte an sich nicht verhindert, jedoch können ihre Umweltauswirkungen reduziert werden. Doch die Ambivalenz dieser Maßnahmen liegt in der Balance zwischen Effizienzgewinnen und der Gefahr, dass diese Effizienzsteigerungen zu einem Anstieg des Gesamtverbrauchs führen. Es ist daher wichtig, nicht nur auf technologische Lösungen zu setzen, sondern auch Geschäftsmodelle, das Nutzungsverhalten und die gesellschaftliche Nachfrage nach digitalen Technologien kritisch zu hinterfragen und zu gestalten. Nur so kann gewährleistet werden, dass die positiven ökologischen Effekte nicht wieder durch unerwünschte Rebound-Effekte negiert werden.

Systemische Dynamiken mit Blick auf Suffizienz

Digitalisierung wird gern mit vollautomatischen Zukünften umworben – Lüften, Kochen, Gärtnern, Kühlschrank auffüllen, Autofahren, Produktionsstraßen, Fastfood-Restaurants, Taxis, Verwaltung – alles soll perspektivisch vollautomatisch funktionieren. Selbst Programmieren, Lehren, Pflegen, Betreuen, Beraten oder Sport kann heute schon digitalisiert werden. Von vielen Seiten wird argumentiert, dass diese Automatisierungen den Bedarf an menschlicher Arbeitskraft reduzieren. Hierbei stellt sich allerdings die Frage, woher dann die Kaufkraft für die Güter und Dienstleistungen kommen soll.

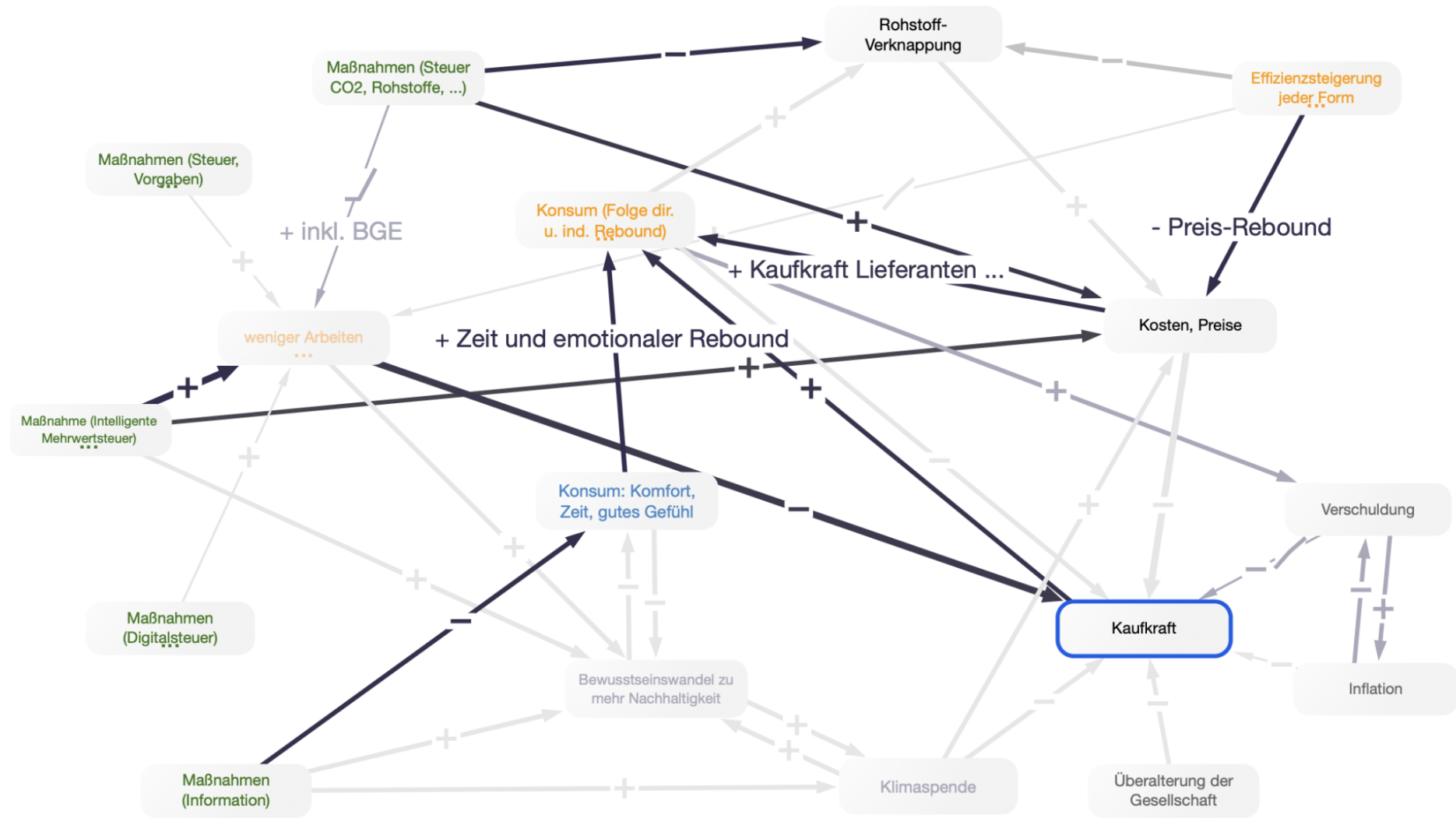
Eine logische Konsequenz wäre die Nutzung der Produktivitätssteigerung zur Verkürzung der Lebensarbeitszeit. In der Folge könnte das Konsumniveau sogar sinken (Suffizienz). Oder die Kaufkraft müsste durch Formen der Umverteilung in der Breite gesichert werden. Diese Suffizienz-Perspektive gehört aus systemischer Sicht dazu, wird im Projekt aber nicht weiter vertieft. Abbildung 6 zeigt einen Ausschnitt aus dem Systemischen Modell, der andeutet, wie grundsätzlich Steuern zu Lenkung der Qualität des Konsums für ein irgendwie geartetes bedingungsloses Grundeinkommen genutzt werden könnten.

Letztlich könnte diese Entwicklung dann als ein Baustein von mehreren einen „Bewusstseinswandel zu mehr Nachhaltigkeit“ herbeiführen, der selbstverstärkend die emotionale Wirksamkeit von Konsum (Neumann et al. 2018) abschwächen würde.

Ein Ansatzpunkt zur Verminderung von Rebound-Effekten ist die Förderung eines suffizienten Konsumverhaltens. Suffizienz bedeutet, den Konsum bewusst zu reduzieren und sich auf das Notwendige zu beschränken, anstatt Effizienzgewinne für einen Mehrkonsum zu nutzen. In der digitalen Welt könnte dies beispielsweise bedeuten, bewusst weniger datenintensive Dienste zu nutzen oder den Konsum von Medien zu hinterfragen. Statt immer mehr digitale Inhalte zu konsumieren, könnte ein Fokus auf Qualität und bewusste Auswahl gelegt werden. Beispielsweise könnten Nutzer*innen Streamingdienste weniger intensiv nutzen, indem sie gezielt Inhalte auswählen, anstatt automatisierten Empfehlungsalgorithmen zu folgen, die zum Weiterschauen und Mehrkonsum animieren.

Zusammenfassend zeigt sich, dass Maßnahmen auf technischer, wirtschaftlicher und individueller Ebene zur Verringerung von Rebound-Effekten beitragen können. Die Förderung suffizienten und substitutiven Konsumverhaltens, die Reduktion unnötigen Datenverbrauchs, die Gestaltung nachhaltiger Geschäftsmodelle und die Entwicklung ressourcenschonender digitaler Infrastrukturen sind dabei zentrale Handlungsfelder. Neben spezifischen Maßnahmen zur Minderung des ökologischen Fußabdrucks der Technologien selbst, gibt es die Möglichkeit, die Nachfrage nach Produkten und Leistungen mit großem ökologischen Fußabdruck im Allgemeinen zu begrenzen, oder im Konzert mit auch sozialen Maßnahmen die Nachfrage an sich zurückzufahren. Die internationalen Dynamiken von Technologieentwicklung und Unternehmen hingegen sind national und gegen das Streben der Akteure kaum zu beeinflussen. Hier spielen die Wettbewerbsfähigkeit, die Konkurrenz durch Angebote aus dem Ausland einerseits, und andererseits die Tatsache, das entwickelt wird, was machbar und dann nachgefragt wird, eine Rolle.

Abbildung 6: Modellausschnitt zu den Dynamiken mit Blick auf Suffizienz



Quelle: Eigene Darstellung, Consideo.

3 Umweltpolitische Maßnahmen und Instrumente zur Eindämmung von Rebound-Effekten

Das Kapitel hat zum Ziel auf Basis der Fallbeispiele und der systemischen Betrachtungen politische Maßnahmen und Instrumente zur Eindämmung von Rebound-Effekten der Digitalisierung zu identifizieren.

Eine besondere Herausforderung besteht darin, dass „Digitalisierung“ als solches sehr umfassend ist. Neben den Endgeräten gehört die unterstützende Infrastruktur mit entsprechenden Ressourcenverbräuchen dazu. Hinzu kommen Online-Dienstleistungen, die auch Hardware brauchen, gleichzeitig aber durch geändertes Nutzerverhalten zu Umweltbelastungen führen.

Als zusätzliche Herausforderung kommt hinzu, dass der Markt der Anbieter von Digitalisierung (Hardware, Services) sehr konzentriert ist, wenn nicht gar oligopolisiert durch die so genannten Big Five. Diese Oligopolisierung ist zudem global verteilt, so dass Dienstleistungen zwar in Europa angeboten werden, die Server und die Firmen aber in anderen Ländern angesiedelt sind. Hier kann es zu Schwierigkeiten bei Regulierung, Verantwortung und letztlich auch Verbraucher- und Datenschutz kommen. Dieser Aspekt ist insofern schwierig, dass einige Maßnahmen außerhalb des Einflussbereichs Deutschlands liegen.

Die Digitale Oligopolbildung und ihre Auswirkungen auf Nachhaltigkeit und Konsum: „The Big Five“

Die oligopolistische Struktur wird besonders deutlich in der Interoperabilität der verschiedenen Dienste und der damit verbundenen Wettbewerbsbeschränkung. Die Europäische Union hat auf diese Entwicklung mit der Einführung der digitalen Wettbewerbsregulierung, insbesondere dem Digital Markets Act, reagiert. Diese Regelwerke zielen darauf ab, die Marktmacht der dominanten Plattformen zu begrenzen und faire Wettbewerbsbedingungen zu gewährleisten (Europäische Kommission o.J.; 2023).

Im Kontext der Nachhaltigkeit zeigt sich ein ambivalentes Bild: Einerseits setzen die führenden Technologieunternehmen bedeutende Impulse im Bereich des Klimaschutzes, oder auch der Kreislaufwirtschaft. Google beispielsweise strebt bis 2030 die vollständige Klimaneutralität seiner Operationen an und investiert in die der Entwicklung modularer Kernkraftwerke, um den steigenden Energiebedarf ihrer Rechenzentren langfristig klimafreundlich zu decken, nimmt damit allerdings die Risiken und Probleme der Kernkraft in Kauf. Apple investiert in signifikantem Umfang in Recycling und die Vermeidung von Problemstoffen. Andererseits führen die exponentiell wachsende Datenmenge und der damit verbundene Energie- und Ressourcenbedarf der Rechenzentren zu ökologischen Herausforderungen. Zudem können die Technologiekonzerne ihre Marktmacht zur gezielten Steuerung des Konsumverhaltens durch personalisierte Marketingkommunikation und psychologisches Targeting nutzen, was tendenziell zu erhöhtem Ressourcenverbrauch führen kann⁴. Die Plattformökonomie der "Big Five" basiert auf der systematischen Sammlung und Analyse von Nutzerdaten, die eine präzise Vorhersage und Beeinflussung von Konsumpräferenzen

⁴ Dem Konsum sind per se durch die Kaufkraft der Konsument*innen Grenzen gesetzt. Die Kaufkraft ist sehr heterogen in der Gesellschaft verteilt und gleichzeitig bedeutet der Umsatz an Geld nicht automatisch die Nutzung von Rohstoffen. Durch den Import von günstigen Massenwaren („Temu-Effekt“) werden für die gleiche Geldmenge mehr Ressourcen genutzt – allerdings auch regional verteilter. Daher bleibt das Grundbestreben, unter der Annahme, dass die Geldmenge für den Konsum begrenzt ist, dass die Güter möglichst nachhaltig sind.

ermöglichen. Diese Fähigkeit zur Verhaltenssteuerung wirft nicht nur datenschutzrechtliche Fragen auf, sondern hat auch direkte Auswirkungen auf Konsummuster und damit auf die ökologische Nachhaltigkeit.

Die zentrale Herausforderung besteht darin, die Innovationskraft und Effizienzpotenziale der digitalen Transformation zu nutzen, ohne dabei negative Umweltauswirkungen zu verstärken. Dies erfordert einen ausgewogenen regulatorischen Rahmen, der sowohl die Wettbewerbsfähigkeit als auch ökologische Aspekte berücksichtigt. Die "Big Five" spielen dabei eine Schlüsselrolle: Ihre Marktmacht verleiht ihnen die Fähigkeit, nachhaltige Praktiken im digitalen Sektor zu etablieren, während gleichzeitig ihre oligopolistische Stellung einer gewissen Überprüfung bedarf.

Die Zielstellung für die Ableitung von Maßnahmen und Instrumenten zur Eindämmung der Rebound-Effekte durch die Digitalisierung besteht darin, diejenigen Maßnahmen zu identifizieren, die dazu führen, die potenziellen Umweltentlastungseffekte so weit wie möglich abzuschöpfen bzw. zu maximieren. Durch die Vielschichtigkeit der Digitalisierung, die hohe Marktkonzentration einzelner Unternehmen, die globalen Verflechtungen und die hohen Wachstums- und Skalierungspotenziale in diesem Wirtschaftssegment ist es herausfordernd, Rebound-Effekte, allgemeine Wachstumseffekte oder Innovationseffekte voneinander zu unterscheiden bzw. der jeweiligen Einzeltechnologie zuzuordnen. Der Definition der System- und Betrachtungsgrenzen kommt ein großer Stellenwert zu.

Daher werden zunächst kurz die in der Literatur beschriebenen Maßnahmen gegen Rebound-Effekte in Bezug auf die Digitalisierung dargestellt. Schließlich werden drei Fallbeispiele betrachtet und mögliche Maßnahmen reflektiert. Die Fallbeispiele sind (1.) E-Commerce, (2.) KI zum einen im Bereich Logistik und zum anderen im Bereich Produktion sowie (3.) Metaverse als ein Beispiel für eine Zukunftstechnologie.

3.1 Handlungsansätze

Um Rebound-Effekte in der Digitalisierung einzudämmen, werden in der Literatur verschiedene Handlungsansätze diskutiert und vorgeschlagen. Hervorzuheben sind insbesondere die Studien von Santarius (2012; 2016) sowie Font Vivanco et al. (2022). Guzzo et al. (2023) haben sich aus Perspektive der Systemanalyse mit Maßnahmen zum Umgang mit Rebound-Effekten beschäftigt⁵.

Umweltpolitische Maßnahmen sind konkrete Handlungen oder Strategien, die von Regierungen, Institutionen oder anderen Organisationen unternommen werden, um spezifische Umweltziele zu erreichen. Diese Maßnahmen zielen darauf ab, die Umweltqualität zu verbessern, Umweltverschmutzung zu reduzieren oder den Umgang mit natürlichen Ressourcen nachhaltiger zu gestalten (z. B. Glaeser 1989; Simonis 2001).

Umweltpolitische Instrumente sind dabei die konkreten Werkzeuge und Mechanismen, die eingesetzt werden, um umweltpolitische Maßnahmen zu implementieren und zu steuern. Sie stellen die konkreten Mittel dar, mit denen die Ziele und Vorgaben der Umweltpolitik erreicht

⁵ Um Rebound-Effekte zu minimieren und Ressourceneinsparungen sowie Emissionsreduktionen zu sichern, wird ein ganzheitlicher Ansatz empfohlen, der über reine Effizienzstrategien hinausgeht. „Policy Portfolios“, bestehend aus Steuern, Investitionen in Kreislaufwirtschaft und Bildungsmaßnahmen, sollten Rückkopplungen im System berücksichtigen. Unternehmen sollten auf Langlebigkeit, Wiederverwendung und Dienstleistungsmodelle setzen. Preisanreize, Regulierungen und der Abbau schädlicher Subventionen seien essenziell, ebenso wie vorausschauende Szenarioplanung, um Verzögerungseffekte und Gegenreaktionen zu adressieren. Eine Transformation von Werten und Handlungsrahmen sei notwendig, einschließlich Suffizienzpolitik, um Konsumwachstum zu begrenzen. Konkrete Maßnahmen umfassen aus Sicht der Autor*innen höhere Energiepreise, sozial gerechte Abfederungen, Tempolimits, bessere Infrastruktur für nachhaltigen Verkehr und attraktive ÖPNV-Angebote.

werden sollen. Instrumente können in verschiedene Kategorien unterteilt werden (Goulder & Parry 2008; Buchholz & Rübelke 2019):

- ▶ **Regulatorische Instrumente:** Dies sind gesetzliche und normative Vorgaben, die bestimmte Verhaltensweisen vorschreiben oder verbieten.
- ▶ **Ökonomische Instrumente:** Diese nutzen finanzielle Anreize oder Marktmechanismen, um umweltfreundliches Verhalten zu fördern oder umweltbelastendes Verhalten zu sanktionieren (Stavins 2002).
- ▶ **Informationelle Instrumente:** Diese umfassen den Einsatz von Informationskampagnen und Transparenzmechanismen, um das Verhalten von Individuen und Unternehmen zu beeinflussen (z. B. Karl & Orwat 2002).
- ▶ **Freiwillige Vereinbarungen und Selbstverpflichtungen:** Diese basieren auf freiwilligen Maßnahmen und Kooperationen zwischen Regierungen, Industrie und anderen Akteuren (Karamanos 2001; Töller 2013).

Mit Hilfe der systemischen Analyse wurden im vorangegangenen Kapitel 2 zentrale Dynamiken hinter Rebound-Effekten durch digitale Produkte und Leistungen identifiziert. Diese Dynamiken stehen gleichermaßen hinter der Entwicklung von Rebound-Effekten wie sie auch das Wirken oder die Hindernisse von Maßnahmen und Instrumenten begründen. Das abstrahierte systemische Modell in Abbildung 7 (siehe auch Anhang B) zeigt folglich die grundsätzlichen Zusammenhänge hinter der Digitalisierung als Ganzes. Auf die vier grundlegenden Dynamiken wirken sechs potenzielle Hebel. Die Dynamiken und Hebel wurden in einem Expertenworkshop diskutiert und mit ersten Maßnahmen und z.T. auch Instrumenten belegt. Die genannten Maßnahmen und Instrumente sind um weitere beispielhafte Instrumente teilweise aus den Fact Sheets (Anhang A) ergänzt in Tabelle 6 aufgelistet. Teilweise setzen die gleichen Instrumente an unterschiedlichen Hebeln an, was ein Verständnis ihrer Wirkmöglichkeiten erhöht.

Das o.g. Modell ist ausführlicher im Anhang B beschrieben. Nachfolgend erfolgt eine Kurzbeschreibung der sechs Hebel und ihrer Wirkungsketten, jeweils ausgehend von den Wirkungswegen der nummerierten, grün gefärbten Faktoren aus der Abbildung 7. Nach der Beschreibung der Wirkungswege erfolgt die Auflistung der beispielhaften Maßnahmen und Instrumente in einer tabellarischen Gesamtschau.

1. Maßnahmen zur Technologieentwicklung

Unter Technologieentwicklung ist vereinfacht die gesamte Forschung und Entwicklung von nicht nur digitalen Technologien zu verstehen. Im Falle der Digitalisierung fallen hierunter sowohl Hard- als auch Software und Künstliche Intelligenz als technologische Entwicklung. Insofern treiben sich Digitalisierung und technologische Entwicklung selbstverstärkend gegenseitig (zu erkennen an den Wirkungspfeilen in beide Richtungen), wenn in allen Technologiebereichen vermehrt digitale Lösungen Einzug halten und die Potenziale für Verbesserungen bei den Technologiebereichen zur fortgeführten Entwicklung von Digitalisierungslösungen führen.

Maßnahmen können daraufhin die Entwicklung von fortschrittlichen Technologien fördern oder irgendwie geartet begrenzen. Verbesserte digitale Lösungen könnten somit gefördert oder auf veraltete Lösungen eine höhere Steuer oder Gebühr für die Hersteller, z. B. in Form eines Top-Runner-Programms erhoben werden, welches die wünschenswerten Zielwerte in den Vordergrund stellt, also die Energieverbräuche, Materialien o.ä. als absolute Größen, die nicht durch zusätzliche Features wieder relativiert werden sollen. Außerdem ist derzeit die öffentliche Beschaffung von umweltverträglichen Produkten weitestgehend optional und könnte verpflichtend werden. „Die umweltverträgliche öffentliche Beschaffung bietet beispielsweise die Möglichkeit, besonders umweltverträgliche Produkte pilothaft zu fördern und ihnen damit einen Marktzutritt zu ermöglichen“ (Jaeger-Erben et al. 2023, S.129).

Nebenwirkung können verkürzte Lebenszyklen sein, die nicht immer das Machbare ermöglichen, sondern häufig auch inkrementell bewusst mit kurzen Lebenszyklen sich weiterentwickeln und somit Geschäftsmodelle sichern. Es gibt also neben der positiven Auswirkung der fortgesetzten Effizienzsteigerung auch die Nebenwirkung durch die Rucksäcke in Form von Material- und Energieverbrauch, Serverkapazitäten, Elektroschrott, etc. der Technologien selbst.

2. Maßnahmen zur Beeinflussung des ökologischen Fußabdrucks der Digitalisierung

Die Rebound-Effekte, die sich in dem unmittelbaren ökologischen Fußabdruck von Technologien hinter der Digitalisierung äußern, können durch eine Reihe von Maßnahmen direkt adressiert werden. Es geht um Maßnahmen, die den Fußabdruck von Digitalisierung mindern – tatsächlich unabhängig davon, ob er in einem Zusammenhang mit einem Rebound-Effekt steht. Es können Vorgaben zum Energie- und Materialeinsatz gemacht, Langlebigkeit und Reparatur- bzw. auch Recyclingmöglichkeiten vorgegeben sowie Standards bei Schnittstellen, Steckern etc. definiert werden. Die Auswirkungen dieser Hebel beziehen sich allein auf die Umwelt und nicht auf die Dynamiken.

3. Maßnahmen zur direkten Begrenzung der Digitalisierung

Die Digitalisierung im engeren Sinne direkt durch Instrumente zu begrenzen, kann indirekt den Fußabdruck von Digitalisierung senken und die Effizienzsteigerungen, die zu Mehrkonsum führen, vermeiden. Aber es würde als Nebenwirkung auch die gewünschten Effizienzsteigerungen verhindern und zu Wettbewerbsnachteilen führen. Eine Digitalsteuer etwa oder eine Begrenzung von Datenverkehr oder Funktionalität digitaler Lösungen und Geräte dürfte damit kaum Akzeptanz seitens der Wirtschaft aber auch nicht der privaten Haushalte erfahren. Nutzer*innen dieser Technologien würden kaum akzeptieren, dass etwas

mit großem persönlichem Nutzen (im Modell der Faktor “Konsum: Komfort, Zeit, gutes Gefühl”) hierzulande beschränkt wird, was anderswo erlaubt ist.

4. Maßnahmen zur Verteuerung von Produkten

Anders als die Maßnahmen, die nur den Rucksack von Digitalisierung adressieren (Hebel 2), können Maßnahmen, die generell Rohstoffe und Energie verteuern auch den Rebound-Effekt durch vermehrten Konsum, der durch Effizienzsteigerungen der Digitalisierung überhaupt erst möglich wird, begrenzen. Steuereinnahmen hieraus ermöglichen einen erweiterten Spielraum für politisches Handeln und gesellschaftliche Entwicklung, von der Förderung der Transformation zu mehr Nachhaltigkeit bis hin zu sozialen Maßnahmen (sogar einem bedingungslosem Grundeinkommen). Das große Problem ist die Zuordnung. Wenn diese Steuern sich hinsichtlich der Produktion nicht auch auf importierte Güter beziehen, entstehen Wettbewerbsnachteile. Die Maßnahmen zu dem Hebel 6 versuchen hier weiterzugehen.

5. Maßnahmen zur kritischen Reflexion von Konsum

Der Konsum digitaler wie auch physischer Produkte und Dienstleistungen ist häufig mit positiven Emotionen assoziiert. Werden durch Digitalisierung Fortschritte in Richtung Nachhaltigkeit erzielt oder zumindest suggeriert, kann dies zu einem psychologischen Rebound-Effekt führen: Das positive Gefühl, durch digitalen Konsum einen Beitrag zur Nachhaltigkeit zu leisten, kann dazu motivieren, mehr zu konsumieren – wodurch die ursprünglichen Umweltentlastungen wieder teilweise oder vollständig aufgehoben werden. Interventionen, die Konsument*innen dabei unterstützen, die positiven Emotionen im Zusammenhang mit (vermeintlich) nachhaltigem Konsum kritisch zu reflektieren, können dieses Gefühl zwar abschwächen, aber gleichzeitig eine bewusste Auseinandersetzung mit den ökologischen und sozialen Auswirkungen des eigenen Konsumverhaltens fördern. Diese kritische Reflexion kann selbstverstärkend wirken und zu einem Wandel im Bewusstsein führen – weg von einer Logik des „mehr Konsums“ hin zu einem reduzierten oder tatsächlich nachhaltigeren Konsum. In der Folge könnten Effizienzgewinne, die durch digitale Technologien erzielt werden, nicht zur Steigerung von Produktion und Konsum führen (wie es häufig der Fall ist), sondern stattdessen zur Reduktion von Arbeitszeit und Ressourcenverbrauch beitragen. Ein zentraler Hebel zur Vermeidung solcher Rebound-Effekte besteht darin, das Bewusstsein für deren Existenz und Wirkmechanismen auf breiter gesellschaftlicher Ebene zu stärken. Wenn Konsument*innen, Unternehmen und öffentliche Institutionen diese Zusammenhänge erkennen, können sie gezielt Maßnahmen ergreifen, um negativen Rückkopplungseffekten entgegenzuwirken und die Potenziale der Digitalisierung für eine nachhaltige Entwicklung tatsächlich zu realisieren.

6. Maßnahmen zur Beeinflussung der Qualität des Konsums

Anders als Maßnahmen zur bloßen Verteuerung von Produkten (Hebel 4) vornehmlich schon bei der Produktion im Geltungsbereich der Maßnahme, ist der Ansatz hier, den Konsum von allen Produkten und Dienstleistungen, die durch die Effizienzmaßnahmen durch Digitalisierung bezahlbar werden, in seiner Qualität durch Besteuerung über den Verkaufspreis zu beeinflussen. Damit würden auch importierte Produkte mit hohem Fußabdruck verteuert. Zum Beispiel könnte eine Mehrwertsteuer hier mit unterschiedlichen Sätzen arbeiten. Die Ausgestaltung solcher Maßnahmen – wie die Diskussion im Expertenworkshop ergab – gilt als äußerst kontrovers. Wichtig ist, dass steuerliche Lenkungsinstrumente nicht isoliert betrachtet werden dürfen. Andere regulatorische Ansätze – insbesondere die EU-Ökodesign-Richtlinie (ÖkodesignRL), die bereits seit vielen Jahren Mindestanforderungen an Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit von Produkten festlegt – sind anschlussfähiger. Die Weiterentwicklung der ÖkodesignRL hin zu einer umfassenden Sustainable Product Policy ist ein zentrales Instrument, das produktseitig für eine Reduktion ökologischer Belastungen sorgt.

„Transparenzmaßnahmen unterstützen dabei, dass sich der Markt in eine nachhaltigere Richtung bewegt. Die Energieeffizienz-Kennzeichnung ist ein solches Instrument, die Produkte hinsichtlich ihrer Energieeffizienz unterscheidbar macht und damit einen Wettbewerb um die energieeffizientesten Produkte fördert“. Die Transparenzmaßnahmen sollten dabei nicht freiwillig sein, sondern verbindlich (Jaeger-Erben et al. 2023, S.129).

Tabelle 6 listet nun zu den vorgenannten sechs Hebel Beispiele für konkrete Maßnahmen und mögliche Instrumente.

Tabelle 6: Maßnahmen und Instrumente zur Minderung von Rebound-Effekten

Maßnahmen	Mögliche Instrumente
1. Maßnahmen zur Beeinflussung der Technologieentwicklung	
Förderung nachhaltiger digitaler Geschäftsmodelle	Start-Up Förderung Staatliche F&E-Förderprogramme mit Fokus auf Effizienzsteigerung und CO ₂ -Reduktion, Innovationspreise für ressourcenschonende Digitalösungen
Anreize für höhere Effizienz	Top-Runner-Programme, Steuern oder Gebühren für Produkte, die Standards nicht erfüllen Standards für grüne Software
Langlebige und reparaturfreundliche Hardware entwickeln (Reduktion softwarebedingter Obsoleszenz)	Mindestanforderungen an Update- und Reparatur-Services (z. B. verpflichtende Sicherheitsupdates über festgelegte Zeiträume) Transparenzpflicht über Support-Dauer
Regulierende Maßnahmen für Monopole	Open Source Pflicht bei der öffentlichen Beschaffung Kennzeichnungspflichten
Software energie- und ressourcenschonend gestalten	Anforderungen an Software-Produkte in Umweltzeichen (z. B. Blauer Engel für Software) Verbindliche Mindestvorgaben zur Softwareeffizienz in Ökodesign-Verordnungen
Förderung wettbewerbsrelevanter Technologien, die der Umwelt nützen könnten	Förderung von Künstlichen Intelligenz aus Europa Start-Up Förderung Verpflichtende umweltverträgliche öffentliche Beschaffung
2. Maßnahmen zur Beeinflussung des ökologischen Fußabdrucks der Digitalisierung	
Materialeffiziente Hardware und Peripherie produzieren (weniger seltene Erden, recyclingfähige Bauweise)	Rohstoff- bzw. Ressourcensteuern (z. B. auf kritische Metalle) Verpflichtende Recycling-Quoten Produktdesign-Vorgaben in Ökodesign-Richtlinien Regulierende Rahmenbedingungen für zukünftige Entwicklungen setzen

Maßnahmen	Mögliche Instrumente
(Software-)Obsoleszenz vermeiden/ Verlängerung der Nutzungsdauer digitaler Geräte	<p>Standards für Langlebigkeit von Produkten</p> <p>Verpflichtende Bereitstellung von Updates (Hardware) über einen Mindestzeitraum</p> <p>Gewährleistung, dass softwarebetriebene Produkte über eine Mindestnutzungsdauer in gleichbleibender Qualität nutzbar sind</p> <p>Möglichkeit softwarebetriebene Geräte ohne externe Abhängigkeiten zu betreiben (ohne Netzwerkanbindung („offline“) und ohne externe Cloud-Dienste)</p> <p>Verbot von softwareseitigem Verhindern von Reparatur und Betrieb (bsp. Ersatzteile oder Betriebsmittel andere Hersteller dürfen nicht ausgeschlossen sein)</p> <p>Reparatur-Bonus, gesetzliche Garantie- und Gewährleistungsfristen verlängern, Pfandsysteme für Altgeräte</p> <p>Angebote für vergünstigte Finanzierung langlebiger Produkte</p> <p>Industrie-Selbstverpflichtungen und Standards für Digitalisierung und Software entwickeln</p>
Verpflichtendes Recycling vorschreiben	
Recht auf Reparatur verankern	<p>Verpflichtung der Hersteller zu reparaturfreundlichem Design</p> <p>Bereitstellung von Ersatzteilen, Reparaturanleitungen und Werkzeugen</p> <p>Austauschmöglichkeit von Akkus, Displays und weiteren Hardwarekomponenten</p>
Umweltfußabdruck digitaler Dienstleistungen verpflichtend transparent machen	<p>Blauer Engel als Orientierung</p> <p>Transparente Technikfolgenabschätzung (Pflicht)</p> <p>Angabe des Energie-/Hardwareverbrauchs bei digitalen Produkten</p>
Effizienz fördern	<p>Top-Runner-Programme</p> <p>Steuern oder Gebühren für Produkte, die Standards nicht erfüllen</p> <p>Cap & Trade Systeme für CO₂ und nicht nachwachsende Rohstoffe.</p>
Besteuerung von nicht-erneuerbaren Ressourcen	Spezifische Rohstoffsteuern
Minimierung von Elektronikschrott (z. B. systematische Rücknahmen)	<p>Pflicht zur Rücknahme ausgedienter Geräte für Händler/Hersteller</p> <p>Ausbau Reparatur-/ Wiederaufbereitungszentren</p> <p>Striktere Vorgaben durch ElektroG</p>

Maßnahmen	Mögliche Instrumente
3. Maßnahmen zur direkten Begrenzung der Digitalisierung	
Begrenzung besonders energieintensiver Anwendungen (z. B. hochauflösende Videostreams, Cloud-Gaming)	<p>Temporäre oder mengenmäßige Obergrenzen („Data Caps“)</p> <p>Vorgabe stromsparender Standard-Qualitätsstufen</p> <p>Auflagen für energieintensive Rechenzentren</p>
Einschränkung bestimmter digitaler Dienste in sensiblen Bereichen	<p>Genehmigungspflichten</p> <p>ggf. Teilverbote besonders ressourcenintensiver Services</p> <p>Monitoring- und Berichtspflichten</p>
Verbot/Regulierung schädlicher/süchtig-machender digitaler Praktiken	Regulierung des Einsatzes von Handys in Schulen
Plattformregulierung	
Eindämmung hochskalierender KI-Simulations- oder Trainingsprozesse	<p>Transparenzvorgaben zum Ressourcenverbrauch bei KI-Trainings</p> <p>Richtlinien zur Obergrenze von Rechenstunden im öffentlich geförderten Sektor</p>
Regulierende Rahmenbedingungen für zukünftige Entwicklungen setzen	Rahmengesetz
4. Maßnahmen zur Verteuerung von Produkten	
Besteuerung von nicht-erneuerbaren Ressourcen / Generelle Anhebung der Preise für Geräte (inkl. externer Kosten)	<p>Cap and Trade Systeme für nicht nachwachsende Rohstoffe</p> <p>Ressourcennutzungsabgabe oder Rohstoffsteuer (Seltene Erden, Metalle)</p> <p>Produktbezogene Abgaben zur Internalisierung externer Umweltauswirkungen</p> <p>Einführung eines CO₂-Preises für stromintensive Cloud-Leistungen (eingebettet in Cap and Trade und CBAM),</p> <p>Differenzierte Stromsteuersätze für Rechenzentren, so dass Energieeffizienz belohnt wird, z.B. mit Hilfe eines Top-Runner-Ansatzes oder der Einführung von Effizienzklassen.</p>
Kostenwahrheit im Datentransfer erhöhen (große Datenmengen stärker bepreisen)	<p>Staffelung von Daten- oder Netzentgelten</p> <p>Nutzungsbasierte Abrechnung („Pay per Byte“)</p> <p>Preisaufschläge für Hochlastzeiten</p>
5. Maßnahmen zur kritischen Reflektion von Konsum	
Umweltfußabdruck digitaler Dienstleistungen verpflichtend transparent machen	Blauer Engel als Orientierung

Maßnahmen	Mögliche Instrumente
Verbraucherinformation	<p>Informations- und Datenteilungsrechte stärken</p> <p>Marketing für nachhaltige Produkte und Services</p> <p>Orientierungshilfen für Verbraucher zu ökologischen Produkten (Labels, Siegel, Filterfunktionen) schaffen</p> <p>Angabe des Energie-/Hardwareverbrauchs bei digitalen Produkten</p> <p>Verbot/Regulierung schädlicher/süchtig machender digitaler Praktiken</p>
Kampagnen für ein glücklicheres und nachhaltigeres Leben	<p>Verbraucherbildung für suffiziente Medien- und Geräte-Nutzung</p> <p>Staatlich geförderte Informationskampagnen gegen „Über-Konsum“</p> <p>Stärkung von Teilhabe, Basisdemokratie</p> <p>Förderung von Kultur</p> <p>Förderung von Gemeinschaftsprojekten (u. a. Gärten, solidarische Landwirtschaft)</p>
Mengenbeschränkungen für digitale Mediennutzung (z. B. monatliches Streaming-Limit)	<p>Kontingent-Systeme</p> <p>Gesetzliche Verbrauchsobergrenzen</p> <p>Automatische Balken-Anzeige („Digitaler Tacho“)</p> <p>Nudging für bewussten Medienkonsum</p>
Nachhaltige Angebote in den Vordergrund stellen, Nudge-Ansätze	<p>Werbung für klimaschädliche Produkte verbieten</p> <p>Marketing für nachhaltige Produkte und Services</p> <p>Orientierungshilfen für Verbraucher zu ökologischen Produkten (Labels, Siegel, Filterfunktionen)</p> <p>Verbraucherrechte stärken</p>
Sharing-Modelle statt Individualanschaffung (z. B. geteilte IT-Ausstattung am Arbeitsplatz) / Gemeinschaftlichen Nutzen digitalisierungsrelevanter Güter organisieren	<p>Förderungen gemeinschaftlicher Computerräume</p> <p>Steuerliche Begünstigung für Kooperationsmodelle</p> <p>Betriebliche Richtlinien zur gemeinsamen Ausstattung</p>
6. Maßnahmen zur Beeinflussung der Qualität des Konsums	
Transparenz über den Umweltfußabdruck über die gesamte Lieferkette	<p>Werbung für klimaschädliche Produkte verbieten</p> <p>Instrumente wie CO₂-Rechner fördern</p>
Transparente Technikfolgenabschätzung (Pflicht)	
Recht auf Reparatur verankern	<p>Verpflichtung der Hersteller zu reparaturfreundlichem Design</p> <p>Bereitstellung von Ersatzteilen, Reparaturanleitungen und Werkzeugen</p>

Maßnahmen	Mögliche Instrumente
	<p>Austauschmöglichkeit von Akkus, Displays und weiteren Hardwarekomponenten</p> <p>Reduzierte Mehrwertsteuer für Reparaturen</p>
<p>Konsum lenken in Richtung ressourcensparender Angebote (z. B. energieeffiziente Software, langlebige Geräte)</p>	<p>Positivkennzeichnungen und verpflichtende Umweltlabels (z. B. „Blauer Engel“ für Software und IT-Geräte)</p> <p>Ressourcen- und Energieampel</p> <p>Beschaffungskriterien in der öffentlichen Hand</p> <p>Informationspflichten für Händler</p> <p>Digitale Produktpässe mit detaillierten Umwelt- und Recyclinginformationen</p> <p>Öffentliche Anlaufstellen (z. B. Verbraucherzentralen) und Schulung von Multiplikatoren (Lehrer, Bibliothekspersonal)</p> <p>Stärkung von Informations- und Datenteilungsrechten</p> <p>Marketing für nachhaltige Produkte und Services</p> <p>Orientierungshilfen für Verbraucher zu ökologischen Produkten (Labels, Siegel, Filterfunktionen)</p> <p>Verpflichtende Angaben zum Energie-/Hardwareverbrauch bei digitalen Produkten</p> <p>Verpflichtender Nachweis des Umweltfußabdrucks digitaler Dienstleistungen</p> <p>Transparenz über Energie- und Datenverbrauch digitaler Anwendungen</p>
<p>Nachhaltige Angebote in den Vordergrund stellen. Nudge-Ansätze</p>	<p>Werbung für klimaschädliche Produkte verbieten</p> <p>Marketing für nachhaltige Produkte und Services</p> <p>Orientierungshilfen für Verbraucher zu ökologischen Produkten (Labels, Siegel, Filterfunktionen)</p>

Quelle: Eigene Darstellung abgeleitet aus dem systemischen Modell, ergänzt und konkretisiert mit Hinweisen aus dem Expertenworkshop am 2. September 2024, und mit Ergänzungen von IZT, Consideo und Systemic Futures aus den Fact Sheets sowie aus der Studie von Jaergen-Erben et al. 2023.

3.2 Kritische Reflektion der identifizierten Maßnahmen

Digitalisierung im Allgemeinen wie auch die KI in Unternehmen hat mehr Effizienz und im Fall besserer Produkte auch mehr Effektivität zum Ziel. Die Nebenwirkungen sind der ökologische Fußabdruck der eingesetzten Technologien, bei Preissenkungen der mögliche Mehrkonsum durch Kund*innen, oder alternativ der Mehrkonsum durch das Unternehmen und seiner Kapitalgeber. Ob die Effekte dann als Rebound oder als wirtschaftliches Wachstum zu bezeichnen sind, ist für die Auswirkungen auf die Umwelt unwesentlich. Interessant ist die umgekehrte Formulierung: Digitalisierung wird aufgrund der oben beschriebenen Unternehmensdynamik nicht dafür eingesetzt, das Gleiche mit einer Entlastung für die Umwelt zu erzielen, sondern immer führen Einsparungen zu einem „Mehr“ (Produktion, Konsum oder Nutzung).

3.3 Vertiefende Fallbetrachtungen

Um der Frage spezifischer nachzugehen, mit welchen Maßnahmen und Instrumenten Rebound-Effekte eingedämmt werden können, wurden drei Fallbeispiele näher untersucht. Es wurden Ansatzpunkte bzw. Vorschläge für Instrumente bzw. Instrumentenmixe erarbeitet, um Umweltwirkungen von Rebound-Effekten zu mindern oder gar zu verhindern.

Für die Auswahl der Fallbeispiele wurden folgende Kriterien angelegt: Sind alle Bereiche abgedeckt (Wirtschaft, Konsum, Technologie)? Wie gut ist die Datenverfügbarkeit (kann ein direkter Rebound empirisch nachgewiesen werden)? Wie politisch relevant ist der Fall? Außerdem wurde eine Zukunftstechnologie betrachtet. Eine Zukunftstechnologie ist in dem gemeinsamen Verständnis erst als Prototyp oder im Experimentalstadium vorhanden. Insofern kann es zum heutigen Zeitpunkt keine empirischen Daten geben. Die politische Relevanz kann ebenfalls nur dadurch eingeschätzt werden, als dass die Anwendung bisher nicht reguliert ist, es aber sowohl für die Umwelt Ent- als auch Belastungspotenzial gibt. Auf direkte als auch indirekte Rebound-Effekte kann dabei hauptsächlich abduktiv durch die systemische Strukturanalyse geschlossen werden. Insofern kann die Betrachtung der Zukunftstechnologie als ein Beispiel für Vorausschauendes Regierungshandeln („Anticipatory Governance“) gesehen werden.

Die Betrachtung und Analyse der Fälle basieren zunächst auf den Fact Sheets, die in der vollständigen Form im Anhang A enthalten sind. Zur Vereinfachung des Leseflusses werden in kurzer zusammenfassender Form die Definition und Abgrenzung des Themas genannt, die erwähnten Potenziale zur Umweltentlastung, die in der Literatur gefunden wurden. Davon ausgehend, wird zunächst der Fall des direkten Rebound-Effektes untersucht und dann die anderen Formen des Rebound-Effektes betrachtet. Im dritten Schritt werden dann mögliche Maßnahmen diskutiert. Diese werden sowohl aus der systemischen Analyse als auch dem Workshop abgeleitet.

3.3.1 Fall 1: E-Commerce

E-Commerce, kurz für Electronic Commerce (elektronischer Handel), bezeichnet den Kauf und Verkauf von Waren und Dienstleistungen über das Internet. E-Commerce umfasst eine breite Palette von Geschäftsaktivitäten, von großen Online-Marktplätzen wie *Amazon*, *Temu* und *Alibaba* bis hin zu kleineren, spezialisierten Online-Shops. Das Fact Sheet zum E-Commerce findet sich im Anhang A.1.1.

Potenziale zur Umwelt- und Ressourcenschonung

- ▶ **Reduzierter Bedarf an physischen Geschäften:** Da E-Commerce die Notwendigkeit für physische Verkaufsflächen reduziert, wird weniger Energie für den Betrieb von Geschäften (Beleuchtung, Heizung/Kühlung) benötigt, weniger Baumaterial für den Bau neuer Geschäfte verbraucht und potenziell weniger Fläche versiegelt.
- ▶ **Optimierte Lieferketten:** Durch fortschrittliche Logistiklösungen und zentrale Lagerhaltung können Transporte effizienter gestaltet werden, was potenziell den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen senkt. Ebenso können Lieferungen gebündelt werden, um Transportwege zu minimieren.
- ▶ **Digitale Produktverkäufe:** Produkte wie E-Books, Musik und Software, die über das Internet verkauft und heruntergeladen werden, eliminieren den Bedarf an physischen Medien und deren Transport, was zu einer erheblichen Ressourceneinsparung beiträgt.
- ▶ **Reduzierter Individualverkehr:** Da Konsument*innen Produkte online kaufen, sinkt die Notwendigkeit für individuelle Einkaufsfahrten, was zu einer Verringerung des Verkehrsaufkommens und somit zu niedrigeren CO₂-Emissionen führt.
- ▶ **Zugang zu umweltfreundlichen Produkten:** In vielen Bereichen (Kleidung, Möbel, Baustoffe, etc.) ist die Nachfrage vor Ort für ein Präsenzangebot zu gering, so dass erst der Online-Handel diese für alle zugänglich macht.

Bewertung der Rebound-Effekte und Ansatzpunkte für Maßnahmen

1. Reduzierter Bedarf an physischen Geschäften

Im Einzelhandel in den Städten gibt es Hinweise darauf, dass Geschäfte in den Innenstädten aufgegeben werden. Dies betrifft insbesondere kleine Einzelhändler, die nicht nur wegen des Online-Handels unter Druck stehen, sondern auch durch großen Einkaufsketten, die häufig auch in den großen Einkaufszentren am Stadtrand zu finden sind. Gleichzeitig sind die großen Ketten in der Lage, neben den Ladengeschäften auch selbst Online-Handel zu betreiben, was den Druck auf kleine Ladengeschäfte weiter erhöht.

Allerdings werden die Gebäude in den Innenstädten und die versiegelte Fläche nicht einfach verschwinden. Es ist wahrscheinlicher, dass es zu Zwischennutzungen oder Umnutzungen der Gebäude kommt, so dass die direkte Einsparung an Betriebsenergie (Wärme, Beleuchtung) potenziell nicht langfristig bestehen bleibt. Zudem haben die Städte und Kommunen kein Interesse daran, dass die Innenstädte ungenutzt sind und legen Programme zur Umgestaltung auf. Hier wird auch ein großes Potenzial gesehen, die Städte nachhaltig zu gestalten (Tobias Jetzke et al. 2022; Stüve 2024). An dieser Stelle bleibt es offen, welche Nutzung das Gebäude am Ende erfährt. Die Gesamtbilanz wird unterschiedlich sein, ob es zu einem Kulturangebot, Restaurant/Gastronomie oder zu einer Umnutzung als Wohn- oder Büroraum kommt. Je nach Nutzungsform wird das auch Auswirkungen auf das Umfeld haben.

Darüber hinaus verbleibt ein Effekt auf die Anzahl am Konsum beteiligter Arbeitskräfte, wenn das Verkaufspersonal vor Ort eingespart und nur wenige zusätzliche Arbeitskräfte entlang der Lieferkette und für die Umsetzung der Digitalisierung zusätzlich eingesetzt werden. Inwieweit dies Veränderungen auf die Arbeitswege und die Kaufkraft der Arbeitskräfte nach sich zieht und ob dies eine positive oder negative Auswirkung von E-Commerce darstellt, ist außerhalb dieser Studie, wenn es denn überhaupt zu bewerten wäre.

Um also ein „mehr“ an Ressourcenverbrauch in den Innenstädten zu verhindern und die Chancen zu nutzen, ist eine Umgestaltung der Innenstädte zu mehr Nachhaltigkeit angeraten.

Hierzu sind Investitionen in die Innenstädte notwendig, sowohl auf Ebene von privaten und gewerblichen Investoren als auch auf Ebene der Städte und Kommunen. Hierunter fallen beispielsweise energetische Sanierungen, wie Dämmung, moderne Heizungssysteme, Dachbegrünung oder Solaranlagen und Strom aus erneuerbaren Quellen, aber auch Mischkonzepte von Einkaufen, Wohnen, Kultur und Sozialem.

Solche Investitionen haben aber auch einen Effekt auf die Ressourceninanspruchnahme. Aus der Perspektive der **Unternehmen** investieren diese, um wettbewerbsfähig zu sein. Investitionen erfordern Zinsen und damit Produktivitätssteigerungen. Privatwirtschaftliche Investitionen bleiben aber aus, wenn es nicht zu einer wirtschaftlich interessanten Nutzung kommen wird.

Aus der Perspektive der **Konsument*innen** (auch Tourist*innen) geht es darum, möglichst „günstig“ zu Dienstleistungen oder Waren zu kommen. Ohne zu tief in psychologische Faktoren einzusteigen, erzeugt das „Kaufen und Haben“ ein gutes Gefühl bei Konsument*innen, was auch einen Einfluss auf das Bedürfnis nach Konsum, materiellem Status festigt (Guillen-Royo 2019). Gleichzeitig deuten Studien (z. B. Carrero Valor & Redondo 2020) daraufhin, dass weniger bzw. bewusster nachhaltiger Konsum zu mehr Wohlbefinden und Zufriedenheit führt (vgl. Punkt 5. Unten). Grundsätzlich bedeutet allerdings jeder Konsum eine Verringerung der Kaufkraft, um weiteren Konsum zu betreiben. Geld, was an der einen Stelle ausgegeben wurde, steht anderer Stelle wieder anderen Konsument*innen zur Verfügung. Gleichzeitig ist zu beobachten, dass Produkte günstiger werden, und so entsteht der Eindruck, dass es zu mehr Konsum kommt. Hinzu kommen auch kurzfristige Effekte durch Kreditaufnahme und Verschuldung, wenngleich auch dieser Effekt zu einer Konsumverschiebung führt (zeitlich). Im Prinzip wird Konsum entsprechend der Kaufkraft umgesetzt. Wie weiter vorne im Bericht angedeutet, geht es an dieser Stelle aber nicht um Verteilungs- oder Gerechtigkeitsfragen, das Hinterfragen des Geldsystems oder die Steuerung der Geldmenge, die für den Konsum zur Verfügung steht.

Der wesentliche Ansatz also ist – unter der Annahme, dass es einen freien Markt gibt – eine (indirekte) Einflussnahme auf die Qualität der Produkte und Dienstleistungen, sowie die Reduktion des Ressourcenverbrauchs entlang der Wertschöpfungskette inklusive der Vorketten und den sich anschließenden Kreisläufen. Somit kommen auf Ebene der Innenstädte folgende Maßnahmen in Frage:

- ▶ Erhöhung der Energieeffizienz im Gebäudebestand.
- ▶ Stadtplanerische Maßnahmen zur Erhöhung der Lebensqualität in den Innenstädten
- ▶ Verringerung des Individualverkehrs und Erhöhung der Effizienz
- ▶ Nicht allein in Bezug auf Innenstädte: Indirekte Beeinflussung der Produktqualität (Obsoleszenz, Reparierbarkeit, Effizienzsteigerung im Verbrauch).

Spezifisch auf Rebound-Effekte in der Digitalisierung bezogen, ist aus systemischer Perspektive keine Steuerung des E-Commerce möglich, die die ambivalenten Effekte auf Innenstädte verhindern könnte.

2. Optimierte Lieferketten

Optimierte Lieferketten können über Effizienzsteigerungen zu einer Umweltentlastung führen. In Bezug auf Energieverbrauch (Lager, Logistik, Heizung, IT) führt die Effizienzsteigerung nur dann zu einer absoluten Reduktion der Inanspruchnahme, wenn die Branche nicht wachsen würde, der Gesamtumsatz materieller Güter nicht zunimmt. In der Logik von Unternehmen und Logistikern braucht es aber Wachstum und jede Investition braucht eine Entsprechung im Gewinn. Das Interesse der Produzenten von Waren ist es, (mehr) Waren zu verkaufen, das

Interesse der Logistiker, möglichst schnell und günstig die Waren zu verteilen, und das Interesse der Kund*innen ist es, möglichst preiswert und bequem die Waren zu erhalten (Groß et al. 2016). Der einfache und bequeme Zugang zu jeder Zeit und von jedem Ort, den E-Commerce bietet, kann dazu führen, dass mehr konsumiert wird. Dies wird noch verstärkt durch die fast unbegrenzte Angebotsvielfalt, die zusätzliche Konsumwünsche entstehen lässt. Auch Zeit-Rebound-Effekte treten auf, da der Online-Einkauf gegenüber dem Einkaufen vor Ort erheblich weniger Zeit erfordert. Zudem wurden in der Literatur Preis-Rebound-Effekte festgestellt (Frick & Santarius 2019). Durch die Möglichkeit des einfachen und schnellen Vergleichs verschiedener Online-Händler und die Nutzung von Vergleichsportalen können Verbraucher*innen das kostengünstigste Angebot wählen und somit Kosten sparen. Das eingesparte Geld wird allerdings häufig wieder für neue Konsumhandlungen ausgegeben (Frick & Matties 2020).

Dabei ist es an dieser Stelle rein in Bezug auf die Logistik (Lager und Transport) unerheblich, ob es sich um neue oder gebrauchte Waren handelt, die transportiert werden. In Bezug auf die Lieferketten erscheint es naheliegend, dass es sich hier um einen „klassischen“ Rebound-Effekt handelt (Kapitel 1.2 und Sorrell 2009). Jedwede Effizienzsteigerung führt zur Kosteneinsparung, die entweder zur Reinvestition, Gewinnmitnahme oder Senkung der Preise – und damit Erhöhung des Konsums – führt. Die „typischen“ Maßnahmen, diesem zu begegnen sind:

- ▶ Optimierung der Ressourcenverbräuche
- ▶ Erhöhung der Kosten für die Ressourceninanspruchnahme (ggf. über Caps und Steuern)
- ▶ Absolute Reduktion des Konsums (Verlängerung der Produktlebenszyklen), Verbraucherinformation, Verbesserung der Qualität des Konsums, Verbesserter Umgang mit Retouren

Die Anwendung der Digitalisierung zur Optimierung der Lieferkette führt – zusammenfassend betrachtet – zu einem klassischen Rebound-Effekt. Eine absolute Reduktion des Konsums durch Maßnahmen des Staates widerspricht der Marktlogik und dem Interesse von Produzenten, Logistikern, Einzelhändlern und Konsument*innen.

3. Digitale Produktverkäufe

Produkte wie E-Books, Musik und Software, die über das Internet verkauft und heruntergeladen werden, eliminieren den Bedarf an physischen Medien und deren Transport, was zu einer erheblichen Ressourceneinsparung beiträgt. Allerdings werden die Produkte auf IT-Geräten betrieben und genutzt, was in der Nutzungsphase Stromverbrauch bedeutet. Hinzu kommen die Geräte, wie beispielsweise E-Book-Reader oder Tablets, Server und Computer, deren Produktion entlang der Wertschöpfungskette erhebliche Mengen an Rohstoffen und auch Energie bindet. Auf der anderen Seite müssen digitale Produkte nicht weiter verpackt werden. Beispielsweise haben die Verkäufe an physischen Tonträgern – trotz der Renaissance der Vinylschallplatte – um 60 % abgenommen (Bundesverband Musikindustrie 2024). Dies trägt erheblich zur Vermeidung von Kunststoffmüll und Verpackungen bei. Gleichzeitig nimmt die Bandbreite bei Streamingdiensten zu, indem unkomprimierte Musik und Videos angeboten werden (vgl. auch Fact Sheet A.1.5).

Nicht zu vernachlässigen sind indirekte Effekte. Digitale Produkte führen zu einer Wertschöpfung und damit zu Einkommen für die in der Wertschöpfung beteiligten Menschen. Dieses Einkommen steht wiederum für Konsum zur Verfügung.

Hier kann unmöglich eine Aussage getroffen, welche Güter und Dienstleistungen dann konsumiert werden. Wichtig an dieser Stelle ist allerdings, dass die Systemgrenzen deutlich

erweitert werden sollten, um die möglichen indirekten Belastungseffekte zu erfassen und Maßnahmen identifizieren zu können.

Wieder greifen Konsum-, Unternehmens- und Technologiedynamiken aus Kapitel 2. Wenngleich das digitale Produkt selbst ressourcenarm ist, führen Produktion und Nutzung sowie nachgelagerte Effekte durch Erhöhung der Kaufkraft zu Umweltbelastungen.

Hieraus lassen sich folgende Maßnahmen ableiten:

- ▶ Nachhaltiger Betrieb von Rechenzentren
- ▶ Produkt- und Softwaredesign für lange Lebensdauer, Reparier- und Recyclbarkeit der Geräte.

Eine Begrenzung (Cap) des Konsums erscheint aus wirtschaftlicher Sicht unrealistisch und weder von Produzenten, Einzelhandel noch von Konsument*innen erwünscht.

4. Reduzierter Individualverkehr

Studien (Le et al. 2021; Bieser et al. 2022; Hirschier 2018) gehen davon aus, dass E-Commerce den Individualverkehr reduzieren kann. Dem zugrunde liegt die Annahme, dass die Menschen weniger in die Städte oder Einkaufszentren fahren, um ihre Einkäufe zu erledigen. Gleichwohl ist das Bild in der Literatur nicht eindeutig (z. B. Berg & Henriksson 2020; Rühlín et al. 2023).

Dieser Effekt ist eng mit dem ersten Punkt und der Rolle der Innenstädte verknüpft. Unter der Annahme, dass die Innenstädte weiterhin attraktiv bleiben und Menschen anziehen, hängt es maßgeblich von der Stadtplanung und den ÖPNV-Konzepten ab, ob und wie sich der Individualverkehr reduziert. In erweiterter Systemperspektive müssen die Waren und Produkte aber in die Wohnungen und Häuser der Menschen kommen. Hier wird z.T. mit einer Zunahme der Transport- und Kurierdienste gerechnet (Castiglione et al. 2022). Es gibt Tendenzen, dass die Lieferungen kleinteiliger werden. Das führt einerseits dazu, dass beispielsweise mehr Fahrradkuriere einbezogen werden, die häufig auf E-Bikes setzen. Dies führt zu einer Entlastung an Emissionen und Flächenbedarf. Andererseits bedeutet das – bei Erweiterung der Systemgrenzen –, dass es im Wesentlichen nur zu einer Verschiebung und nicht zu einer absoluten Reduktion des Individualverkehrs kommt. Wie unter 1.) bereits ausgeführt gibt es wenige Hinweise darauf, dass die Zahlen absolut sinken und ein direkter Bezug zum E-Commerce als Digitalisierungstechnologie besteht. Es ist eher eine Frage der Stadtplanung und der Qualität des Konsums, wie der Individualverkehr sich entwickeln wird. Folgende Maßnahmen sind denkbar:

- ▶ Lenkung des Individualverkehrs, Erhöhung der Attraktivität und Nachhaltigkeit der Innenstädte
- ▶ Konsequente Umsetzung von E-Mobilität und Fahrrädern in Innenstädten.

5. Zugang zu umweltfreundlichen Produkten

In vielen Bereichen (umweltfreundliche Kleidung, Möbel, Baustoffe etc.) ist die Nachfrage vor Ort für ein Präsenzangebot zu gering, so dass erst der Online-Handel diese für alle zugänglich macht. Dies ermöglicht für eine große Breite an Konsument*innen überhaupt erst den Zugang zu nachhaltigen Produkten.

Die Herausforderungen, die mit der Logistik einhergehen (Verpackung, Transport), bleiben bestehen. Allerdings wird durch die Förderung bzw. den Konsum von umweltfreundlichen Produkten die Qualität des Konsums verbessert, was den zuvor genannten Maßnahmenempfehlungen entspricht.

Zwischenfazit: Maßnahmen und Instrumente, um die Rebound-Effekte im Bereich E-Commerce einzudämmen

Um Rebound-Effekte im E-Commerce einzudämmen ist ein integrativer Ansatz zielführend, der technologische Regulierung, Preissteuerung, Transparenzmaßnahmen und bewusste Konsumlenkung kombiniert. Wichtig ist, dass alle Akteursgruppen – Plattformbetreiber, Logistiker, Verbraucher*innen sowie staatliche Institutionen – an einem Strang ziehen, um gewünschte Effizienzgewinne zu erzielen und trotzdem einen Anstieg des Gesamtverbrauchs zu vermeiden. Durch eine solche systemische Herangehensweise lässt sich das volle Potenzial des E-Commerce nutzen, ohne negative Umweltfolgen weiter zu verstärken.

1. Maßnahmen und Instrumente, die an den Technologien ansetzen

Um bereits bei der Entwicklung digitaler Geschäftsmodelle die ökologischen Folgen zu berücksichtigen, können Start-up-Förderprogramme mit Fokus auf Effizienz und CO₂-Reduktion eingesetzt werden. Gleichzeitig sollten verpflichtende Standards für Hard- und Software eingeführt werden (z. B. Mindestvorgaben zur Update- und Reparaturfähigkeit von Geräten). Top-Runner-Programme, welche die besten, effizientesten Lösungen prämiieren oder den ineffizientesten Produkten über Steuern und Gebühren Anreize zur Verbesserung setzen, können dazu beitragen, Innovationssprünge zu beschleunigen. Insbesondere im E-Commerce-Umfeld führt dies zu nachhaltigeren Plattformen und Versandprozessen.

2. Verringerung des Rucksacks

Gerade im Online-Handel ist die Hardware ein Schlüsselfaktor. Neben energieeffizienten Rechenzentren und ressourcenschonenden Serverarchitekturen empfiehlt sich eine konsequente Kreislaufgestaltung bei Geräten und IT-Infrastruktur: Reparaturfreundlichkeit, längere Garantiefrieten und Pfandsysteme für Altgeräte reduzieren Elektronikschrott und mindern die mit dem Ausbau der Logistik verbundenen Belastungen. Zudem sollten Steuermechanismen (z. B. CO₂-Preise) eingeführt werden, die den Energie- und Ressourcenverbrauch beim Hosting und bei Datenübertragungen abbilden.

3. Optimierte Logistik mit klaren Grenzen (Begrenzung)

Die kostengünstige und schnelle Lieferung ist Teil des Erfolgs von E-Commerce, birgt jedoch ein erhebliches Risiko für Rebound-Effekte, da sinkende Versandkosten häufig zu steigender Nachfrage führen. Eine mögliche Gegensteuerung liegt in der Verteuerung besonders ressourcenintensiver Versandoptionen (z. B. Express-Lieferungen), einer Staffelung der Versandkosten nach Entfernung oder Gewicht sowie der Förderung gebündelter Lieferungen in Verbundprojekten. Im E-Commerce machen Verpackungsmaterialien einen erheblichen Anteil der Umweltwirkungen aus. Die Reduzierung von Verpackungsmaterial sowie ein Umstieg auf umweltfreundliche Materialien sind daher wichtige Ansätze. Des Weiteren sollten Maßnahmen getroffen werden, um Retouren zu senken, z. B. durch bessere Produktinformationen oder die verpflichtende Einführung von Versandgebühren bei Retouren. Energieintensive Rechenleistungen für Logistik- und Routenoptimierung sollten gleichzeitig möglichst mit erneuerbaren Energien betrieben werden. So lassen sich Effizienzvorteile nutzen, ohne dass es zu einem stark wachsenden Gesamtverbrauch kommt.

4. Staatliche Steuerung und Preispolitik

Ökonomische Instrumente wie CO₂-Steuern oder Rohstoffabgaben sorgen dafür, dass die Umweltkosten im Produkt- und Versandpreis internalisiert werden. Das setzt allerdings voraus, dass die Produktverantwortlichkeit geklärt ist. Wird der E-Commerce-Anbieter in die Produktverantwortung genommen, wäre er motiviert, der ökologischen Qualität seiner Produkte wie auch den Logistiklösungen mehr Bedeutung beizumessen. Ist der Produzent allein

verantwortlich, müsste die Regulation bei den Produzenten ansetzen. Im Endeffekt wird die Nachfrage des Produktes durch den Preis gesteuert. Inwieweit das ökonomische Instrumente als Abgabe oder als Steuer konzipiert werden kann, hängt stark vom Einzelfall ab. Steuerentlastungen können wiederum Anreize bieten. Eine differenzierte Konsumsteuer, die nachhaltige Produkte begünstigt und umweltschädliche Produkte verteuert, könnte ebenso wirksam sein, um den Konsum in nachhaltigere Bahnen zu lenken.

5. Konsumqualität und Transparenz steigern

Das Auftreten und das Ausmaß von Rebound-Effekten im E-Commerce werden maßgeblich durch das Konsumverhalten bestimmt. Hier können verschiedene Maßnahmen ansetzen, um Verbraucher*innen über die Auswirkungen ihres Konsums zu informieren und das Nachhaltigkeitsbewusstsein zu fördern. Informationskampagnen und digitale Labels helfen Verbraucher*innen, ressourcenschonende Produkte zu erkennen. Plattformen, die transparente Angaben zum Energieverbrauch von Geräten und zur CO₂-Bilanz von Lieferketten anbieten, leisten einen Beitrag zur kritischen Konsumreflexion. Ein „Digitaler Tacho“ für E-Commerce-Einkäufe oder Streaming-Dienste könnte Nutzer für ihren Ressourcenverbrauch sensibilisieren, während Nudging-Ansätze nachhaltige Produktauswahl und reduzierte Bestellhäufigkeit fördern. Ein weiterer Ansatz kann darin bestehen, nachhaltige Produkte auf den Plattformen stärker sichtbar zu machen bzw. in den Vordergrund zu rücken und so die Produktsuche zu vereinfachen (bspw. durch nachhaltige Such- und Filterfunktionen).

6. Begrenzter Einsatz besonders energieintensiver Anwendungen (Beeinflussung der Qualität)

Im Kontext wachsender Online-Angebote ist es sinnvoll, die Nutzung stark ressourcenaufwändiger Dienste zu regulieren. Dazu gehören hochauflösende Videostreams oder Cloud-Gaming-Dienste, die eine große Datenmenge erfordern. Temporäre Obergrenzen oder höhere Gebühren für diese Leistungsbereiche können verhindern, dass gewonnene Effizienz direkt in zusätzliche Nachfrage übergeht. Hier spielen die hohen Bandbreiten und die Flatrates der Internetanbieter eine zentrale Rolle. Bei einigen Tarifen gab es nur eine bestimmte Menge an „schnellen Daten“ und ab einem Limit wurde die Geschwindigkeit gedrosselt. Aktuell sind derartige Limits kaum zu finden. Sollten solche Limits über Kosten gesetzt werden, entsteht wieder das Problem der digitalen Spaltung, da möglicherweise nicht alle Menschen gleichermaßen Zugang zum Breitbandinternet hätten. Daher wäre es eher denkbar, spezifische Videostreaming-Dienste und die Spieleplattformen mit Abgaben zu belegen, ohne dass grundsätzlich der Zugang für die Menschen verwehrt wird.

In diesem Kontext ist als indirekte Maßnahme die Förderung des nachhaltigen Konsums – also der bessere Zugang zu umweltschonenden Produkten – hervorzuheben.

3.3.2 Fall 2: Künstliche Intelligenz in Logistik / Künstliche Intelligenz in Produktion und Fertigung

Die folgenden Fact Sheets befinden sich im Anhang: Künstliche Intelligenz A.3.5, „Smarte“ Transportlogistik A.2.8 und Cyber Physical Systems in der Produktion A.2.2.

Zunächst wird Künstliche Intelligenz (KI) generell betrachtet. Danach werden mit „KI in der Logistik“ und „KI in der Produktion“ zwei Anwendungen näher untersucht.

1. Definition und Überblick: (a) Künstliche Intelligenz und die Anwendung in (b) Logistik und (c) Produktion

Künstliche Intelligenz bezeichnet eine Technologie, bei der Computersysteme in der Lage sind, Muster in komplexen Datenmengen zu erkennen und anhand dieser Daten darauf trainiert werden, Probleme selbstständig zu lösen und Strategien anzupassen, d. h. zu „lernen“. Die Internationale Organisation für Normung (ISO) definiert KI als „ein technisches und wissenschaftliches Feld, das sich mit technischen Systemen befasst, die Inhalte, Prognosen, Empfehlungen oder Entscheidungen für bestimmte, vom Menschen definierte Ziele generieren“. KI umfasst verschiedene Technologien und Methoden, die darauf abzielen, Maschinen zu befähigen, Aufgaben auszuführen, die typischerweise menschliche Intelligenz erfordern, wie Lernen, Schlussfolgern, Problemlösen und Wahrnehmung.

Im Kontext von Logistik und Produktion kommt KI vor allem in Form des maschinellen Lernens (Machine Learning), neuronaler Netze und zunehmend auch großer Sprachmodelle zum Einsatz. Diese KI-Anwendungen verändern die Art und Weise, wie Güter produziert, gelagert und transportiert werden grundlegend. In der Logistik unterstützt KI bei der dynamischen Routenplanung, Flottenoptimierung und Transportnachfrageprognose. Fortschrittliche Algorithmen analysieren große Datenmengen in Echtzeit, um die effizienteste Route unter Berücksichtigung von Verkehrsinformationen, Wetterbedingungen und Lieferzeitfenstern zu ermitteln. Dies reduziert Leerfahrten und optimiert die Auslastung von Transportmitteln.⁶

In der Produktion trägt KI zur Verbesserung von Fertigungsprozessen bei, indem sie präzise Nachfrageprognosen erstellt, die Produktionsabläufe optimiert, die Materialbedarfe minimiert (Senkung von Ausschüssen, Optimierung der Schnittmuster, u.ä.), automatisierte Qualitätskontrolle durchführt und vorbeugende Instandhaltung ermöglicht. Intelligente Robotik, gestützt durch KI, kann komplexe Aufgaben autonom ausführen und dadurch die Automatisierung in der Produktion vorantreiben. Cyber-physische Systeme vernetzen Maschinen, Anlagen und Produkte, wodurch Produktionsprozesse flexibler und effizienter gestaltet werden können.

Die Integration von KI in Logistik und Produktion ist ein zentraler Bestandteil der Industrie 4.0-Strategie und zielt auf eine vollständige Digitalisierung und Vernetzung der Wertschöpfungskette ab. Die datenbasierte Entscheidungsfindung durch KI unterstützt Unternehmen bei der Analyse großer Datenmengen, um fundierte Entscheidungen zu treffen und Geschäftsprozesse zu optimieren.

2. Umweltentlastungseffekte durch KI in der Logistik und Produktion

Künstliche Intelligenz bietet in der Logistik und Produktion erhebliche Potenziale zur Umwelt- und Ressourcenschonung, da sie zahlreiche Prozesse optimieren und effizienter gestalten kann (Du Plessis et al, 2025; Kharchenko et al. 2024; Fareed et al 2024).

- ▶ In der Logistik ermöglicht KI eine präzise und dynamische Routenplanung, die Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen reduziert. Durch intelligente Algorithmen können Transportwege minimiert, Leerfahrten vermieden und die Auslastung von Fahrzeugen verbessert werden. Studien zeigen, dass durch KI-optimierte Logistiknetzwerke Kraftstoffeinsparungen von bis zu 10-15 % möglich sind.
- ▶ In der Produktion trägt KI zur Ressourcenschonung durch eine intelligente Nachfrageprognose bei. Präzise KI-gestützte Vorhersagen über zukünftige Marktentwicklungen ermöglichen Unternehmen, ihre Produktionsmengen genauer zu planen und **Überproduktion zu vermeiden**. Dies führt zu einer Reduzierung von Rohstoffeinsatz, Energieverbrauch und Abfällen.
- ▶ Die automatisierte Qualitätskontrolle durch KI-Systeme trägt ebenfalls zur **Ressourceneffizienz** bei. Durch frühzeitiges Erkennen von Fertigungsfehlern können Ausschuss und Nacharbeit minimiert werden. Computergestützte Bilderkennungssysteme identifizieren Abweichungen mit einer Genauigkeit, die das menschliche Auge übertrifft, und tragen so zur Vermeidung von Materialverschwendung bei.
- ▶ Ein weiteres wichtiges Anwendungsfeld ist die vorbeugende Instandhaltung. KI-Systeme können anhand von Sensordaten potenzielle Maschinenausfälle frühzeitig erkennen und vorhersagen. Dies ermöglicht eine präventive Wartung, bevor kostspielige Defekte auftreten, und **verlängert die Lebensdauer von Maschinen und Anlagen**. Die Reduktion von Stillstandzeiten führt zu einer **höheren Ressourceneffizienz** und verringert den Bedarf an Ersatzteilen und Neuanschaffungen.
- ▶ Im Bereich des intelligenten Energiemanagements ermöglicht KI die Optimierung des **Energieverbrauchs** in Produktionsanlagen. Durch die Analyse von Produktionsdaten können Lastspitzen ausbalanciert und der Energieeinsatz effizienter gestaltet werden. KI-gestützte Systeme können den Energieverbrauch automatisch an die aktuelle Produktion anpassen und in Zeiten geringerer Auslastung Energiesparmaßnahmen einleiten.
- ▶ Die kontinuierliche Prozessoptimierung durch KI-Systeme identifiziert fortlaufend Verbesserungspotenziale in Produktionsabläufen. Durch die Analyse umfangreicher Produktionsdaten werden Ineffizienzen erkannt und behoben, was zu einer stetigen Verbesserung der **Ressourceneffizienz** führt. In einigen Fällen konnten durch KI-gestützte Prozessoptimierungen Materialverbräuche um bis zu 20 % reduziert werden.

Bewertung der Rebound-Effekte und Ansatzpunkte für Maßnahmen im Bereich KI in Logistik und Produktion

Trotz der vielversprechenden Potenziale zur Umwelt- und Ressourcenschonung sind mit dem Einsatz von KI in der Logistik und Produktion auch erhebliche Rebound-Effekte verbunden. Diese können die ursprünglich erwarteten positiven Umwelteffekte teilweise oder vollständig kompensieren (Rodden et al. 2025).

Ein zentraler Wirkmechanismus ist der Preis-Rebound-Effekt: KI führt zu Effizienzgewinnen in Produktion und Logistik und damit zu einer Kostenreduktion für Unternehmen. Diese Kosteneinsparungen ermöglichen eine Preissenkung der Produkte, was wiederum zu einer erhöhten Nachfrage führen kann. So kann die absolute Produktionsmenge trotz effizienterer Prozesse steigen und damit auch der Ressourcenverbrauch und die Umweltbelastung. Dieser Effekt wird verstärkt durch das grundsätzliche Interesse von Unternehmen, möglichst viele Güter, Produkte und Dienstleistungen zu verkaufen und Kosten zu senken. Die indirekten Varianten dieses Rebound-Effekts sind genauso denkbar: dass der Konsum an anderer Stelle

Ausgaben tätigt. Ein Unternehmen kann die Preise auch konstant halten und die Gewinne reinvestieren oder an die Unternehmer/ Eigner ausschütten. In beiden Fällen ist eine seriöse Aussage über die Qualität (im Sinne von Umweltbelastung) des Folgekonsums unmöglich (Luccioni et al. 2025).

Ein weiterer bedeutsamer Rebound-Effekt ist der materielle Rebound. Die Infrastruktur, das Training und der Betrieb von KI-Systemen verursachen selbst einen erheblichen Ressourcenverbrauch. So benötigt das Training von KI-Modellen enorme Rechenkapazitäten und entsprechenden Stromverbrauch. Zwischen 2012 und 2018 stieg der Rechenleistungsbedarf für das Training von KI-Systemen um das 300.000-fache, hauptsächlich durch die verstärkte Nutzung paralleler Algorithmen. Der Energieverbrauch einer Google-Suche mit KI ist etwa zehnmal höher als bei einer herkömmlichen Suche (RW digital 2024). Das Training großer Sprachmodelle kann CO₂-Emissionen verursachen, die vergleichbar mit denen von fünf Autos über deren gesamte Lebensdauer sind (Hao 2019).

Zusätzlich zum Energiebedarf der Hardware entstehen während des Betriebs der Rechenzentren weitere Energieaufwände durch Leistungsverluste, Kühlung und Beleuchtung. Bei der Bewertung von KI-Anwendungen in Logistik und Produktion entsteht ein Allokationsproblem: Welchem Anwender wird die Ressourceninanspruchnahme der KI-Infrastruktur zugeschrieben?

In der erweiterten Systembetrachtung muss der Gesamtenergieverbrauch der KI den Effizienzsteigerungen gegenübergestellt werden. Nimmt man jedoch die absoluten Produktionsvolumen, die durch KI-Einsatz tendenziell steigen, und rechnet die Ressourcenverbräuche der KI hinzu, ist davon auszugehen, dass absolut mehr Energie und Rohstoffe genutzt werden als ohne den KI-Einsatz. Hierzu fehlt allerdings noch belastbares Zahlenmaterial (Luccioni et al. 2025).

Die Verbesserung der Effizienz durch KI kann paradoxerweise zu weiteren Rebound-Effekten führen. So kann die erhöhte Prozesseffizienz die Entwicklung neuer Produkte oder die Erschließung neuer Märkte fördern, was wiederum zu zusätzlichem Ressourcenverbrauch führt. Nach einer Umfrage von *Deloitte* erwarten Führungskräfte von KI-Anwendungen nicht nur Effizienzsteigerungen, sondern auch die Entwicklung neuer Produkte und die Erschließung neuer Märkte, was einen Einfluss auf die Rohstoffinanspruchnahme haben kann, je nachdem ob andere Märkte substituiert werden.

Zwischenfazit: Maßnahmen und Instrumente, um die Rebound-Effekte im Bereich der KI-Anwendung in Logistik und Produktion einzudämmen

Technische Verbesserungen der KI-Systeme selbst, wie energieeffizientere Algorithmen und Hardware, können den direkten Ressourcenverbrauch senken. Eine bewusste Gestaltung von KI-Anwendungen mit dem Ziel der Ressourceneinsparung und nicht nur der Kostenreduktion ist ebenfalls wichtig. Zudem können ordnungspolitische Maßnahmen wie die Bepreisung von CO₂-Emissionen dazu beitragen, dass Effizienzgewinne nicht vollständig in Mehrproduktion umgesetzt werden, sondern tatsächlich zu absoluten Emissionsreduktionen führen. Direkte Maßnahmen, die an der Digitalisierung (KI) ansetzen sind genauso denkbar, wie Maßnahmen, die indirekt über den Konsum Einfluss nehmen.

Die Analyse der Rebound-Effekte von KI-Anwendungen in Logistik und Produktion zeigt aber, dass die Ausgangslage bei KI sehr komplex ist, und dass ein systemisches Vorgehen notwendig ist, um Rebound-Effekte einzudämmen und gleichzeitig die Potenziale der Technologie nutzen zu können. Die aktuelle Geschwindigkeit der KI-Entwicklung ist allerdings mittlerweile zu einem strategischen Faktor im globalen Wettbewerb geworden, wodurch Maßnahmen, die auf eine Begrenzung der KI-Anwendung zielen, aktuell auf wenig Akzeptanz stoßen würden.

Diese Fallstudie fasst drei Bereiche zusammen: die KI selbst und deren Einsatz im Rahmen der Produktion und Logistik (Fallstudie 1) und im Rahmen der Produktion und des Konsums (Fallstudie 2). Entsprechend sind folgende Ansatzpunkte möglich:

- ▶ **An der KI selbst:** Hier geht es hauptsächlich um die Infrastruktur und den Energie- und Ressourcenverbrauch. Der direkte Rebound würde bedeuten, dass Kosteneinsparungen im Betrieb zu einer Reinvestition in KI führen. In der erweiterten Systemgrenze – und hier besteht noch Forschungsbedarf – muss der Gesamtenergieverbrauch der KI den Effizienzsteigerungen entgegengesetzt werden. Nehmen wir allerdings die absoluten Produktionsvolumen, die ja wieder steigen werden und rechnen die Ressourcenverbräuche der KI hinzu, müssen wir davon ausgehen, absolut mehr Energie und Rohstoffe zu nutzen als ohne die KI (es ist sogar von einem Backfire auszugehen). Hierzu fehlt aktuell allerdings belastbares Zahlenmaterial.
- ▶ **Im Rahmen von Produktion und Logistik:** Die KI führt zu Effizienzgewinnen in Produktion und Logistik. Das bezieht sich – anders als bei rein digitalen Produkten – auf gefertigte Sachgüter. Die Effizienzgewinne führen unmittelbar zu einer Kostenreduktion für den Unternehmer und zu größeren Produktionskapazitäten. Die Auslastung der Produktion bleibt konstant und absolut kann mehr zu gleichen Kosten produziert werden, was entweder den Gewinn erhöht oder als Preisersparnis für Konsument*innen weitergegeben werden kann. Grundsätzlich ist es das Interesse des Unternehmens, langfristig möglichst viele Güter, Produkte und Dienstleistungen zu verkaufen. Ein günstiger Preis führt zu erhöhter Nachfrage, so dass die absoluten Zahlen gleichbleiben oder gar steigen. Konsument*innen (Endverbraucher*innen) möchten möglichst schnell und komfortabel ihre Produkte erhalten, während Industriekunden oder Zwischenhändler ebenfalls ihre Wartezeiten und Logistik optimieren möchten. Jedwede Effizienzsteigerung und Senkung der Produktionskosten führen zu einer potenziellen Mehreinnahme, die entweder investiert wird oder eben zu einer Preissenkung führt. In diesem Fall haben wir es in erster Linie mit einem klassischen Rebound-Effekt zu tun. Allerdings führt hier die Infrastruktur, das Trainieren und der Betrieb der künstlichen Intelligenz zu einer erheblichen zusätzlichen Ressourceninanspruchnahme, weshalb in der Gesamtbilanz von einem „Backfire“ auszugehen ist. Es entsteht allerdings ein Allokationsproblem: Welchem Anwender werden die Ressourceninanspruchnahme der KI zu geschrieben?
- ▶ **Im Rahmen von Produktion und Konsum:** Wie schon im vorhergehenden Abschnitt erläutert, führt die Effizienzsteigerung über den Preis zu einer Steigerung des Konsums (direkt/indirekt). Hinzu kommt jetzt noch die Nachfrage nach der KI selbst und damit einhergehend ein verändertes Nutzer- und Konsumentenverhalten. Eine Nachfragesteuerung über Preise und Aufklärung wird an Grenzen stoßen bzw. muss differenziert betrachtet werden: Für den Konsum von Verbrauchsgütern gelten die bekannten Maßnahmen eines klassischen Rebound-Effekts wie beispielsweise preisliche Maßnahmen, informatorische Instrumente oder staatliche Regulierung. Bei der Anwendung der KI ist allerdings die Marktmacht der Big Five und die potenzielle Oligopolisierung der KI-Anbieter zu berücksichtigen. KI-Entwicklung und Anwendung ist mittlerweile zu einem globalen strategischen Wettbewerbsfaktor geworden, so dass nationalstaatliche Regulierung und Eindämmung womöglich zu kurz greifen.

Übergreifend können folgende Maßnahmen in Frage kommen:

1. Technologische Ansätze

Forschung und Entwicklung zu ressourcenschonender KI-Hardware sollten gezielt gefördert werden. Verbindliche Standards für grüne Software und verpflichtende Update- und Reparaturservices können dazu beitragen, dass Systeme länger nutzbar bleiben. Bei öffentlich geförderten Projekten sollte mehr Transparenz durch Open-Source-Verpflichtungen geschaffen werden. So entsteht ein Innovationsklima, das die Lebensdauer digitaler Geräte erhöht und den Energieaufwand reduziert.

2. Beeinflussung des „Rucksacks“

Der ökologische Rucksack der KI-Technologie muss verkleinert werden, indem der Ressourcenaufwand für Hardware und Infrastruktur direkt gesenkt wird. **Rohstoff- und Ressourcensteuern für kritische Metalle oder verpflichtende Recycling-Quoten** können den Materialkreislauf schließen. Ein Recht auf Reparatur, längere Gewährleistungsfristen und Pfand- oder Rücknahmesysteme für ausgediente Geräte erhöhen die Lebensdauer und verringern den Elektronikschrott. Cap-&-Trade-Systeme für CO₂ oder nicht erneuerbare Rohstoffe können Anreize schaffen, besonders energieintensive KI-Verfahren zu optimieren.

3. Direkte Begrenzung

Regulierung und Beeinflussung der KI: Die direkte Regulierung von KI im Hinblick auf Umweltauswirkungen entwickelt sich international mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Der Entwurf des US-amerikanischen "Artificial Intelligence Environmental Impacts Act" von 2024 hätte dabei wichtige Maßstäbe setzen können, indem er die Environmental Protection Agency (EPA) mit einer umfassenden Studie zu den Umweltauswirkungen von KI beauftragen wollte (United States Congress 2024). Im Januar 2025 wurde der Entwurf ohne weitere Bearbeitung „aus den Büchern entfernt“ (original: "Legislation not passed by the end of a Congress is cleared from the books"). Das Gesetz sah ein Konsortium unter Leitung des National Institute of Standards and Technology (NIST) vor, das Methoden zur Messung und Berichterstattung von Umweltauswirkungen entwickelt. Ein besonderer Fokus lag auf einem freiwilligen Berichtssystem, das Energieverbrauch, Wassernutzung und elektronische Abfälle erfasst (Holistic AI). Angesichts veränderter politischer Prioritäten ist nicht damit zu rechnen, dass dieser Entwurf wieder behandelt oder gar verabschiedet wird. Die Europäische Union verfolgt mit dem AI-Act einen risikobasierten Ansatz, der KI-Systeme nach ihrem Gefährdungspotenzial kategorisiert. Für Hochrisiko-KI-Systeme werden verbindliche Standards zur Energieverbrauchsprotokollierung und Umweltfolgenabschätzung vorgeschrieben. Artikel 40 des AI-Acts fordert die Entwicklung harmonisierter Standards zur Verbesserung der Ressourceneffizienz, wobei die Freiwilligkeit mancher Standards kritisch gesehen wird (Europäisches Parlament 2023; Heinrich Böll Stiftung 2024). Auf globaler Ebene tragen Organisationen wie ISO und IEEE zur Standardisierung bei. Die von Frankreich initiierte "Coalition for Environmentally Sustainable AI" mit 91 Partnern, darunter UNDP und ITU, fördert die Integration von Umweltaspekten in die KI-Entwicklung. Technische Maßnahmen zur Umweltentlastung umfassen die Optimierung von Algorithmen durch Modellkomprimierung und Quantisierung, den Einsatz spezialisierter Hardware wie TPUs sowie fortschrittliche Kühlsysteme in Rechenzentren. Die Integration erneuerbarer Energien und standortoptimierte Rechenzentrumsplanung können die operativen Emissionen um bis zu 60% reduzieren. Energieeffizientes Scheduling und dynamische Spannungs- und Frequenzanpassung tragen zusätzlich zur Ressourcenschonung bei. Trotz dieser vielversprechenden Ansätze wird die mangelnde Berücksichtigung von Wasserverbrauch und Ressourcenextraktion in bestehenden Regulierungen kritisiert. Eine effektive Umweltregulierung von KI erfordert daher verstärkte

internationale Zusammenarbeit und verbindlichere Standards. Wobei genau die globale Verflechtung der Digitalisierung ein erhebliches Problem darstellt.

In diesem Zusammenhang betont auch der in diesem Jahr erscheinende Bericht von CODES (*CODES on Sustainable AI for the Planet*) die Notwendigkeit eines ganzheitlichen Verständnisses und klarer rechtlicher Rahmenbedingungen für eine nachhaltige KI-Governance. Der Bericht, der derzeit als Konzept vorliegt, unterstreicht insbesondere die Bedeutung von Transparenz über den gesamten Lebenszyklus von KI-Systemen – von der Entwicklung bis zur Anwendung – sowie von innovationsfördernden Strukturen, die ökologische und soziale Risiken gleichermaßen berücksichtigen.⁷

Durch das Ansetzen bei der KI direkt, werden allerdings nicht die Rebound-Effekte in Logistik und Produktion selbst verhindert.

4. Verteuerung von Produkten

Um dem finanziellen Anreiz zur Ausweitung der Produktion durch Effizienzgewinne entgegenzuwirken, sind Maßnahmen zur angemessenen **Bepreisung von Produkten** sinnvoll. Wenn ein Teil der durch KI generierten Einsparungen durch CO₂-Steuern oder Abgaben wieder „abgeschöpft“ wird, bleibt weniger Spielraum für Preissenkungen der Unternehmen. Dadurch sinkt der Anreiz für Unternehmen, allein über den Preis große Marktanteile zu gewinnen – was wiederum die Ausweitung der Produktion und damit den Umweltverbrauch begrenzen kann. CO₂-Steuern oder andere Abgaben auf energieintensive KI-Anwendungen schaffen Transparenz über die wahren Kosten. Es ist zu prüfen, inwieweit CO₂-Steuern und Emissionshandel parallel existieren können oder miteinander verschränkt werden müssten. Der Staat könnte die entstehenden Einnahmen in Förderprogramme für nachhaltigere Technologien reinvestieren.

5. Kritische Reflexion des Konsums

Eine wichtige Rolle spielt zudem die kritische Reflexion von KI-gestützten Angeboten. KI-Anwendungen erwecken oft den Eindruck, ressourcenschonend zu sein, was zu einem „guten Gewissen“ und letztlich zu Mehrkonsum führen kann. **Aufklärungskampagnen** über Rebound-Risiken, verpflichtende Angaben zum Energie- und Ressourcenverbrauch sowie Nachhaltigkeitslabel können dazu beitragen, die tatsächlichen Umweltkosten transparent zu machen. In Unternehmen könnten Workshops angeboten werden, die über die Zusammenhänge von digitaler Effizienz und steigender Nachfrage informieren.

6. Beeinflussung der Qualität des Konsums

Schließlich sollten Maßnahmen auf die Beeinflussung der **Qualität des Konsums** zielen, der trotz Effizienzsteigerung stattfindet. Differenzierte Steuern auf Produkte könnten ressourcenintensive Endgeräte oder KI-Angebote höher besteuern als umweltfreundliche Alternativen. Transparenzvorgaben wie digitale Produktpässe würden Verbraucher*innen Auskunft über Lieferketten, Energieaufwand und Reparierbarkeit geben. Steuervorteile für Sharing-Modelle, die eine gemeinsame Nutzung von Rechenkapazitäten oder KI-Robotik fördern, könnten den Bedarf an neu produzierter Hardware reduzieren.

3.3.3 Fall 3: Zukunftstechnologie Metaverse

Hierzu befinden sich folgende Fact Sheets im Anhang: Fact Sheet A.2.9 Metaverse und Fact Sheet A.3.6 Augmented/Virtual Reality.

Das Metaverse wird als nächste zukünftige Evolutionsstufe des Internets beschrieben. Es handelt sich um einen digitalen dreidimensionalen Raum, der durch das Zusammenspiel

⁷ Die Veröffentlichung des Berichts ist für 2025 auf der Plattform codes.global vorgesehen.

virtueller, erweiterter und physischer Realität entsteht. Der Name Metaverse geht im Wesentlichen auf den Software- und IT-Konzern „Meta“ und dessen Gründer Mark Zuckerberg zurück.

Das Metaverse selbst ist keine Technologie, sondern entsteht durch die Zusammenführung und gemeinsame Anwendung von bereits vorhandenen Technologien. Die Kombination von Augmented (AR) and Virtual Reality (VR), Edgecomputing, Künstlicher Intelligenz, Blockchain Technologie sowie niedriglatenter Netzwerke (z. B. 5G/6G) stellt die technologische Grundlage und Voraussetzung dar, um virtuelle Welten zu schaffen (Peters et al. 2022; Klose & Kreutzer 2023).

Bemerkenswert sind neuere Entwicklungen im Jahr 2024, die sich mit folgendem Zitat zusammenfassen lassen: „The Metaverse hype is dead, now we can put our heads down to build“ (Robison 2023). Einerseits blieben bislang die Entwicklungen hinter möglichen Erwartungen zurück, gleichzeitig nimmt die verfügbare Hardware zu und die neuesten Entwicklungen im Bereich der KI spielen eine stark beschleunigende Rolle in der Weiterentwicklung.

Mögliche Umwelteffekte (Belastung/Entlastung/Rebound-Effekte) durch das Metaverse

Eine Reihe an aktuellen Studien gehen auf Umwelteffekte durch Metaverse ein (Esposito et al. 2023; Vlăduțescu & Stănescu 2023; Nleya & Velepini 2024).

Als Umweltbelastungseffekte werden genannt:

- ▶ **Energieverbrauch:** Ein zentraler Aspekt der Umweltauswirkungen des Metaversums ist der erhebliche Energieverbrauch. Die hochgradig datenintensive Umgebung des Metaversums erfordert eine beträchtliche Menge an Energie für den Betrieb von Servern, Rechenzentren und Netzwerkinfrastrukturen. Darüber hinaus tragen Geräte wie VR/AR-Headsets, leistungsstarke Grafikkarten und andere Peripheriegeräte während ihrer Produktion, Nutzung und Entsorgung zum Energieverbrauch bei. Besonders hervorzuheben ist der Energiebedarf von Blockchain-Technologien, die im Metaversum für NFTs (Non-Fungible Tokens) und Kryptowährungen eingesetzt werden.
- ▶ **Elektronikschrott (E-Waste):** Die rasche Obsoleszenz von Metaversum-Hardware stellt eine weitere bedeutende Umweltbelastung dar. VR-Headsets, Grafikkarten und andere spezialisierte Geräte tragen zum wachsenden Problem des Elektronikschrotts (E-Waste) bei. E-Waste enthält gefährliche Materialien, wie beispielsweise Schwermetalle, PCBs, PFAS, PAHs, PCDD/Fs und PBDEs, die Luft, Boden und Wasser verschmutzen können und somit Umwelt- und Gesundheitsrisiken darstellen (Abdullah et al. 2024; Ghulam & Abushammala 2023). Das globale E-Waste-Problem wird durch unzureichende Recycling-Infrastrukturen verschärft, insbesondere in Entwicklungsländern, wo ein Großteil des Abfalls illegal entsorgt wird (Lema 2024). Neves et al. (2024) kommen sogar zu dem Schluss, dass die Regulierungen zu E-Waste in der EU ineffektiv sind und zu mehr Exporten führen. Das ineffektive Recycling führt zu einem Verlust von wertvollen Materialien wie Gold, Silber, Kupfer und seltene Erden (Lio et al. 2023).
- ▶ **Kritische Rohstoffe:** Die Produktion von Metaversum-Hardware ist stark abhängig von seltenen Erden und Konfliktmineralien. Der Abbau dieser Materialien führt zu erheblicher Umweltzerstörung, einschließlich Entwaldung, Bodenerosion und Verschmutzung.

Als Umweltentlastungseffekte werden genannt:

- ▶ **Reduzierung physischer Reisen:** Ein signifikanter potenzieller Vorteil des Metaversums ist die Reduzierung der Notwendigkeit physischer Reisen. Virtuelle Arbeitsplätze,

Veranstaltungen und soziale Zusammenkünfte können persönliche Aktivitäten ersetzen und somit potenziell die globalen CO₂-Emissionen aus dem Transportsektor senken.

- ▶ **Förderung nachhaltigen Verhaltens:** Das Metaversum bietet Möglichkeiten zur Förderung von Nachhaltigkeit durch virtuellen Konsum. Beispiele hierfür sind virtuelle Mode und digitale Güter, die die Produktion und den Abfall physischer Gegenstände reduzieren können. Darüber hinaus können immersive Erfahrungen im Metaversum Nutzer*innen über den Klimawandel aufklären und umweltfreundliches Verhalten wie Recycling und Energieeinsparung fördern.
- ▶ **Digitale Zwillinge für Energieeffizienz:** Die Technologie der digitalen Zwillinge, virtuelle Replikat physischer Objekte oder Systeme, kann zur Optimierung des Energieverbrauchs in realen Anwendungen beitragen. Beispielsweise können Architekten digitale Zwillinge nutzen, um energieeffiziente Gebäudedesigns zu testen. Städte wie Shanghai und Singapur entwickeln bereits digitale Zwillinge zur Überwachung und Reduzierung des Energieverbrauchs.

Bewertung der möglichen Rebound-Effekte und Ansatzpunkte für Maßnahmen

In der Betrachtung der Umwelteffekte werden im Bereich Metaverse eher geringere Entlastungseffekte genannt. Die Reduktion physischer Reisen und beispielsweise die Anwendung der digitalen Zwillinge kann den Druck auf Ökosysteme reduzieren. Dies müsste aber konsequent mit Rückbau von Infrastruktur oder auch der bewussten Schaffung von Naturräumen einhergehen.

Es ist an dieser Stelle sehr spekulativ derartige Effekte einschätzen zu wollen. Es kommen dann allerdings aus Sicht der Autor*innen psychische und ethische Fragen mit ins Spiel, wie beispielsweise: Wem gehört der virtuelle Raum? Wie ist der Zugang organisiert? Wer haftet für etwaige Schäden? Welche gesundheitlichen Auswirkungen müssen bedacht werden? Wie geht man mit Kriminalität um? Was ist mit Persönlichkeitsrechten und Privatheit? Was bedeutet es für die Gesellschaft, wenn Menschen sich mit Avataren ausleben? (Cockerton et al. 2024; Alkairy & Omar 2024).

Zu erwartende Rebound-Effekte könnten sein:

- ▶ **Energieverbrauch und Effizienzparadoxon:** Während das Metaversum das Potenzial hat, physische Reisen und damit verbundene Kohlenstoffemissionen zu reduzieren, könnte der Energiebedarf des Metaversums selbst diese Vorteile aufheben. Dies ist wieder die klassische Form eines Rebound-Effektes, bei dem die möglichen Energieeinsparungen, durch den erhöhten Energie- und Rohstoffverbrauch der digitalen Infrastruktur wie Rechenzentren, Leitungen, Edge-Computing und VR/AR-Geräte wieder aufgehoben werden.
- ▶ **E-Waste und Hardware-Obsoleszenz:** Das schnelle Veralten von Metaverse-bezogener Hardware könnte zu erhöhtem E-Waste führen, selbst wenn das Metaversum die Dematerialisierung fördert (z. B. virtuelle Güter, die physische Güter ersetzen). Dies schafft einen Rebound-Effekt, bei dem die Umweltvorteile des reduzierten physischen Konsums durch die Umweltkosten der Herstellung, Entsorgung und des Recyclings elektronischer Geräte untergraben werden.
- ▶ **Soziale und Verhaltensrebound-Effekte:** Dieser Bereich ist schwer zu erfassen je nach Anwendungsfall und bleibt rein spekulativ: Wenn ein Mensch statt auf dem Sofa liegend in einem E-Book blätternd, sich in eine virtuelle immersive Erlebniswelt begibt, hätten wir eine Verschiebung des Konsums, die insgesamt zu einer absoluten Zunahme der Energieinanspruchnahme und Umweltbelastung führt. Ähnliches gilt für den Menschen im

Home-Office, der statt am Computer sitzend ebenso im virtuellen Sitzungsraum an den Meetings teilnimmt. Sollte ein Unternehmen sowohl Büroräume als auch virtuelle immersive Räume zusätzlich zu den „normalen“ Videokonferenzen anbieten ist von einer absoluten Zunahme auszugehen. Blicke die Frage, ob dann beispielsweise eine Urlaubsreise durch die virtuelle Welt ersetzt würde. Insgesamt scheint es eher so, dass das Metaverse eine zusätzliche Installation wäre, und der Druck auf die Umwelt eher nicht abnehmen würde. Eher würden „einfache“ Videosysteme durch komplexere immersive Systeme abgelöst oder im Falle der Freizeitgestaltung ähnlich wie ein Sauna-Besuch eine virtuelle, immersive Wellness-Welt zusätzlich besucht.

Zwischenfazit zu den Maßnahmen und Instrumenten im Bereich der Zukunftstechnologie Metaverse

Das Metaverse eröffnet neue Formen von Interaktion, Konsum und Wertschöpfung und kann – zumindest in Teilbereichen – physische Reisen oder Produktionsprozesse ersetzen. Allerdings besteht ein hohes Risiko, dass durch steigenden digitalen Komfort und wachsende Hardwareanforderungen Einsparpotenziale rasch von Mehrverbrauch überholt werden. Ein Mix aus technischer Innovation, Preispolitik, direkter Begrenzung und Konsumlenkung ist nötig, um Rebound-Effekte im Metaverse zu minimieren. Nur durch konsequente Einbindung aller Beteiligten – von Anbietern über Politik bis hin zu Nutzer*innen – lässt sich die Vision einer nachhaltig betriebenen virtuellen Welt realisieren.

1. Technologieentwicklung

Das Metaverse ist insgesamt sehr „Hardware“-intensiv, sowohl auf Nutzerseite als auch auf Seiten der Anbieter. Insgesamt kann und muss der Fokus auf die Entwicklung besonders energie- und ressourceneffizienter Hard- und Software gelegt werden. Beispielsweise könnten Förderprogramme die Forschung an VR/AR-Headsets mit geringeren Strombedarfen oder an umweltschonenden Grafikkarten beschleunigen. Zugleich ist es sinnvoll, hohe Standards für reparier- und updatefähige Geräte zu setzen, damit die Innovation nicht zu immer kürzeren Produktzyklen führt.

2. Beeinflussung des „Rucksacks“

Wie bei anderen Digitaltechnologien ist auch im Metaverse der sogenannte Rucksack – also der materielle und energetische Fußabdruck der Infrastruktur – zu minimieren. Das betrifft die Infrastruktur im gleichen Maße, wie die Endgeräte. Höhere Recyclingquoten für Elektronik, Pfandsysteme für VR-Brillen sowie Obergrenzen für die CO₂-Intensität bei gleichzeitiger Erhöhung der Energieeffizienz von Rechenzentren und Reduzierung weiterer Umweltbelastungen, wie Wasserverbrauch und klimaschädlicher Kältemittel können hier ansetzen. Eine Pflicht zur Wiederverwendung kritischer Metalle (z. B. Seltene Erden) könnte zusätzliche Anreize schaffen, Geräte langlebiger zu gestalten, da die Entsorgung und das adäquate Recycling einen erheblichen Mehraufwand bedeuten. So würde es ökonomisch interessanter, die Geräte länger zu betreiben oder mindestens so zu designen, dass Komponenten ausgetauscht werden können und das Recycling vereinfacht wird. In dieser Form würde die Produktion neuer Hardware gedrosselt. Die Wiederverwertung oder Weiternutzung älterer Technik würde so den Rohstoffverbrauch geringer halten.

Der Materialrucksack digitaler Technologien könnte durch verschiedene rechtliche Instrumente effektiv reduziert werden. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Erweiterte Herstellerverantwortung (EPR), die Produzenten für den gesamten Lebenszyklus ihrer Produkte verantwortlich macht. In China wurden entsprechende Richtlinien entwickelt, die als Vorbild dienen können, wobei die Collection Target Responsibility (CTR) klare Sammelziele definiert und verschiedene Akteure in die Pflicht nimmt (Yin et al. 2023).

Eine weitere wichtige Rolle kann die Ökodesign-Richtlinie, die bereits in der Entwicklungsphase die Materialeffizienz, Reparierbarkeit und Recyclingfähigkeit digitaler Geräte vorschreibt, spielen. Produktpässe könnten die Transparenz bezüglich enthaltener Rohstoffe erhöhen und die Kreislaufwirtschaft fördern. Die steuerliche Begünstigung ressourcenschonender Technologien könnte zusätzliche Anreize schaffen. Hierbei ist die globale Verflechtung allerdings eine Herausforderung, da der E-Waste-Handel global stattfindet. Der Strategische Ansatz zum Internationalen Chemikalienmanagement (SAICM) bietet hier ein politisches Rahmenwerk. Nationale Rücknahmesysteme mit Pfand für elektronische Geräte könnten die Sammelquoten deutlich erhöhen (Ghosh et al. 2022; Goyal & Gupta 2024).

Insgesamt ist bei Recycling aber zwischen Produktion, Nutzung und Verwertung am Ende der Nutzungsphase abzuwägen, um über den gesamten Lebenszyklus der Geräte, ein Optimum des Ressourcenverbrauchs herzustellen. Hier tut sich gleichzeitig ein Dilemma auf (siehe auch Kapitel 3.4), indem Hochtechnologie auf ultra-reine Grundstoffe angewiesen ist, so dass die Qualitätsstandards an das Recycling sehr hoch sein müssen, um gerade im Bereich der Halbleiter die Nutzung von recyceltem Material überhaupt zu ermöglichen. Daraus folgt, dass zur Beeinflussung des Rucksacks in diesem Technologiebereich, intensiv im Bereich der Recycling- und Materialwirtschaft geforscht werden muss.

3. Direkte Begrenzung

Obwohl das Metaverse vielfältige Anwendungen ermöglicht, könnte es denkbar sein, besonders energiehungrige Nutzungsformen zu regulieren. Hierzu könnten Kontingente oder Nutzungsobergrenzen für rechenintensive Blockchain-Prozesse (wie NFTs) oder hoch immersive 3D-Welten eingeführt werden. Beispielsweise wird diskutiert statt des PoW (Proof of Work) Konsensmechanismus, der sehr rechenintensiv ist, nur den PoS (Proof of Stake) zu nutzen.

Die potenzielle Wirksamkeit der Maßnahme ist logisch begründet, wird aber von den Protagonisten kontrovers gesehen. Dennoch lässt sich so verhindern, dass das Metaverse beliebig expandiert und Einsparpotenziale durch extremen Mehrverbrauch überholt werden. Hier sind eine Güterabwägung und politische Prioritätensetzung erforderlich. Das Instrument der Technikfolgenabschätzung kann hier helfen, die Debatte faktenbasiert und sachlich zu führen.

4. Verteuerung von Produkten

Um zu vermeiden, dass Effizienzgewinne zu einem Preisverfall und damit zu zusätzlichem Konsum führen, kann über Preispolitik gesteuert werden. Denkbar sind CO₂-Preise oder Ökosteuern auf energieintensive Metaverse-Anwendungen. Wer z. B. energieintensive VR-Meetings anbietet oder zusätzlich Blockchain-Transaktionen integriert, zahlt einen Aufschlag. Die dadurch erzielten Einnahmen könnten in nachhaltige Infrastrukturprojekte oder in die Erforschung ressourcenschonender Technologien reinvestiert werden. Alternativ kann die Wahl des Konsensmechanismus regulativ festgelegt werden.

Auch hier ist kritisch anzumerken, dass eine derartige Steuerung des Konsums zu starken sozialen Ungerechtigkeiten führen kann und somit eine „digitale“ Spaltung der Gesellschaft fördert. Wirtschaftlich starke Teile der Bevölkerung könnten sich die Technologie leisten und etwaige Vorteile weiterhin nutzen, während andere Teile der Bevölkerung keinen Zugang hätten, somit z. B. auch nicht den Zugang zu immersiven Bildungsangeboten.

5. Kritische Reflexion des Konsums

Gerade weil das Metaverse spielerische und hochattraktive Umgebungen schafft, ist es wichtig, Verbraucher*innen für die Schattenseiten zu sensibilisieren. Informationskampagnen oder

digitale „Öko-Labels“ könnten die tatsächlichen Energie- und Ressourcenverbräuche virtueller Welten transparent machen. Ähnlich wie bei Streaming-Diensten ist auch im Metaverse ein „unbemerkt“ Dauernutzen möglich, das den Gesamtverbrauch hochtreibt. Auch wenn aktuell die 3D-Brillen kaum länger getragen werden können, ist in der Zukunft mit leichteren Wearables (Brillen) oder Weiterentwicklungen in der Bildschirmtechnologie oder gar mit Brain-Computer-Interfaces zu rechnen. Um dieses Verhalten zu beeinflussen, könnten etwa VR-Plattformen Hinweise zum Stromverbrauch anzeigen oder Limits für extreme Dauernutzung vorschlagen. Diese Aussagen sind allerdings hoch spekulativ, da aktuell keinerlei Aussagen über die künftigen Energieverbräuche möglich sind.

6. Beeinflussung der Qualität des Konsums

Schließlich sollte das Metaverse nicht bloß verteuert, sondern qualitativ in nachhaltigere Bahnen gelenkt werden. Ein Ansatz wäre die bevorzugte Kennzeichnung weniger ressourcenintensiver Plattformen und Geräte: Beispielsweise erhalten energieeffiziente VR-Headsets ein Nachhaltigkeitsiegel, was zu einer bewussteren Kaufentscheidung beiträgt. Ähnliche Steuerungsmechanismen wären möglich, wenn Blockchain-basierte Dienste nachweislich einen geringen CO₂-Fußabdruck aufweisen (PoS als Konsensverfahren im Gegensatz zu PoW). So entsteht ein Markt für „grüne Metaverse-Angebote“, in dem nachhaltig agierende Anbieter Wettbewerbsvorteile haben. Effizienzgewinne, beispielsweise durch vermiedene Reisen sollten möglichst vielen Menschen zugänglich gemacht werden (siehe auch Punkt 4). Aber auch hier ist schwer einzuschätzen, welche Geräte und Technologien künftig vorhanden sein werden. Die hier erwähnten Maßnahmen beziehen sich stark auf den aktuellen Stand der Umsetzung.

3.4 Reflexion zu den Maßnahmen und Instrumenten

Viele der möglichen Maßnahmen sind wenig spezifisch nur auf die Digitalisierung zu beziehen und entsprechen daher den „klassischen“ Ansätzen. Die zuvor dargestellten systemischen Analysen verdeutlichen, dass weder einzelne Technologien noch isolierte Politikmaßnahmen ausreichen, um die komplexen Rebound-Effekte der Digitalisierung nachhaltig in den Griff zu bekommen. Eine strategische, mehrdimensionale Steuerung ist notwendig, die verschiedene Ebenen – von Nischeninnovationen bis zu global wirksamen Regimen – einbezieht (Santarius 2012; Guzzo et al. 2023).

Insbesondere rein effizienzbasierte Strategien laufen Gefahr, durch Kostenvorteile indirekten Mehrkonsum auszulösen. Auch Caps sind in einer globalisierten Wirtschaft oft schwierig umzusetzen, weil sie internationale Koordinierung erfordern. Informationskampagnen und Labels sind zwar wichtig, reichen jedoch ohne flankierende ökonomische oder regulatorische Eingriffe selten aus.

Zudem würde ein einseitiger Fokus auf technische Lösungen (z. B. Energieeffizienzvorgaben) gesellschaftliche Faktoren außer Acht lassen: etwa Konsummotive, Komfortgewinne oder Zeit-Rebound-Effekte durch vereinfachte digitale Anwendungen. Damit greifen rein technokratische Instrumente zu kurz. Rebound-mindernde Maßnahmen sollten also stets wirtschaftliche, psychologische und soziale Aspekte integrieren und sich teils auf umfassende Suffizienzstrategien stützen.

Aus einer systemischen Sicht wirkt die Digitalisierung als Treiber für Effizienzverbesserungen, Kostensenkungen und Komfortgewinne. Diese positiven Effekte laufen jedoch Gefahr, über Rebound-Effekte (beispielsweise höheren Konsum oder neue Geschäftsmodelle) kompensiert zu werden. Die Multi-Level-Perspektive (MLP) (Geels 2018) empfiehlt, diese Dynamiken auf drei Ebenen zu betrachten:

- ▶ **Nischen** (z. B. Start-ups, Pilotprojekte oder Suffizienzinitiativen): Hier entstehen oft erste Lösungen, die auf eine Verringerung des Ressourcenverbrauchs abzielen, beispielsweise besonders energieeffiziente Software oder Apps zur gemeinsamen Nutzung digitaler Services (Sharing-Modelle). Diese Nischen brauchen gezielte Förderung, um ihre Potenziale zu entfalten.
- ▶ **Regime** (etablierte Marktstrukturen und Praktiken): Auf dieser Ebene findet der Großteil der wirtschaftlichen Aktivitäten statt, wobei Unternehmen und Konsument*innen die Effizienzgewinne meist in höhere Produktions- und Konsummengen umwandeln. Effizienzgewinne erzielen kurzfristig zwar Ressourceneinsparungen, werden aber häufig direkt in Mehrverbrauch reinvestiert. Effizienzreize sollten daher durch Preispolitik oder Lenkungsinstrumente ergänzt werden, damit sie nicht zu zusätzlichem Konsum führen.
- ▶ **Landschaft** (makroökonomische, kulturelle und globale Entwicklungen): Aspekte wie globaler Wettbewerb, kulturelle Konsumnormen, geopolitische Krisen oder technologische Megatrends (z. B. weltweite Verbreitung neuer KI-Generationen) beeinflussen, in welchem Maß politische Instrumente überhaupt durchsetzbar sind.

Zugleich macht die Transformationsforschung auf die Bedeutung eines Rückbaus nicht nachhaltiger Praktiken aufmerksam (X-Curve)⁸. Einseitig technische Verbesserungen – wie

⁸ Der X-Curve-Ansatz erweitert die Perspektive, indem er sowohl den Aufbau neuer Systeme als auch den Abbau alter Systeme betont (Loorbach et al. 2017). Die zwei Kurven repräsentieren den Aufstieg von Innovationen und den Niedergang bestehender Strukturen. Dieser Ansatz ermöglicht ein Verständnis der dynamischen und oft chaotischen Prozesse während Übergängen. In der Nachhaltigkeitspolitik kann der X-Curve-Ansatz dazu beitragen, sowohl fördernde Maßnahmen für nachhaltige Innovationen als

hocheffiziente Logistik- oder Produktionsverfahren – verlieren an Wirkung, wenn parallel weiterhin ressourcenintensive Alternativen existieren und gefördert werden. Beispielsweise kann ein Rückbau klimaschädlicher Subventionen nötig sein, um einen echten Anreiz für suffizientes Wirtschaften zu schaffen.

Am Beispiel des Metaverse zeigt sich, dass Zukunftstechnologien oft nicht nahtlos in bestehende Regulierungs- oder Förderinstrumente passen. Sie befinden sich meist in einer Zwischenphase, in der ihr Reifegrad, Marktpotenzial und gesellschaftlicher Nutzen noch nicht klar bestimmt sind (Nleya & Velepini 2024). Gleichzeitig bergen sie das Risiko enormer Rebound-Effekte: Hohe Energie- und Hardwareanforderungen können potenzielle Einsparungen (z. B. wegfallende Fahrten ins Büro) schnell überkompensieren. Ähnlich verhält es sich bei Quantencomputing oder neuartigen Blockchain-Anwendungen. Solange politische Akteure nicht wissen, ob solche Technologien tatsächlich substitutiv (d. h. physische Vorgänge ersetzen) oder eher additiv (also zusätzlicher Ressourcennutzer) sind, bleibt ihre Regulierung schwierig. Daher ist eine vorausschauende, experimentelle Regulierung (Anticipatory Governance) sinnvoll, die frühzeitig ökologische und soziale Leitplanken einzieht, bevor sich bestimmte Pfade verfestigen.

Die Betrachtung der verschiedenen Perspektiven durch die aufgezeigten Dynamiken (Unternehmen, Konsum, Technologien, Suffizienz) macht allerdings deutlich, dass gerade hier sehr unterschiedliche Zielsysteme und Interessen aufeinandertreffen. Beispielsweise gibt es weder aus Konsum- noch aus Unternehmens- noch aus Technologiesicht ein Interesse, hohen Datenverbrauch durch Streaming in hoher Qualität zu unterbinden. Das Durchsetzen solcher Maßnahmen würde also auf allen Ebenen erheblichen Widerstand erzeugen. Aus dieser Erkenntnis heraus ist es ratsam für den Staat, die Infrastruktur und die Energie möglichst effizient, reparier- und wartungsfähig und klimaschonend zu gestalten. Das betrifft dann auch die Endgeräte, für die die Führung im Kreislauf und ein hoher Effizienzstandard notwendig sind, um effektiv zu einer Entlastung zu kommen.

Ein weitgehendes Verhindern von Rebound-Effekten erfordert in vielen Fällen Eingriffe in die Märkte, die weit über reine Effizienzmaßnahmen hinausgehen – zum Beispiel die Verteuerung von Material- und Energieverbrauch oder gewisse Verbrauchsobergrenzen (Caps). In einer globalisierten Marktwirtschaft sind solche direkten Eingriffe politisch oft schwierig durchzusetzen, da Akteure verlieren würden (z. B. Marktanteile, Gewinne, Konsumfreiheit). Und das würde gleichzeitig zu Einbußen in der Volkswirtschaft führen. Dennoch lassen sich indirekte Instrumente nutzen, um Rebound-Effekte abzufedern oder in eine nachhaltige Richtung zu lenken:

- ▶ **Suffizienz orientierte Aufklärung und Nudging:** Anreize für Konsument*innen, digitale Dienste bewusster zu nutzen, ggf. in Kombination mit Informationskampagnen über Ressourcenverbräuche.
- ▶ **Qualitative Lenkung:** Verschiedene Steuersätze je nach ökologischer Bilanz digitaler Produkte. So werden Effizienzgewinne nicht automatisch in noch mehr Konsum gelenkt, sondern unterstützen eine Umgestaltung hin zu nachhaltigen Anwendungen.
- ▶ **Förderung von Kreislaufwirtschaft:** Reparierbarkeit, Langlebigkeit und standardisierte Schnittstellen bei Hardware verringern die Notwendigkeit ständig neuer Geräte.

auch Strategien für den gezielten Abbau nicht nachhaltiger Praktiken zu entwickeln. Insbesondere die Berücksichtigung des gezielten „Rückbaus“ von hinderlichen Praktiken wird oft zu wenig berücksichtigt (Hebinck et al. 2022).

- ▶ **Verbindliche Transparenzstandards:** Motivation zu stärkerer Selbstregulierung, wenn Unternehmen den wahren Energie- und Ressourcenverbrauch offenlegen müssen (z. B. Produktpässe).

Werden diese Bausteine in Kombination eingesetzt, ist es zumindest teilweise möglich, Rebound-Effekte abzumildern und Effizienzgewinne im Sinne einer nachhaltigeren Gesamtentwicklung zu nutzen – auch ohne eine völlige Regulierung des Marktes. Allerdings bedarf es einer klaren Akzeptanzstrategie (Santarius 2016), damit Verbraucher*innen, Unternehmen sowie Institutionen bereit sind, an kollektiven Lösungen mitzuwirken.

Der Fokus auf innovative, effiziente und umweltschonende Bausteine der Digitalisierung kann vor dem Hintergrund begrenzter Ressourcen und einem steigenden Risiko von „Nicht-Handeln“ zu einem Wettbewerbsfaktor in einer globalen Ökonomie werden. Das setzt gleichzeitig den Fokus auf hohe Qualität, und zu einem gewissen Grad auch den freiwilligen Verzicht (Suffizienz) voraus.

4 Resümee: Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Digitalisierung als Bereich der technisch-wirtschaftlichen Entwicklung ist für die Untersuchung von Rebound-Effekten prädestiniert. Denn Fortschritte im Bereich der digitalen Technologien sorgen seit Jahrzehnten regelmäßig für Effizienzgewinne, die in anderen Bereichen kaum vorstellbar wären. Und ebenso regelmäßig wird der durch die Effizienz vermeidbare Bedarf an Inputfaktoren durch ein höheres Aktivitätsniveau kompensiert oder überkompensiert, so dass in der Regel keine Verringerung der Beanspruchung von Energie und natürlichen Ressourcen festzustellen ist. Im Gegenteil, die Umweltbelastung durch Digitalisierung nimmt insgesamt weiter zu.

Der Effizienzfortschritt kann dabei verschiedene Inputfaktoren betreffen: Digital erbrachte oder digital unterstützte Leistungen können mit weniger Material, Energie, Zeit- und Arbeitsaufwand und damit zu geringeren Kosten produziert, bereitgestellt und auch konsumiert werden. Zudem nehmen Vielfalt und Individualisierbarkeit der Angebote zu: Dank Digitalisierung werden immer neue Sachgüter und Dienstleistungen, die präziser auf individuelle Präferenzen zugeschnitten sind, immer komfortabler erreichbar.

Effizienzfortschritt ist der eigentliche Wachstumsmotor der digitalen Wirtschaft. Und fast immer nimmt mit der Effizienz in isolierter Betrachtung die spezifische Umweltbelastung ab, mit der eine bestimmte Leistung erstellt werden kann. Ohne Rebound-Mechanismen gäbe es aus ökologischer Sicht also kein Problem, aber möglicherweise auch wenig Wachstum.

Es ist hier deshalb sehr schwierig, zwischen wirtschaftlichem Wachstum dank technischem Fortschritt und Rebound-Effekten zu unterscheiden. Rebound-Effekte sind in der Digitalisierung so allgegenwärtig, dass das Thema Rebound auf eine kritische Auseinandersetzung mit Fragen des Wachstums hinausläuft. Mit „kritisch“ ist hier eine Auseinandersetzung gemeint, die durch den technischen Fortschritt bewirktes Wachstum hinsichtlich seiner externen Effekte auf die Umwelt differenziert: Wenn durch technischen Fortschritt ermöglichtes Wachstum als politischer Imperativ vorausgesetzt wird, dann soll wenigstens jenes Wachstum gefördert werden, das für die geringsten gesellschaftlichen und ökologischen Kosten zu „bekommen“ ist, und auf der anderen Seite jenes Wachstum mit wirksamen Leitplanken versehen werden, das zu hohen Zuwächsen an externen Kosten zu führen droht.

Für eine in diesem Sinne differenzierte Betrachtung hat die vorliegende Studie Grundlagen geschaffen. Der vielleicht wichtigste Schlüssel zur systemischen Bewertung der Konsequenzen von Effizienzfortschritten ist die Betrachtung von Substitutionseffekten, die im Rahmen der Studie immer wieder hervortreten: Wie wird durch digitale Effizienz eingespartes Geld ausgegeben, oder: Wie wandelt sich der „Warenkorb“ der Privathaushalte mit zunehmender Digitalisierung? Für welche Aktivitäten wird gesparte Zeit eingesetzt und von welchen Aktivitäten wird Zeit „abgezogen“, um sie in der digitalen Welt zu verwenden, oder: Wie wandelt sich der Tagesablauf der Menschen? Werden neue digitale Angebote substitutiv oder additiv genutzt? Was bremst die Entfaltung jener Substitutionseffekte, die aus Sicht von Umwelt und Ressourcen erwünscht sind, wo liegen die Hindernisse wie z.B. schädliche Subventionen? Welche Verlagerungseffekte für Umweltbelastungen und Ressourcenbeanspruchung sind als Folge der Substitutionen zu erwarten?

Ein Fokus auf mögliche und zu erwartende Substitutionen ist ein guter Weg, etwas von der Essenz des systemdynamischen Ansatzes dieser Studie in weitere Szenarien und Schritte der Entscheidungsfindung zu übernehmen, ohne dass die Modelle im Detail eingesetzt werden müssen.

Eine zweite durchgängige Erkenntnis aus der Studie betrifft die Ansatzpunkte für Maßnahmen, die Rebound-Effekte verringern sollen. Weil die Auswirkungen der verschiedenen Formen der durch Digitalisierung induzierten Effizienz kausal stark verwoben sind, ist eine differenzierte Beeinflussung dieser Auswirkungen aufgrund der Systemdynamik grundsätzlich nicht punktuell möglich. Um erfolgreich zu sein, müssen strategische Maßnahmen gegen unerwünschte Auswirkungen auf mehreren Seiten gleichzeitig ansetzen. Insbesondere sind hier Technik, Geschäftsmodelle und Konsumkultur zu nennen, die in enger Wechselwirkung stehen. Drei Beispiele sollen dies verdeutlichen:

- ▶ **Langlebige Endgeräte:** Maßnahmen mit dem Ziel, die Umwelt- und Ressourcenbeanspruchung durch Endgeräte zu verringern, müssen vor allem deren tatsächliche Lebensdauer verlängern. Dies bedeutet auf der technischen Seite beispielsweise, die Reparierbarkeit der Geräte zu verbessern, offene Schnittstellen zu favorisieren und Abwärtskompatibilität der Software auszudehnen, damit keine vorzeitige Obsoleszenz eintritt. Wenn dies aber dem Geschäftsmodell des Herstellers widerspricht, wird er solchen Forderungen allenfalls so weit nachkommen, wie dies sein Geschäftsmodell nicht tatsächlich in Frage stellt. Auf Konsumseite muss außerdem ein Kulturwandel eintreten, der die durch die Werbung propagierte „Fast Fashion“-Kultur durch ein Bewusstsein für Suffizienz ablöst. Dies ist auch für die Nutzung von Secondhand-Märkten wichtig, damit diese nicht zu einer Beschleunigung, sondern tatsächlich zu einer Reduktion des Konsums führen.
- ▶ **Infrastrukturen und Flatrates:** Eine maximale Effizienz von Infrastrukturen und Online-Diensten ist aus ökologischer Sicht zu begrüßen. Der eintretende Rebound ist aber davon abhängig, mit welchem Preismodell die Leistungen angeboten werden. Eine Abrechnung nach Nutzung führt zu einem geringeren Rebound-Effekt als ein Flatrate-Modell, das zum Konsum anspornt und für das außerdem hohe Kapazitäten vorgehalten werden müssen. Diesen „Flatrate Rebound“ zu vermeiden, setzt jedoch eine Möglichkeit voraus, die Geschäftsmodelle der Anbieter und die Konsumkultur zu beeinflussen. Man bedenke, dass mit den Anfängen des Internets die Hoffnung verbunden war, zukünftig in vielen Bereichen zu Pay-per-use-Modellen überzugehen, wo dies vorher technisch zu aufwendig war. Heute werden Online-Aktivitäten zwar mit dem Detaillierungsgrad von Klicks protokolliert, aber dies wird selten für eine verursachungsgerechte Abrechnung genutzt, sondern meist (mit erheblichem zusätzlichem Rechenaufwand) für die Personalisierung der Werbung. Die Flatrate-Kultur hat sich paradoxerweise also gerade dort etabliert, wo eine detaillierte Abrechnung technisch mit den geringsten Transaktionskosten realisierbar ist. Von verursachungsgerechten Preisen würden (unter der Annahme vernachlässigbarer Transaktionskosten) grundsätzlich alle wirtschaftlichen Akteure und die Umwelt profitieren, weil kein nutzloser Konsum stattfindet und die vorgehaltenen Kapazitäten besser dem tatsächlichen Bedarf folgen könnten. Kostenlose Leistungen können als Spezialfall einer Flatrate zum Preis von Null betrachtet werden.
- ▶ **Videostreaming und Autoplay:** Das technisch immer effizientere Streaming von Videos hat zu einer Zunahme des Videokonsums geführt. Neben höherer Auflösung und Nutzungsdauer hat eine kleine technische Änderung, die Autoplay-Funktion, erheblich zum Rebound beigetragen. Bei vielen Plattformen wie z.B. X ist Autoplay per Voreinstellung eingeschaltet. Das bedeutet, dass Videos beim bloßen Scrollen vorausschauend geladen und gestartet werden. Es wäre technisch sehr einfach, in allen Apps als Voreinstellung Autoplay auszuschalten. Hiervon wären allerdings die Geschäftsmodelle betroffen, die auf maximale Aufmerksamkeit und Online-Zeit abzielen, wie auch die Konsumkultur der Nutzer, die sich schon daran gewöhnt haben, dass Videos ohne wahrnehmbare Verzögerung starten.

Die Beispiele illustrieren, wie schwierig ein Maßnahmenmix zu finden ist, der an allen erforderlichen Punkten des komplexen Systems parallel ansetzt und unter dem Aspekt der politischen Durchsetzbarkeit realistisch ist.

Eine dritte grundlegende Erkenntnis aus der vorliegenden Studie betrifft das Vorliegen massiver Pfadabhängigkeiten, die in der digitalen Wirtschaft als Netzwerkeffekte, Lock-In-Effekte und einer resultierenden Konzentration von Marktmacht auftreten, die zu stabilen Marktregimes und Oligopolen führen. Maßnahmen zur Beeinflussung der digitalen Transformation können aus diesem Grund nur dann Erfolg haben, wenn sie langfristig angelegt sind. Sie müssen mögliche zukünftige Entwicklungen in den Blick nehmen und über einen langen Zeitraum konsequent umgesetzt werden, dies auch unter Berücksichtigung der geopolitischen Entwicklung. Methoden der Technikfolgenabschätzung können zur Entwicklung entsprechender Szenarien beitragen. Der beste Zeitpunkt, sich über eine ökologische Gestaltung beispielsweise von Metaverse, neuen Finanztechnologien oder Quantencomputing aus technologiepolitischer Perspektive Gedanken zu machen, ist heute.

Gerade in der schwer vorhersagbaren technischen Entwicklung liegen die größten Chancen häufig in Nischen. Machine Learning fristete ein Nischendasein in der KI-Forschung, bis es das Ende des jahrzehntelangen „KI-Winters“ auslöste. Nischen sind leichter beeinflussbar (z.B. durch Förderung) als die aktuellen Regime, und sie haben ihren Wert als Lösungsangebote für Zeiten des Umbruchs. Nischen wie z.B. Secondhand-Märkte, eine Repair-Kultur oder Softwareprodukte mit geringem Marktanteil zu pflegen und fördern, sind im Sinne des Vorsorgeprinzips langfristige Maßnahmen, weil sie die Vielfalt der alternativen Entwicklungspfade im System bewahren.

A Anhang zu den Fallbeispielen

A.1 Haushalte

A.1.1 E-Commerce

Definition

E-Commerce wird definiert als „jener Teil des Electronic Business (E-Business), der den Kauf und Verkauf von Waren und Leistungen über elektronische Verbindungen umfasst. Ein wesentliches Merkmal ist, dass dabei die Beteiligten einer Transaktion auf elektronischem Wege (z. B. über das Internet oder Netzwerke von Mobilfunkanbietern) miteinander verkehren und nicht durch physischen Austausch in direktem Kontakt stehen.“ (Pfaffenbichler 2018, S.173)

Ziele und Einsatzbereiche

Das Ziel von E-Commerce bzw. Online-Händlern ist es, den Verkaufsprozess zu verbessern und dadurch die Verkaufszahlen zu steigern. Der deutsche E-Commerce-Markt wächst seit den vergangenen 20 Jahren stetig. Im Jahr 2022 betrug der Umsatz 84,5 Milliarden Euro und für 2023 wird ein Wachstum auf 89,4 Milliarden Euro vorausgesagt (Statista 2024b). Die höchsten Umsätze werden in den Warengruppen Bekleidung, Elektronikartikel und Telekommunikation sowie Computer (inklusive Zubehör, Spiele, Software) erzielt. Geringere Umsätze sind dagegen in den Bereichen Lebensmittel, Bürobedarf und Medikamente zu verzeichnen.

Erwartete Umweltpotenziale und von wem sie erwartet werden

In einer Meta-Studie von Bieser et al. (2022) wurde auf der Grundlage der vorliegenden Literatur eine differenzierte Betrachtung der THG-Auswirkungen digitaler Produkte und Dienstleistungen vorgenommen. E-Commerce stellt einen der betrachteten Bereiche dar. Die Auswertung der untersuchten Studien ergab, dass die Verwendung der IT-Geräte und Infrastrukturen lediglich für einen geringen Teil der THG-Emissionen des E-Commerce verantwortlich ist. Den größten Anteil machen die Verpackungsmaterialien aus. Laut einer Studie von Hischier (2018), in der der Online-Versandhandel von Kleidung untersucht wurde, macht die Herstellung der Verpackungen etwa ein Drittel (34,8 %) der THG-Emissionen des E-Commerce aus. Die verschiedenen Transportschritte (von der Produktionsstätte zum Verteilzentrum, vom Verteilzentrum zur Verkaufsstelle sowie die Lieferung von der Verkaufsstelle zu den Kund*innen) sind jeweils für etwa 17 % der Belastungen verantwortlich. Die Rücksendung von Retouren vom Kund*innen zur Verkaufsstelle sind für 9 % der THG-Emissionen verantwortlich (ebd.). Auch andere Studien bestätigen den hohen Anteil, den die Verpackung an den Umweltauswirkungen des Versandhandels hat (Fernández Briseño et al. 2020).

In der Studie von Hischier (2018) wurde der Online-Versandhandel mit dem Einkauf von Kleidung im stationären Handel verglichen. Die Umweltauswirkungen beim Einkauf im stationären Geschäft sind dann besonders hoch, wenn für die Einkaufsfahrt das Auto genommen wird. „Der Vergleich macht deutlich, dass der Online-Versandhandel eine fast viermal geringere Auswirkung auf THG-Emissionen hat als der stationäre Einkauf“ (Bieser et al. 2022, S. 37). In diesem Szenario wird allerdings angenommen, dass die Fahrt zum Einkaufsort mit dem Auto stattfindet. Wird stattdessen die Bahn genutzt, verringern sich die Gesamtauswirkungen des stationären Einkaufs. Aber auch bei der Nutzung Öffentlicher Verkehrsmittel oder beim Umstieg auf ein Elektro-Auto bleibt der Weg der Kund*innen zum Verkaufsort nach wie vor ein

dominierender Verursacher der THG-Emissionen beim Einkauf vor Ort. Einen hohen Einfluss auf die Gesamtbilanz hat – neben dem Verkehrsmittel – die vom Käufer zurückgelegte Strecke.

Auch eine finnische Studie, die Lieferdienste für Lebensmittel untersuchte, stellt fest, dass der Online-Handel im Vergleich zum Einkaufen vor Ort Umweltvorteile aufweist. Bei der Studie wurde angenommen, dass die Einkaufsfahrten mit dem Auto erfolgen. Retouren wurden in dieser Studie nicht betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass der Online-Handel (bei unterschiedlichen Szenarien des Lieferdienstes) zwischen 18 % und 87 % weniger THG-Emissionen verursacht (Siikavirta et al. 2008). Nach Auswertung von insgesamt vier vergleichenden Studien zum Online-Handel kommen Bieser et al. (2022) zu der Aussage: „Im Vergleich zum traditionellen Einkauf im stationären Einzelhandel verursacht der Online-Versandhandel in allen oben genannten Studien deutlich weniger THG-Emissionen. Dies ist vor allem auf die Fahrt in Geschäfte zurückzuführen. Die Höhe der Emissionen hängt vor allem von der Distanz, der Häufigkeit der Einkaufsfahrten und der Wahl des Verkehrsmittels ab.“ (Bieser et al. 2022, S. 38) Bei den betrachteten Studien wurden allerdings keine Rebound-Effekte berücksichtigt.

Mögliche Rebound-Effekte

Die oben genannten Studien kommen zu dem Schluss, dass – unter den angenommenen Bedingungen – der Online-Versandhandel gegenüber dem Einkauf vor Ort Umweltvorteile aufweisen kann. Allerdings müssen auch mögliche Rebound-Effekte beachtet werden. So kann der einfache und bequeme Zugang beim Einkaufen über Internet und mobile Dienste dazu führen, dass mehr konsumiert wird. Umweltvorteile des Online-Handels könnten so durch eine Steigerung des Konsums wieder aufgehoben werden. Neben ständiger Verfügbarkeit können auch die große Warenvelfalt und die Möglichkeit, individualisierte Produkte auf den Markt zu bringen, sowie die oft günstigeren Preise neue Konsumbedarfe wecken und den Mehrkonsum befördern (Lange & Santarius 2018). Auch können sich Online-Shopping und Einkaufen im stationären Geschäft überlagern. So lassen sich Konsument*innen teilweise im Geschäft beraten und tätigen die Bestellung dann – aufgrund günstigerer Preise – im Internet. Zum Teil wird auch im Internet recherchiert, bevor das Produkt im Geschäft gekauft wird. Auch nimmt durch den Online-Handel die Zahl der Retouren zu. Die Forschungsgruppe Retourenmanagement der Universität Bamberg schätzt für das Jahr 2018 in einer Studie, dass 280 Mio. Pakete retourniert wurden (Asdecker & Sucky 2019). Dies ist mit negativen Umweltauswirkungen verbunden. Nicht nur die zusätzlichen Transporte sind hier von Bedeutung, sondern auch die Frage, wie die Unternehmen mit den Retouren umgehen. Zwar wird ein Großteil der retournierten Ware als „A-Ware“ oder „B-Ware“ direkt wiederverkauft, ein kleinerer Anteil wird allerdings auch als Abfall entsorgt. Die Forschungsgruppe Retourenmanagement der Universität Bamberg spricht von knapp 4 % der Rücksendungen, die als Abfall entsorgt werden (Zimmermann et al. 2021).

Wirkmechanismen

Durch den Online-Handel können nahezu alle benötigten Produkte einfach und bequem am Rechner oder Smartphone bestellt werden. Zudem ist durch das mobile Internet das Einkaufen von jedem Ort und zu jeder Zeit möglich. So können mittels des Smartphones vormals inaktive Zeiten, wie beispielsweise Wartezeiten beim Arzt oder Fahrzeiten in öffentlichen Verkehrsmitteln für Einkäufe auch außerhalb der Öffnungszeiten genutzt werden. Dadurch können Komfort-Rebound-Effekte auftreten. Der einfache und bequeme Zugang kann dazu führen, dass mehr gekauft wird. Des Weiteren führt der Online-Handel insbesondere durch den Wegfall von Einkaufsfahrten und Interaktionen im stationären Geschäft zu Zeitersparnis auf Seiten der Verbraucher*innen. Der Rebound-Effekt kann dazu führen, dass durch die Zeitersparnis mehr Handlungen pro Zeiteinheit ausgeführt werden – im Falle des E-Commerce,

dass mehr konsumiert wird. Ein weiterer Effekt, der dem Online-Handel zugeschrieben wird, ist die Kosteneinsparung. Durch die Möglichkeit des schnellen und direkten Vergleichs verschiedener Online-Händler und Anbieter sowie die Nutzung von Such- und Vergleichsportalen können sich Verbraucher*innen jene Anbieter mit dem günstigsten Preis herausuchen (Frick & Santarius 2019). Die Kostenvorteile können zu Preis-Rebound-Effekten führen, wenn die erzielten Einsparungen dazu genutzt werden, dass zusätzliche Konsumhandlungen vollzogen werden (Frick und Matties 2020). Insgesamt können durch den Online-Handel für Verbraucher*innen Effizienzsteigerungen in drei Bereichen auftreten: erstens finanzielle Einsparungen, zweitens Zeitersparnisse und drittens verringerter Transaktionsaufwand (Convenience). Darüber hinaus kann das steigende Angebot im Online-Handel sowie die wachsende Präsenz von stationären Händlern im digitalen Raum dazu führen, dass Verbraucher*innen online auf Produkte und Händler stoßen, die ihnen zuvor noch unbekannt waren und ihr Interesse und neue Bedürfnisse wecken. Dies wiederum könnte dazu führen, dass sie vermehrt den stationären Handel aufsuchen, um die online entdeckten Artikel und Anbieter persönlich zu eruieren (Zimmermann et al. 2020)

Des Weiteren sind Online-Plattformen selbst daran interessiert, möglichst hohe Verkaufszahlen zu generieren. Zusätzlich zu den im E-Commerce wirksamen Effizienzeffekten (Zeiteffizienz, Convenience, günstigere Preise) werden hierzu auch spezifische Strategien eingesetzt, z. B. personalisierte Werbung, Social Media-Werbung, individualisierte Rabatt-Aktionen, Gutscheine, Trigger-Mails, etc., die gezielt zu zusätzlichem Konsum anregen sollen (siehe Frick & Santarius 2019, S. 42).

Zusammengefasst kann angenommen werden, dass beim E-Commerce insbesondere Komfort-Rebound-Effekte, Preis-Rebound-Effekte sowie Zeit-Rebound-Effekte auftreten können.

Ausmaß möglicher Rebound-Effekte

Inwieweit E-Commerce mit Rebound-Effekten einhergeht, ist bislang kaum untersucht worden. In keiner der oben zitierten Studien wurden die Umwelteffekte durch den Online-Versandhandel unter Berücksichtigung der Rebound-Effekte berechnet. Lediglich in wenigen Studien gibt es Abschätzungen zum Ausmaß der Rebound-Effekte im E-Commerce. Hilty & Bieser (2017) schätzen, dass die Rebound-Effekte des E-Commerce 37 % betragen können. Die Autoren setzen in ihrer Analyse auf die Methodik der GeSI-Studie (Accenture 2016) auf und unterlegen sie mit Schweiz-spezifischen Daten.

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Ein zentraler Faktor, der das Auftreten und das Ausmaß der Rebound-Effekte im E-Commerce beeinflusst, ist das Konsumverhalten. So können Konsument*innen durch die Verfügbarkeit von ökologischen Angeboten auf Online-Plattformen in ihrem nachhaltigen Konsumstil gestärkt werden. Andererseits können die Möglichkeiten des Online-Handels ein hedonistisches Konsumverhalten verstärken und zusätzliche Konsumhandlungen anstoßen. Die Studie des UBA (Frick et al. 2019) identifiziert verschiedene Maßnahmen, wie ein nachhaltiges Konsumverhalten im Online-Handel gefördert werden kann. Hierzu gehört die Verbesserung des Zugangs und der Informationen zu nachhaltigen Produktangeboten im Online-Handel, die Stärkung von Orientierungshilfen für Verbraucher, die ökologische Produktinformationen bereitstellen (z. B. Labels, Signale, Filterfunktionen) und die Vermeidung von Desorientierung.

Rebound-Effekte stehen im engen Zusammenhang mit der Gestaltung des E-Commerce. Die Art und Weise der Gestaltung (Verpackung der Produkte, Transport der Ware zu den Kund*innen, Retouren, IT-Geräte und Infrastrukturen) beeinflusst, wie hoch die Umweltwirkungen der Rebound-Effekte ausfallen. Bei den physischen Transaktionen im E-Commerce machen Verpackungsmaterialien den größten Anteil aus. Sie sind für etwa ein Drittel der THG-

Emissionen im Online-Versandhandel verantwortlich (Hischier 2018). Händler können hier Einfluss nehmen, indem sie die Verpackungsmaterialien reduzieren oder auf umweltfreundlichere Varianten umsteigen. Aber auch der Transport der Ware zu den Kund*innen, und hier vor allem die Wahl des Transportmittels und die Entfernung zwischen Verkaufsstelle und den Kund*innen, hat einen erheblichen Anteil. Verbraucher*innen können hier Einfluss nehmen, indem sie Bestellungen bündeln, um Einzellieferungen zu vermeiden. Händler können für die Auslieferung umweltfreundliche Verkehrsmittel wählen (z. B. kleine und leichte Lieferfahrzeuge, Fahrzeuge mit Elektro-Antrieb, Lasten-Fahrräder). Durch bessere Produktinformationen und eine nachhaltigkeitsfördernde Gestaltung von Online-Shops können Rücksendequoten gesenkt werden. Die IT-Geräte und Infrastrukturen und deren Nutzung sind zwar nur zu einem geringen Teil für die THG-Emissionen im E-Commerce verantwortlich (ca. 4 %). Aber auch in diesem Bereich sollten Optimierungspotenziale ausgeschöpft werden, um die Umweltauswirkungen zu senken.

Datenlage

Zwar gibt es einige Studien, die Rebound-Effekte des E-Commerce thematisieren und beschreiben (Bieser et al. 2022; Frick & Santarius 2019; Frick et al. 2019; Gossen et al. 2022), allerdings fehlen weitgehend quantitative Einschätzungen auf Basis von sozial-empirischen Daten. Quantitative Abschätzungen zu Rebound-Effekten wurden nur in einer Studie vorgenommen (Bieser & Hilty 2017).

A.1.2 Online-Plattformen für Peer-to-Peer Sharing

Definition

Peer-to-Peer Sharing steht für die zwischen Privatpersonen geteilte und von einer Online-Plattform vermittelte Nutzung von materiellen Gütern (Scholl et al. 2015). Privatpersonen treten dabei entweder als Anbieter ("Peer Provider") oder als Nachfrager ("Peer Consumer") einer Ressource auf. Diese Art des privaten Sharing wird oft als zentrale Form der Sharing Economy angesehen, da hier – anders als bei Plattformen mit gewerblichen Anbietern – Märkte geschaffen werden, wo vormals keine existierten, da Aktivitäten des Teilens im privaten Austausch stattfanden. Es kann zwischen Formen mit Eigentumsübertragung (Verkaufen, Verschenken, Tauschen) und Formen ohne Eigentumsübertragung (Vermieten, Verleihen und Co-Using) unterschieden werden. Im vorliegenden Fallbeispiel wird der Fokus auf die letztgenannte Form gelegt. Die geteilte Nutzung durch den Weiterverkauf gebrauchter Produkte wird in einem separaten Fallbeispiel behandelt.

Ziele und Einsatzbereiche

Ziel der Sharing-Plattformen es ist, die über viele Nutzer*innen verteilten Informationen über Angebote und Nachfrage zusammenzuführen, die geteilte Nutzung von Gütern zu ermöglichen und somit vorhandene Ressourcen intensiver zu nutzen. Viele Plattformen geben dabei explizit als eines ihrer Ziele den Beitrag zu einem nachhaltigen und ressourcenschonenden Konsum an. Beispielsweise spricht die Carsharing-Plattform *Drivy* (jetzt "getaway") von der Auffassung, „dass eine dezentrale Wirtschaft, um Güter und Dienstleistungen zu teilen, einfach gesprochen effizienter ist, da es die Verschwendung von Ressourcen reduziert, was wiederum zu wirtschaftlichem, umweltfreundlichem und sozialem Nutzen beitragen kann" (Behrendt et al. 2019, S. 22).

Peer-to-Peer Sharing gibt es in unterschiedlichen Konsumbereichen. Die meisten Plattformen finden sich im Bereich Mobilität (insbesondere im Bereich Carsharing und Ridesharing), gefolgt von den Segmenten Gebrauchsgegenstände (Verleihen und Vermieten von Gegenständen) und

Übernachten (z. B. *Airbnb*, *Couchsurfing*). Weitere Plattformen gibt es in den Bereichen Kleidung und Medien (Scholl et al. 2015).

Erwartete Umweltpotenziale und von wem sie erwartet werden

In Wissenschaft und Medien wird immer wieder auf die Umweltpotenziale der Sharing-Ökonomie hingewiesen (Frick & Santarius 2019; Behrendt et al. 2019; Gsell et al. 2015). Die Erwartungen an die Nachhaltigkeit des Sharing basieren auf dem Gedanken, dass vorhandene Ressourcen bzw. Gegenstände während ihrer Lebensdauer durch mehrere Personen intensiver genutzt werden können (Nutzungsintensivierung) und somit die Neuproduktion von Konsumgegenständen vermieden oder verzögert werden kann, da der bestehende Bedarf durch bereits vorhandene Güter gedeckt wird (Behrendt & Henseling 2019). Auch Verbraucher*innen erwarten, dass Sharing einen Beitrag zu einem nachhaltigen Konsum leistet. In einer repräsentativen Bevölkerungsbefragung gaben 67 % der Befragten an, dass sie es als einen zentralen Vorteil dieser Konsumform ansehen, dass Sharing dazu beiträgt, die Umwelt zu schonen (Scholl et al. 2017).

Für bestimmte Segmente des Peer-to-Peer Sharing liegen Ökobilanzen zu Umwelteffekten vor. So untersuchte das ifeu u. a. das private Carsharing (am Beispiel der Plattform *Drivy*) sowie das Apartment-Sharing (am Beispiel von *Wimdu*) (Ludmann 2018). Im Fallbeispiel *Drivy* ergab die Ökobilanzierung, dass durch die Nutzung des privaten Carsharings im Durchschnitt etwa 96 kg CO₂e pro Jahr und Nutzer*in eingespart werden können. Dies entspricht einer Minderung der Emissionen aus der Mobilität um 6 %. Die positive Umweltwirkung kommt vor allem dadurch zustande, dass *Drivy*-Nutzer*innen ein eigenes Auto abschaffen bzw. auf die Anschaffung eines eigenen Pkw verzichten. Auch beim Apartment-Sharing konnten positive Umweltpotenziale ermittelt werden. Diese entstehen v. a. dadurch, dass eine Übernachtung in einer Privatwohnung gegenüber einer Hotelübernachtung in der Ökobilanz besser abschneidet. Durch die Nutzung von *Wimdu* können so pro Person und Jahr 46 kg CO₂e eingespart werden.

Mögliche Rebound-Effekte

Die festgestellten Umweltpotenziale können allerdings nicht immer wie erwartet realisiert werden. Es treten eine Reihe von gegenläufigen Mechanismen auf. So ist im Bereich des privaten Carsharings festzustellen, dass die Sharing-Plattform bei einigen Autobesitzer*innen dazu führt, mit Blick auf die Mieteinnahmen ihr Fahrzeug länger zu behalten, als sie es ohne *Drivy* getan hätten. Auch ist feststellbar, dass das Sharing-Angebot zusätzliche Freizeitfahrten hervorbringt und dass teilweise Fahrten, die vormals mit dem ÖPNV erfolgten, nun mit einem gemieteten Auto vorgenommen werden. Diese Effekte wurden auf Basis einer Befragung von Nutzer*innen der Sharing-Angebote ermittelt. Die Reduzierung der Treibhausgasemissionen durch die Nutzung von *Drivy* könnte bei einer nachhaltigen Nutzung deutlich höher ausfallen, als es derzeit beim durchschnittlichen Nutzenden der Fall ist (Ludmann 2018).

Beim Apartment-Sharing ist zu beobachten, dass zum Teil zusätzliche Reisen induziert werden, die ohne dieses Angebot nicht stattgefunden hätten. Wird dies in der Ökobilanz mitberücksichtigt, so reduziert sich der Einspareffekt auf 21 kg CO₂e pro Person und Jahr (Ludmann 2018). Statt zu der erwarteten Reduzierung des Konsums trägt das Peer-to-Peer Sharing in bestimmten Fällen also zu einer Beschleunigung im Konsum bei. Mit „Beschleunigung“ ist gemeint, dass Online-Plattformen dazu führen können, dass mehr Konsumhandlungen (mehr Freizeitfahrten, mehr Reisen, etc.) hervorgerufen werden, als es ohne diese Angebote der Fall wäre.

Wirkmechanismen

Bei den Erwartungen in Bezug auf die Umweltpotenziale des Peer-to-Peer Sharing steht die folgende Argumentation im Vordergrund. Dadurch, dass Güter gemeinsam genutzt werden, können Neuanschaffungen und die damit einhergehenden Ressourcen- und Energieverbräuche reduziert werden. In der Praxis führt das Sharing allerdings zu unterschiedlichen Effekten im Konsum- und Nutzungsverhalten, die sich teils positiv, teils aber auch negativ auswirken. Beim Teilen von Produkten können Komfort- und Preis-Rebound-Effekte entstehen, wenn durch den einfachen und kostengünstigen Zugang zusätzliche Nutzungsfälle hervorgerufen werden (z. B. zusätzliche Reisen durch Apartment-Sharing). Rebound-Effekte können auch dadurch auftreten, dass nachhaltigere Lösungen durch das Sharing-Angebot ersetzt werden (z. B. Carsharing statt ÖPNV) (Loose 2016; Martin & Shaheen 2011). Des Weiteren können Sharing-Konzepte Nutzer dazu verleiten, mehr zu kaufen, da sie einen Teil der Investitionskosten durch die Mieteinnahmen refinanzieren können. Schließlich sind auch indirekte Rebound-Effekte zu verzeichnen. Durch Sharing können Nutzer Geld sparen oder verdienen. Diese finanziellen Mittel werden teilweise in additiven Konsum investiert, was sich ökologisch nachteilig auswirkt.

Verstärkt werden diese Mechanismen dadurch, dass viele Online-Plattformen selbst daran interessiert sind, möglichst hohe Nutzungszahlen zu generieren. Bei vielen Plattformen ist im Laufe der Zeit eine zunehmende Kommerzialisierung zu beobachten. Da sie sich über eine transaktionsabhängige Gebühr finanzieren (z. B. in Form von Provisionen, Nutzungsgebühren oder Abo-Modellen), wird eine hohe Zahl von Nutzungsfällen angestrebt und durch Marketing und weitere Maßnahmen forciert. In einer Untersuchung von 110 Peer-to-Peer Plattformen aus dem Jahr 2019 wurde festgestellt, dass rund 77 % als kommerzielle Plattformen mit Gewinnerzielungsabsicht einzustufen sind (darunter *Airbnb*, *Drivy* und *Wimdu*) (Flick & Henseling 2019). Zudem weisen die kommerziellen Plattformen weitaus höhere Nutzerzahlen auf als die gemeinwohlorientierten Plattformen, die sich eher in der Nische bewegen (Behrendt et al. 2019).

In der gesichteten Literatur wird vor allem auf mögliche Komfort- und Preis-Rebound-Effekte hingewiesen.

Ausmaß möglicher Rebound-Effekte

Bislang gibt es nur wenige empirische Studien, die Rebound-Effekte des Peer-to-Peer Sharing erheben. Eine Ausnahme stellt das bereits oben zitierte Projekt PeerSharing dar (Behrendt et al. 2019), in dessen Rahmen auch die Ökobilanzierungen des ifeu stattfanden. Die Höhe der Rebound-Effekte ist abhängig vom Konsumbereich, in dem das Sharing stattfindet. So ist anzunehmen, dass die Rebound-Effekte beim Teilen von Gegenständen geringer ausfallen als beim Apartment-Sharing.

Bei den beiden oben aufgeführten Beispielen *Wimdu* und *Drivy* wurden jeweils ein Trendszenario sowie ein Transformationsszenario erstellt. Bei beiden Szenarien wird angenommen, dass die Zahl der Sharing-Nutzer*innen zukünftig steigt. Beim Trendszenario wird davon ausgegangen, dass sich diese Nutzer*innen entsprechend dem heutigen durchschnittlichen *Drivy*-Nutzenden bzw. *Wimdu*-Nutzenden verhalten. Beim Transformationsszenario wird angenommen, dass sie sich maximal nachhaltig verhalten. Die Berechnungen zeigen: Bei *Drivy* fallen bei der nachhaltigen Nutzung die Umwelteinsparungen viermal so hoch aus wie bei der durchschnittlichen Nutzung. Bei *Wimdu* sind die Einsparungen bei der nachhaltigen Nutzung sogar viereinhalbmal so hoch (Ludmann 2018).

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Ob Rebound-Effekte auftreten und wie stark sie ausfallen, hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab. Rebound-Effekte unterscheiden sich stark, je nachdem um welchen Konsumbereich es sich handelt (geteilte Mobilität, Apartment-Sharing, Teilen von Gebrauchsgegenständen, Kleidung, Medien). Ein zentraler Einflussfaktor ist das Nutzerverhalten, d. h. welche Veränderungen die Sharing-Plattform im Konsumverhalten hervorruft. Führt sie tatsächlich zur Substitution eines Neukaufs? Führt sie zu additivem oder beschleunigtem Konsum? Hier können verschiedene Nutzertypen voneinander unterschieden werden, wie eine Untersuchung der Plattform Kleiderkreisel zeigte ("Reduzierer", "Optimierer", "Beschleuniger", "Unveränderte") (Henseling 2019). Einfluss auf die Zugehörigkeit zu einem bestimmten Nutzertyp haben soziale Faktoren, wie Motive und Einstellungen sowie soziodemografische Faktoren wie Bildung und Alter.

Zentralen Einfluss auf mögliche Rebound-Effekte hat der Aspekt, ob das Sharing tatsächlich als Alternative zum Besitz eines Produktes ausgeübt wird oder ob es eine zusätzliche Konsumoption darstellt. Wesentlichen Einfluss hat auch der Aspekt, inwieweit die ständige Verfügbarkeit der Sharing-Produkte bei Verbraucher*innen zu einem Mehrkonsum führt.

Einen Einfluss auf Rebound-Effekte hat auch der Umstand, wie ressourcenintensiv die Vermittlung der Transaktionen und der physischen Güter ist (digitale Infrastruktur und deren Nutzung, Transport des Gutes zum Nachfrager und wieder zurück, Reinigung, etc.). Und auch die Umwelteigenschaften des geteilten Gutes beeinflussen das Ausmaß möglicher Rebound-Effekte (bspw. ob es sich um ein Elektroauto handelt oder um ein Auto mit Verbrennungsmotor).

Datenlage

Im Projekt PeerSharing wurden sozial-empirische Erhebungen (repräsentative Erhebung, Online-Befragung von Plattform-Nutzer*innen, Fokusgruppen) in Kombination mit Lebenszyklusanalysen auf Basis eines Stoffstrommodells durchgeführt. Die Analysen zielten darauf ab, das Konsumverhalten mehrerer typischer Nutzer im jeweiligen Konsumfeld zu erfassen und vergleichbar zu machen. Insbesondere wurden die aktuelle Konsumsituation der Nutzer*innen und der nach deren Angaben wahrscheinliche Alternativkonsum gegenübergestellt und die Umweltlasten verglichen.

A.1.3 Online-Plattformen für Gebrauchtwarenhandel

Definition

Bei Online-Plattformen für Gebrauchtwaren sind verschiedene Geschäftsmodelle zu unterscheiden: virtuelle Marktplätze, Recommerce- und Refurbishing-Plattformen. Durch *eBay* hat es im Handel mit Gebrauchtwaren einen regelrechten „Quantensprung“ gegeben, der sich vor allem in der enormen Vergrößerung der Marktteilnehmenden, Käufer*innen und Verkäufer*innen von gebrauchten Produkten zeigt. Seitdem sind zahlreiche weitere Online-Plattformen mit C2C- und B2C-Geschäftsmodellen hinzugekommen. Die Koordination auf solchen Märkten übernimmt in der Regel eine Plattform, deren Leistung darin besteht, den Anbieter eines bestimmten Produktes und denjenigen, der Interesse am Kauf bzw. an der Nutzung dieses Produktes hat, zusammenzubringen. Von diesen virtuellen Marktplätzen sind Recommerce-Modelle zu unterscheiden, bei denen die Plattform selbst als Eigentümer und Verkäufer der Waren agiert (Henseling et al. 2021a). Recommerce „kennzeichnet ein Geschäftsmodell im Online-Handel mit Secondhand-Artikeln, bei welchem ein gewerblicher Händler Gebrauchtware von Endverbraucher*innen ankauft und diese auf seiner eigenen Internet-Plattform oder auch auf anderen Handelsportalen und Online-Marktplätzen mit einem

Gewinnaufschlag wiederverkauft“ (Deges 2020). Refurbishing bezeichnet die Überholung, Erneuerung und Instandsetzung von gebrauchten Produkten zum Zweck der Wiederverwendung und -vermarktung (Re-Marketing). Die Landschaft der Plattformen zeigt, dass die Grenzen zwischen diesen verschiedenen Geschäftsmodellen fließend sind. So werden über *eBay* sowohl C2C- als auch B2C-Transaktionen vermittelt. Mit Online-Plattformen wie *reBuy* und *Shpock* differenziert sich der Bereich des Recommerce (insbesondere für Elektronik-Produkte) immer mehr aus.

Ziele und Einsatzbereiche

Neben Generalisten im Online-Wiederverkauf wie *eBay* oder *Shpock* gibt es eine Reihe von Plattformen, die auf bestimmte Bereiche spezialisiert sind (z. B. Kleidung: *Sellpy*, *Mädchenflohmarkt* und *Vinted*; Elektronik: *asgoodasnew*, *refurbed*, *reBuy*; Bücher: *Momox*). Plattformen für Refurbishing findet man vor allem im Bereich der IKT (Handys, Laptops, Digitalkameras, etc.). Mit Hilfe von Apps und mobilem Internet können Nutzer*innen bequem von unterwegs aus ortsunabhängig Angebote finden und mit Anbieter*innen in Kontakt treten. Digitale Such-, Informations- und Bezahlssysteme erhöhen die Nutzerfreundlichkeit. Digitale Bewertungs- und Reputationsmechanismen ermöglichen Vertrauen und schaffen Sicherheit zwischen Anbieter*innen und Nachfragenden.

Viele Online-Plattformen sind kommerziell ausgerichtet und verfolgen eine Gewinnerzielungsabsicht, wobei teilweise versucht wird, an das Umwelt- und Nachhaltigkeitsbewusstsein der Verbraucher*innen anzuknüpfen und dies im Marketing zu verwerten. Es gibt aber auch gemeinnützige Plattformen, bei denen die Umweltentlastungspotenziale des Gebrauchtwarenhandels im Vordergrund stehen. Häufig handelt es sich dabei um kleinere oder regional ausgerichtete Plattformen (z. B. *Plietschplatz*, *BSR Tausch- und Verschenkmarkt*).

Umweltpotenziale und von wem sie erwartet werden

In verschiedenen wissenschaftlichen Studien wird auf die Umweltpotenziale digitaler Wiederverkaufsplattformen hingewiesen (Erdmann 2011; Ludmann 2019; Frick et al. 2019). Dem liegt die Überlegung zugrunde, dass vorhandene Geräte bzw. Produkte durch Weitergabe eine Verlängerung ihrer Lebensdauer erfahren und eine vorzeitige Entsorgung vermieden werden kann. Durch diesen Effekt können die mit der Neuproduktion dieser Güter verbundenen Umweltauswirkungen reduziert werden (weniger neue Produkte werden benötigt) (Behrendt & Henseling 2019). Auch seitens der Politik werden hier Chancen für einen nachhaltigen Konsum gesehen. Beispielsweise adressiert das Umweltbundesamt im Rahmen seiner Umwelttipps für Verbraucher u. a. das Thema „Alternativen zum Neukauf“. Dazu heißt es: „Für die Rohstoffgewinnung, die Produktion, den Transport und den Vertrieb von Konsumgegenständen werden Ressourcen benötigt sowie Treibhausgase emittiert. Dennoch liegt ein Großteil der Dinge in der meisten Zeit ungenutzt herum. Wenn wir Konsumgüter gebraucht kaufen, teilen, tauschen, leihen und nicht mehr Genutztes weitergeben, müssen insgesamt weniger Dinge hergestellt und gelagert werden. Damit können Ressourcen geschont, Treibhausgasemissionen vermieden und somit die Umweltbelastung verringert werden.“ (UBA 2023a)

Der Frage, wie hoch die Umweltentlastungspotenziale durch Online-Wiederverkauf tatsächlich ausfallen, widmete sich das Projekt „Wiederverkaufskultur im Internet“ (Behrendt et al. 2011a; Erdmann 2011). Das Projekt lieferte erstmals empirische Daten zum Verständnis von Veränderungsprozessen in diesem Konsumfeld auf Basis einer breit angelegten empirischen Befragung von Käufer*innen und Verkäufer*innen auf der Plattform *Ebay*. Auf Basis dieser Daten wurde eine quantitative Abschätzung der Umweltauswirkungen des Online-Wiederverkaufs vorgenommen. Der Frage, mit welchen Umwelteffekten der Onlinehandel mit

Secondhandprodukten verbunden ist im Unterschied zum Kauf von Neuprodukten, wurde mit Hilfe von modellhaften Ökobilanzen nachgegangen. Im Mittelpunkt standen dabei die Referenzprodukte Kinderkleidung, Notebooks und Sofas. Bei allen drei untersuchten Produkten schneidet die über die Online-Plattform vermittelte Wiederverwendung deutlich besser ab als der Neukauf. Auf dieser Basis wurde eine Abschätzung der Umwelteffekte für alle auf *eBay* gehandelten Produkte vorgenommen. Dabei kommt die Studie zu dem Schluss, dass – bezogen auf den Vergleich Neukauf versus Secondhand – die Ausweitung des Gebrauchtwarenhandels ein signifikantes Dekarbonisierungspotenzial hat. „Ausschlaggebend ist durchgängig, dass bei Upstream CO₂-Emissionen des Re-Use deutlich geringer sind als die des Neukaufs“ (Erdmann 2011, S. 141). Die quantitativen Abschätzungen zeigen folgendes Ergebnis: Die CO₂-Emissionen durch die virtuelle Transaktion (Nutzung IT-Geräte und Infrastrukturen und damit verbundene Vorgänge) und die physische Transaktion (Verpacken und Versenden/ Transportieren des Produktes) liegen je nach betrachtetem Produkt zwischen 0,05 bis 0,5 kg CO₂e/a. Für die große Zahl der Produkte konnte in der Ökobilanzperspektive eine Reduzierung der CO₂-Emissionen festgestellt werden. Je nach Produkt können Einsparungen zwischen 0,5 kg bis 100 kg CO₂e/a angenommen werden. Nur bei alten Elektro-Geräten mit hohem Energieverbrauch in der Nutzungsphase im Vergleich zu Neuprodukten (z. B. Kühlschränke) ist ein Wiederverkauf aus Umweltsicht nicht vorteilhaft. Das heißt, aus der Ökobilanzperspektive können durch den Online-Wiederverkauf trotz der Umwelteffekte durch die virtuelle und physische Transaktion insgesamt CO₂-Emissionen eingespart werden.

Mögliche Rebound-Effekte

Allerdings können die festgestellten Umweltpotenziale nicht immer wie erwartet realisiert werden. Es sind eine Reihe von gegenläufigen Mechanismen festzustellen. Nimmt man die Akteursperspektive hinzu, setzt den Gebrauchtkauf auf *eBay* zu alternativen Verhaltensmustern in Beziehung und berücksichtigt die Preis-Rebound-Effekte, so zeigen die Berechnungen, dass die positiven Effekte durch den Erwerb eines Gebrauchtprodukts überkompensiert werden können durch das veränderte Konsumverhalten und den additiven Konsum, der durch die Kosteneinsparungen ermöglicht wird (Erdmann 2011). Um auch hierzu quantitative Abschätzungen vornehmen zu können, wurde in der Studie eine akteurszentrierte Perspektive eingenommen. Mit Hilfe einer empirischen Erhebung wurde ermittelt, wie sich Nutzer*innen von *eBay* tatsächlich verhalten. Im Mittelpunkt standen die Fragen, ob es durch *eBay* zum Ersatz eines Neuprodukts durch ein Gebrauchtprodukt kommt, ob durch *eBay* Produkte konsumiert werden, auf die die Verbraucher*innen sonst verzichtet hätten und ob die Kosteneinsparungen insgesamt zu einem Mehrkonsum führen.

Wirkmechanismen

Um die tatsächlichen Umweltwirkungen einschätzen zu können, muss berücksichtigt werden, wie sich das Konsumverhalten von Verbraucher*innen durch die Nutzung von Secondhand-Online-Plattformen verändert. In der genannten *eBay*-Studie (Behrendt et al. 2011a) wurde festgestellt, dass die Nutzung unterschiedliche Effekte mit sich bringt. Bei einem Teil der Nutzer*innen führt es dazu, dass sie Neuprodukte durch Gebrauchtprodukte ersetzen. Allerdings sind auch Wirkungen festzustellen, die einem nachhaltigen Konsum entgegenstehen. Durch die Kosteneinsparungen beim Gebrauchtkauf sowie durch die erzielten Einnahmen beim Verkauf nicht mehr benötigter Produkte regt die Plattform auch zusätzlichen Konsum an (Preis-Rebound-Effekte). Dies kann sowohl zu direkten Rebound-Effekte führen (Mehrkonsum des gleichen Produktes) als auch zu indirekten Rebound-Effekten (die Einnahmen werden für andere Güter ausgegeben). Eine quantitative Studie (Parquel et al. 2017) von 541 Nutzer*innen der französischen Plattform *leboncoin* (ähnlich wie *eBay*) zeigt, dass diese Plattform einerseits Konflikte zwischen Materialismus und Umweltbewusstsein "lösen" kann, andererseits aber auch

zu Impulskäufe und Überkonsum führt. Im Kontext dieser Plattform werden Schuldgefühle beim Kauf vermindert (self-licensing), da die Gegenstände ein "zweites Leben" erhalten. Die Idee der Wiederverwertung von Gegenständen wird oft als Vorwand für zusätzliche Konsumbedürfnisse verwendet (Parguel et al. 2017). Auch der bequeme Online-Zugang, durch den Einkäufen jederzeit und von jedem Ort aus möglich ist, trägt dazu bei, zusätzliche Käufe anzuregen (Komfort-Rebound-Effekte). Ähnliche Effekte wurden auch in der Studie „Digitale Kultur des Teilens“ festgestellt, bei der ebenfalls eine sozial-empirische Erhebung des Verbraucherverhaltens zugrunde lag (Behrendt & Henseling 2019). Außerdem wurde in einer qualitativen Studie von Denegri-Knott (2011)⁹ festgestellt, dass auf *eBay* neue Angebote ständig auftauchen, die jedoch aufgrund der Konkurrenz durch schnellere Käufer schnell wieder verschwinden können. Dies führt zu einem zeitlichen Druck beim Erwerb und lässt nur begrenzte Zeit für Überlegungen, um keine Gelegenheit zu verpassen.

Die qualitative Studie von Juge et al. (2022) über Secondhand-Kleidungsplattformen stellt fest, dass eine beschleunigte und regelmäßige Erneuerung der Kleiderschränke bei Nutzer*innen stattfindet. Aus den Interviews (n= 19) geht hervor, dass Nutzer*innen eher auf die regelmäßige Erneuerung ihrer Kleidungsstücke abzielen als auf deren Akkumulation. Artikel werden gekauft, um sie nach kurzer Zeit wieder zu verkaufen, da sie wissen, dass sie sie nicht länger tragen werden und sie sich leicht zu einem vernünftigen Preis verkaufen lassen. Diese Plattform wird als ideal betrachtet, um den Kleiderschrank regelmäßig zu wechseln und die Auswahl ständig zu erneuern. Dadurch werden Kleidungsstücke schnell von Waren zu persönlichen Gegenständen und dann wieder zu Waren mit Tauschwert. Darüber hinaus führt diese Beschleunigung der Erneuerung des Besitztums zu einem Wettbewerb zwischen Nutzer*innen, die nun trendbewusster sein müssen als andere. Indem Nutzer*innen ihre Garderobe regelmäßig über diese Plattformen aktualisieren, versuchen sie, aktuellen Modetrends zu folgen und modisch zu bleiben. Plattformen verstärken das Verhalten der Nutzer*innen, kurzen Modezyklen zu verfolgen und Artikel mit ästhetischer Obsoleszenz durch neue zu ersetzen. Einige Nutzer*innen kaufen sogar bestimmte Kleidungsartikel nur deshalb, weil sie modisch sind und sich leicht zu einem höheren Preis weiterverkaufen lassen, ohne sie selbst tragen zu wollen. In diesem Zusammenhang werden diese Artikel als „Gewinnchancen“ betrachtet.

Verstärkt werden diese Mechanismen dadurch, dass viele Online-Plattformen selbst daran interessiert sind, möglichst hohe Nutzungszahlen zu generieren. Da sie sich meist über eine transaktionsabhängige Gebühr finanzieren (z. B. in Form von Provisionen, Nutzungsgebühren oder Abo-Modellen), wird eine hohe Zahl von Transaktionen angestrebt und durch Marketing und weitere Maßnahmen forciert. Auch bei Recommerce- und Refurbishing-Plattformen stehen kommerzielle Interessen im Vordergrund und es werden möglichst hohe Verkaufszahlen angestrebt.

Art der Rebound-Effekte

Bei Online-Plattformen für Gebrauchtwarenhandel fallen am stärksten Preis-Rebound-Effekte ins Gewicht. Es treten aber auch Komfort-Rebound-Effekte und Zeit-Rebound-Effekte auf.

Ausmaß möglicher Rebound-Effekte

Die Umwelteffekte am Beispiel von *eBay* wurden in der Studie auf die Makroebene hochgerechnet (Erdmann 2011). Die makroökonomischen Effekte der Transaktion (IT-Nutzung, Verpacken und Versenden) liegen in einer Größenordnung, die durch Einsparungen durch Wiederverwendung gebrauchter Produkte in der Ökobilanzperspektive bei weitem kompensiert werden. Die geschätzte Gesamteinsparung in Deutschland durch den Secondhandhandel auf

⁹ Es wurden Interviews mit 35 *eBay* Nutzer*innen durchgeführt.

eBay (alle Produktgruppen) liegt zwischen 300.000 und 1,5 Mio. t CO₂e pro Jahr. Berücksichtigt man allerdings mögliche indirekte Rebound-Effekte, zeigt sich ein anderes Bild. Die Studie nimmt hierbei an, dass das eingesparte Geld für andere Konsumzwecke ausgegeben wird. Ausgehend von dem in der empirischen Erhebung ermittelten Nutzerverhalten wurde ein Budget errechnet, das für zusätzlichen Konsum zur Verfügung steht. Dieses zur Verfügung stehende Budget kann mit Hilfe von volkswirtschaftlichen Angaben zu den CO₂-Emissionen pro ausgegebenem Euro in CO₂-Emissionen umgerechnet werden. Hierzu wurde ein Wert von 0,98 kg CO₂e/€ aus Thiesen et al. (2008) zugrunde gelegt. Die (allerdings mit hoher Unsicherheit verbundene) Gesamtschätzung zeigt: Die durch den Gebrauchtkauf und die damit verbundene Vermeidung von Neuproduktion erzielten Umweltvorteile können durch den Preis-Rebound-Effekt auf der makroökonomischen Ebene überkompensiert werden. Das Ausmaß dieses Rebound-Effektes wird auf 0,5 bis 2,5 Mio. t CO₂e geschätzt. Dieses Ergebnis kommt dadurch zustande, dass die mit dem angenommenen Ausgabenmix verbundenen CO₂-Emissionen höher ausfallen als der Konsum von vergleichsweise wenig CO₂-intensiven Gütern wie einem Sofa, einem Kleidungsstück oder einem Buch. „Dies bedeutet, dass die Kenntnis der Preis-Rebound-Effekte auf der Makro-Ebene erforderlich ist, um zu beurteilen, ob eine Ausweitung der Gebrauchtmärkte aus Umweltsicht Sinn macht. Die Ergebnisse hängen stark davon ab, für welche Zwecke eingespartes Geld ausgegeben wird. [...] Nur wenn das eingesparte Geld durch Gebrauchtwarenkonsum in ökologisch verträglicher Weise ausgegeben wird, ist die Nettobilanz des Online-Handels mit Gebrauchtwaren positiv“ (Erdmann 2011, S. 157).

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Das Ausmaß der Rebound-Effekte wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Ein zentraler Faktor ist das Konsumverhalten. Wird durch den Online-Wiederverkauf der Erwerb von Neuprodukten durch Gebrauchtprodukte ersetzt? Oder führt er zu additivem Konsum? Wofür wird das eingesparte bzw. verdiente Geld ausgegeben? Einen Einfluss auf Rebound-Effekte haben des Weiteren die genutzten IT-Geräte und Infrastrukturen und deren Nutzung. Auch die physischen Transaktionen (Art der Verpackung und des Versands, Transportentfernungen) haben Einfluss auf die Gesamt-Umwelteffekte.

Datenlage

In der zitierten Studie (Behrendt et al. 2011a; Erdmann 2011) wurden modellhafte Ökobilanzierungen mit einer sozial-empirischen Erhebung des Nutzerverhaltens verknüpft. Die Erhebung zielte darauf festzustellen, welche alternativen Verhaltensweisen durch den Onlinehandel auf *eBay* ersetzt werden und wieviel Geld die Nutzer durch den Onlinehandel mit Secondhandprodukten einsparen bzw. verdienen.

A.1.4 Online-Plattformen für Tourismus/ Peer-to-Peer Apartment Sharing

Definition

Beim Peer-to-Peer (P2P) Apartment Sharing, auch bekannt als Flatsharing, handelt es sich um eine Praxis, bei der Privatpersonen ihre eigenen Wohnungen über digitale Plattformen für einen begrenzten Zeitraum, oft für kurze Aufenthalte, an Fremde vermieten (z. B. im Rahmen einer touristischen oder geschäftlichen Reise). Diese Online-Vermittlungsdienste ermöglichen es, private Wohnräume als Übernachtungsmöglichkeiten oder Ferienunterkünfte anzubieten (Peuckert et al. 2017; Clausen & Uhr 2016).

Ziele und Einsatzbereiche

Plattformen für P2P Apartment Sharing haben eine neue Angebotsvielfalt eingeführt und einen neuen Markt geschaffen: Während Touristen früher nur dort übernachten, wo es Hotels oder andere Unterkunftsmöglichkeiten gab, haben Einzelpersonen nun die Möglichkeit, den verfügbaren Raum in ihrer Wohnung vermieten. Dadurch erweitert und diversifiziert sich die Liste der Übernachtungsmöglichkeiten für Touristen (Delgado et al. 2023). Digitale Vermittlungsplattformen haben den Austausch zwischen Privatpersonen sowie das Vermieten von Unterkünften, Häusern oder Zimmern an Reisende erleichtert, die nach Alternativen zu herkömmlichen Unterkünften suchen.

Verbreitung

„Was zunächst als idealistische Nischenpraxis auf der Grundlage gegenseitiger Gastfreundschaft offline entstand, hat sich mit der digitalen Vernetzung und der immer professionelleren Vermittlung entgeltlicher Angebote durch kommerzielle Plattformen inzwischen zu einem verbreiteten Phänomen entwickelt“ (Peuckert et al. 2017, S.9). Die schnelle und kostengünstige Übertragung digitaler Informationen über das Internet war entscheidend für die Entstehung von Online-Vermittlungsplattformen wie dem Peer-to-Peer Apartment Sharing (Beispiele sind *Airbnb*, *wimdu*, *couchsurfing*, *9flats*, *Vrbo*). Besonders das Web 2.0, mit seinen Möglichkeiten zum bidirektionalen Austausch und nutzergenerierten Inhalten, ermöglichte den Aufbau sozialer Netzwerke und die Vermittlung privater Unterkünfte (Peuckert et al. 2017). Infolgedessen führen immer mehr Städte aktuell Regelungen ein, die die Vermietung von Privatwohnungen, etwa über Plattformen wie *Airbnb*, auf eine begrenzte Anzahl von Tagen pro Jahr beschränken. Ziel dieser Maßnahmen ist es, steigenden Mieten, dem Verlust von nachbarschaftlichem Zusammenhalt und zunehmender Gentrifizierung entgegenzuwirken (Loske 2019).

Erwartete Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Laut dem Fraunhofer Institut (Borkmann et al. 2024) tragen Shared-Housing-Modelle wie *Airbnb* zur effizienten Nutzung von Wohnraum bei, indem sie flexible Vermietungsoptionen anbieten, die über traditionelle Miet- und Kaufmodelle hinausgehen. Insbesondere Haushalte mit überschüssigem Wohnraum, wie ältere Bevölkerungsgruppen, können von diesen zusätzlichen Einkommensquellen profitieren. Zudem wird zeitweise leerstehender Wohnraum besser genutzt. So wurden im Jahr 2023 76 % der auf *Airbnb* angebotenen Unterkünfte nur gelegentlich (weniger als 90 Tage im Jahr) vermietet, ohne den Langzeitwohnungsmarkt zu belasten. Das Wuppertal Institut (Bienge et al. 2017) verdeutlicht die Einsparpotenziale von Flatsharing anhand konkreter Zahlen: Der Materialaufwand pro Übernachtung liegt bei 32 kg pro Person, was niedriger ist als bei einer Übernachtung im Hotel (59,3 kg pro Person) oder in einem Ferienhaus (44,1 kg pro Person). Auch der CO₂-Fußabdruck ist mit 8,5 kg CO₂e pro Person geringer im Vergleich zu einer Übernachtung im Hotel (11,2 kg CO₂e pro Person) oder in einem Ferienhaus (13,6 kg CO₂e pro Person) (Bienge et al. 2017). Auch eine von *Airbnb* (2017) in Auftrag gegebene Studie zeigt, dass der Aufenthalt in Privatunterkünften, die über die Plattform gebucht werden, weniger umweltbelastend ist als in Hotels. So verbraucht ein *Airbnb*-Gast weniger Energie und Wasser und produziert weniger Abfall als ein typischer Hotelgast. Selbst unter der Annahme eines dreiprozentigen Zuwachses bei der Reisetätigkeit ergibt sich eine positive Umweltbilanz für die Plattformaktivitäten. Basierend auf aktuellen Nutzerzahlen gab *Airbnb* (2017) an, im Jahr 2016 allein in Europa einen Energiebedarf von 566.000 Haushalten, den Wasserverbrauch von 9.000 olympischen Schwimmbecken, den Treibhausgasausstoß von 1,6 Mio. Autos und 81.200 t Müll eingespart zu haben.

Mögliche Rebound-Effekte

Wirkmechanismen

Einerseits kann die Bereitstellung bestehenden Wohnraum für eine touristische Kurzzeitznutzung dazu beitragen, Leerstand zu vermeiden und Hotelkapazitäten zu ersetzen. Andererseits ist „aber die Wirkung auf den Hotelbestand und damit auf die gastgewerbliche Flächennutzung oder den Verbrauch von Ressourcen für den Bau neuer Hotelanlagen kurzfristig nur gering und kaum nachweisbar“ (Peuckert & Pentzien 2019, S.182). Zudem ist auch der Ressourcenverbrauch zu berücksichtigen, der mit der Bereitstellung von Gästezimmer, Bewirtung, Reinigung, Möblierung, aber auch mit der induzierten Reisetätigkeit verbunden ist. So ergab eine Umfrage, dass 23 % der Mieter auf einer Apartment-Sharing-Plattform ihre Reisetätigkeit im Laufe des Jahres aufgrund der Sharing-Angebote im Internet erhöht haben (Peuckert & Penzien 2019).

Auch Tussyadiah & Pesonen (2015) stellten Veränderungen im Reiseverhalten durch die Nutzung von Peer-to-Peer Unterkünften fest. Zwei Umfragen unter Reisenden aus den USA und Finnland¹⁰ zeigen, dass soziale und wirtschaftliche Vorteile dieser Unterkünfte zu einer größeren Auswahl an Reisezielen, zur Erhöhung der Reishäufigkeit sowie zur Verlängerung des Aufenthalts sowie zur Teilnahme an einer größeren Bandbreite von Aktivitäten an den Reisezielen führen. Dabei spielen zwei Faktoren eine Rolle: Zum einen die Suche nach Kosteneinsparungen und zum anderen der Wunsch, soziale Beziehungen zur lokalen Gemeinschaft aufzubauen. Die Nutzung von Peer-to-Peer-Unterkünften erweitert die Auswahl potenzieller Reiseziele und ermöglicht es durch geringere Unterkunfts-kosten, auch teurere bzw. gehobene Gegenden zu erkunden. Es ist jedoch zu beachten, dass die Preissenkung nicht der einzige Einflussfaktor auf das Reiseverhalten ist, da günstige Unterkünfte wie Budgethotels und Hostels bereits vor dem Aufkommen der Sharing Economy existierten. Plattformen wie *Airbnb* verbinden hingegen Reisende gezielt mit einer breiten Palette von Unterkunftsoptionen, die ihren Bedürfnissen entsprechen. Die erhöhte Reishäufigkeit erklärt sich zunächst durch soziale Anreize, wie neuartige Übernachtungsformen bei Einheimischen, sowie durch finanzielle Anreize, die es ermöglichen, diese Kosteneinsparungen für weitere Reiseziele einzuplanen. Die verlängerte Aufenthaltsdauer entsteht durch intensivere Interaktionen zwischen Gästen und lokalen Gastgebern, die Informationen zu kulturellen Traditionen und lokalen Attraktionen weitergeben. Dies motiviert Reisende, das Reiseziel intensiver zu erkunden und länger zu bleiben. Die niedrigere Unterkunfts-kosten erlauben ihnen auch, ihr Reisebudget auf einen längeren Zeitraum aufzuteilen.

Auch verweist das Fraunhofer Institut (Borkmann et al. 2024) auf Veränderungen in der Aufenthaltsdauer der Gäste auf *Airbnb*, insbesondere seit der Corona-Pandemie. Zwischen 2014 und 2019 betrug die durchschnittliche Aufenthaltsdauer in Deutschland 4,11 Nächte, während Hotelgäste im selben Zeitraum im Schnitt nur 2,6 Nächte blieben. In den Jahren 2020 und 2021 stieg die durchschnittliche Aufenthaltsdauer jedoch um 21,6 % auf 5 Nächte, während Hotelgäste durchschnittlich 3,2 Nächte im Jahr 2020 und 2,8 Nächte im Jahr 2021 verblieben. Diese Verlängerung der Aufenthalte lässt sich einerseits auf die veränderten Reisegewohnheiten durch die Corona-Pandemie zurückzuführen, andererseits aber auch auf den Trend zur Workation, bei dem Arbeit und Urlaub kombiniert werden. Dieses Konzept hat insbesondere durch die Zunahme von Remote-Arbeit in Büro- und Wissensberufen an Bedeutung gewonnen. Eine Online-Umfrage unter *Airbnb*-Gästen bekräftigt dies: 21,5 % der Befragten gaben an, in den letzten Jahren aufgrund einer Workation eine Unterkunft auf *Airbnb* gebucht zu haben. Obwohl die durchschnittliche Aufenthaltsdauer seit 2022 auf etwa 4,2 Nächte gesunken ist (im Vergleich

¹⁰ n=450 Nutzer*innen

zu 2,5 Nächten bei Hotelgästen), bleibt sie dennoch über den Werten von vor 2020 und deutet insgesamt auf eine Tendenz zu längeren Aufenthalten hin.

In einer Szenario-Modellierung haben Cheng et al. (2020) den CO₂-Fußabdruck von *Airbnb* untersucht. Betrachtet wurden die direkten und indirekten Emissionen von Gastgebern und Plattform. *Airbnb*-Gastgeber können das zusätzliche Mieteinkommen in Waren und Dienstleistungen reinvestieren, um neuen Kund*innen besser zu dienen oder um ihren eigenen Lebensstandard zu verbessern. Während der direkte und indirekte CO₂-Fußabdruck pro Übernachtung zwischen 7,29 und 9,39 kg CO₂e liegt, kann das reinvestierte Einkommen der Gastgeber den induzierten CO₂-Fußabdruck auf bis zu 602,41 kg CO₂e aufsteigen. In extremen Szenarien variiert dieser induzierte CO₂-Fußabdruck zwischen 3,84 (best case) und 602,41 kg CO₂e pro Übernachtung (worst case), abhängig von der Nutzung des zusätzlichen Einkommens. Im „Behaviour as Usual“-Szenario beträgt der induzierte CO₂-Fußabdruck 39,90 kg CO₂e pro Übernachtung (Cheng et al. 2020).

Es stehen den Reisenden jederzeit aktuelle und buchbare Angebote zur Verfügung. Durch die Integration von multimedialen Inhalten wie Videos und Panorama-Darstellungen erhalten sie einen realitätsnahen Einblick in das touristische Angebot. Diese visuellen Elemente sowie Bewertungen bzw. Empfehlungen tragen dazu bei, das touristische Erlebnis bereits vor der Buchung greifbar und attraktiv zu gestalten. Durch die digitale Verfügbarkeit von Informationen und die hohe Benutzerfreundlichkeit können Reisende sich bequem von zu Hause aus informieren und ihre Reise selbst individuell planen (Rengelshausen & Schmeißer 2007). Der Aufwand für Planung, Informationsbeschaffung und Buchung ist somit deutlich gesunken und ermöglicht dadurch spontane und kurzfristige Reiseantritte (Magdolen et al. 2022).

Es können finanzielle, materielle, zeitliche und Komfort-Rebound-Effekte auftreten.

Ausmaß eines möglichen Rebound-Effektes: Wie groß ist der Rebound-Effekt

Die Größe des Rebound-Effektes wurde in den genannten Studien nicht ermittelt.

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Das Ausmaß der Rebound-Effekte wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst, wobei das Konsumverhalten eine zentrale Rolle spielt: Wofür wird das eingesparte bzw. verdiente Geld ausgegeben? Ebenfalls sind Buchungsentscheidungen stark von Bewertungen beeinflusst, die von integrierten Bewertungssystemen von Vermittlern wie *Airbnb* und auch von Inhalten in sozialen Netzwerken kommen. Nicht-tourismusbezogene Plattformen wie *Instagram* beeinflussen ebenfalls touristisch relevante Entscheidungen, insbesondere bei technisch affinen Zielgruppen. Es spielen auch soziodemographische Faktoren eine Rolle, wie das Alter und die Generationenzugehörigkeit.

Datenlage

Die empirische Datenlage zu Rebound-Effekte ist dünn. Eine Studie von Cheng et al. (2020) berücksichtigt jedoch den induzierten CO₂-Fußabdruck von *Airbnb* in der Szenariomodellierung.

A.1.5 Streaming Media

Definition

Streaming bezeichnet ein Datenübertragungsverfahren, bei dem die Daten von Video- und/oder Audioinhalten über ein Computernetzwerk von einem Remote-Server zu einem Endgerät übertragen werden und bereits während der Übertragung angesehen oder angehört werden können. Das übertragene („gestreamte“) Video oder die übertragene Musik-Datei wird als

Stream bezeichnet. Wenn der übertragene Inhalt in Echtzeit stattfindet, handelt es sich um einen Livestream.

Ziele und Einsatzbereiche

Streaming ermöglicht es Filme, Serien, Podcasts und Musik, anders als beim klassischen Fernsehen, Radio oder Videoverleih, unabhängig von Ort und Zeit zu konsumieren. Die Inhalte werden oftmals über Streamingportale verbreitet, darunter *Netflix*, *Amazon Prime Video*, *Maxdome*, *Sky*, *Apple TV+* oder *RTL+*. Die Portale bieten ein breites Spektrum an Filmen und Serien, teilweise auch viele Eigenproduktionen, an. Zu den Musikdiensten gehören u. a. *Spotify* und *Apple Music*. Videoplayer wie *YouTube*, Apps wie *Twitch* oder bestimmte Arten von Online-Spielen basieren ebenfalls auf Streaming. Darüber hinaus nutzen internetbasierte Mediatheken der Fernseh- und Rundfunkgesellschaften das Streaming für den Abruf von Fernsehprogrammen, -filmen und Podcasts. In den letzten Jahren hat das Streamen von Filmen in Deutschland erheblich zugenommen, wobei 54 % der Gesamtbevölkerung mindestens einmal im Monat bei einem kostenpflichtigen Anbieter streamen, wobei die Nutzung der Mediatheken darin nicht enthalten ist. Bei Musik ist Streaming mittlerweile das beliebteste Format. 46 % des Musikumsatzes wird hierzulande durch Musikstreaming erwirtschaftet, 43 % durch physische Tonträger und 8 % durch Downloads (Klöß et al. 2019).

Erwartete Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Streaming Media wird bereits seit langem als Möglichkeit der Dematerialisierung diskutiert. So wird erwartet, dass Online-Musik physische CDs ersetzen könnte, wodurch sich Emissionen reduzieren ließen, die mit ihrer Herstellung und Verteilung verbunden sind. (u. a. von Sühlmann-Faul & Rammler 2018). Dadurch, dass die Nutzer von Video-on-Demand-Diensten nicht zur Videothek fahren müssen, die Herstellung von Datenträgern wegfällt, ebenso deren Lagerung und Versand, würde die Umweltbelastung bei der Nutzung von Video-on-Demand im Vergleich zur DVD oder CD geringer ausfallen. Geschätzt wird, dass Streamen energetisch 50- bis 100-mal günstiger als eine DVD ist – Produktion, Transport und ein Anteil des Weges, um die DVD abzuholen, eingerechnet (Bernard 2020). Allerdings zeigen umfassendere Analysen ein differenziertes Bild. Shehabi et al. (2014) haben untersucht, wie viel Primärenergie und Treibhausgasemissionen bei einer DVD anfallen und diese Werte, mit denen von Video-Streaming verglichen. Das Ergebnis zeigt, dass bei Postversand die DVD-Variante etwa gleich viel Energie wie Streaming benötigt. Wird für die Transaktion ein Auto zur Fahrt zum DVD-Verleih oder -Laden genutzt, verbraucht sie dadurch mehr Energie und stößt der Studie zufolge mehr CO₂ aus. Eine aktuellere Analyse von Hintemann & Hinterholzer (2020) kommt zum Ergebnis, dass Videostreaming nicht mehr Energie benötigen muss als die Nutzung von DVDs oder Blu-ray-Disks, auch nicht mehr als klassisches Fernsehen. Entscheidend sind die Nutzungsbedingungen. Bedeutsam für die Klimaverträglichkeit von Video-Streaming ist, mit welcher Technik die Daten von den Rechenzentren zu den Nutzer*innen übertragen werden. Die geringste CO₂-Belastung entsteht, wenn das HD-Video bis nach Hause über einen Glasfaser-Anschluss gestreamt wird, mit zwei Gramm CO₂ je Stunde Video-Streaming für Rechenzentrum und Datenübertragung. Bei Kupferkabel (VDSL) sind es vier Gramm. Erfolgt die Datenübertragung stattdessen mit 5G Übertragungstechnik werden etwa fünf Gramm CO₂ je Stunde emittiert. Je nach Netzabdeckung kann der Energieverbrauch deutlich variieren. Relevant für die Klimabilanz sind auch Bildschirmgröße und Video-Auflösung. Wer eine Stunde Videos in Ultra-HD statt HD am Fernseher schaut, verbraucht 7 Gigabyte statt 700 Megabyte, also zehnmal so viel Datenvolumen (UBA 2020). Bezüglich des Streamens von Musik über das Internet ist festzustellen, dass gegenüber Video-Streaming deutlich weniger Daten anfallen. Hier ist vor allem das Endgerät wichtig, wie Bieser et al. (2022) mit Verweis auf Studien von Tabata & Wang (2021) feststellt.

Mögliche Rebound-Effekte

Auf mögliche Rebound-Effekte des Streamings weisen verschiedene Publikationen hin (Lange & Santarius 2018; Sühlmann-Faul & Rammler 2018; Bieser et al. 2022). So wird erwartet, dass die durch die Substitution von DVDs zunächst eingesparte Energie durch mehr Streamingkonsum zumindest teilweise kompensiert wird (Sühlmann-Faul & Rammler 2018). Allerdings spielt dieser Substitutionseffekt eine immer geringere Rolle. Streaming von Musik, Video oder Podcasts ist längst alltägliche Praxis des Medienkonsums, so dass sich die Frage möglicher Rebound-Effekte nicht in der Form stellt, wie vor Jahren, als Streamingdienste eingeführt worden sind. Aktuell erscheinen Rebound-Effekte möglich, indem der technologische Fortschritt das Streaming von Video-, Film- oder Musikinhalten nicht nur energetisch effizienter gemacht hat, sondern auch günstiger und einfacher. Die Folge: Es wird mehr konsumiert. Etwa 75 % des weltweiten Datenverkehrs geht heute auf Video-Streaming zurück und es wird von einem weiter stark ansteigenden Video-Datenverkehr im Internet ausgegangen (Hintemann & Hinterholzer 2020).

Wirkmechanismen

Ausschlaggebend für den Mehrkonsum ist die Niedrigschwelligkeit der Streamingangebote, der einfache, schnelle und bequeme Zugang und die insgesamt niedrigen Transaktionskosten (Sühlmann-Faul & Rammler 2018)¹¹. Das wachsende Angebot, günstige Tarife und bessere Internetverbindungen haben zur Folge, dass Verbraucher*innen mehr Streaminginhalte mit höherer Qualität abrufen. Typischerweise handelt es sich um Flatrate-Angebote der Streaming-Portale, die bei monatlicher Bezahlung dem Nutzer unbegrenzt Streaming von Filmen, Videos, Podcasts oder Musik erlauben. Hinzu kommt die häufigere Nutzung von Filmen und Musik unterwegs. Die mobile Übertragung verursacht höhere CO₂e-Emissionen, als wenn zu Hause über einen W-LAN Anschluss (Glasfaser oder Kupferkabel, VDSL) gestreamt wird (UBA 2020). Gleichzeitig steigen die Auflösungen von Streaminginhalten auf den Endgeräten, wodurch der Datenverkehr zusätzlich ansteigt (Köhn et al. 2020). Vor wenigen Jahren waren noch HDTV-Videos mit einer Auflösung von 720p Standard, während heute viele Nutzer*innen von Streamingfilmen 4K-Qualität (2160p) bevorzugen. Damit steigt auch die Datenmenge. Eine Übertragung in Ultra-HD-Auflösung auf dem TV benötigt die zehnfache Menge einer HD-Qualität, nämlich 7 GB pro Stunde statt 700 MB pro Stunde (UBA 2020). Damit einher geht das Phänomen, dass Filme auf kleinen Smartphone-Displays in einer Auflösungsqualität (z. B. HD) gestreamt werden, die für die Nutzer*innen in der Wahrnehmung keinen Unterschied zu einer niedrigen Auflösung machen. Mehr Energie wird verbraucht, ohne einen Nutzen davon zu haben. In diesem Zusammenhang ist des Weiteren zu beobachten, dass bei Streaming von Musik automatisch Videos (Autoplay-Funktion) gesendet werden, obwohl nur für das Musikaudio Interesse besteht. Damit steigen ebenfalls unnötigerweise die übertragene Datenmenge und somit auch der Energieverbrauch.

Die Wirkmechanismen sind sowohl denen des Komfort-Rebounds (einfacher und bequemer Zugang zu Filmen, Serien, Musik und Podcasts, zeit- und ortsunabhängige Nutzung, niedrige Transaktionskosten) als auch des Preis-Rebounds (nutzungsunabhängige Bezahlmodelle für Streamingdienste), des materiellen Rebounds (wachsende Angebote, mobiler Zugang zu Filmen

¹¹ Als Beispiel dient auch der Befund von Bieser et al. (2022): „Streamen von Musik über das Internet [verbraucht] gegenüber der Bereitstellung von Musik über CDs pro abgespielter Minute weniger Energie. Die Kosten für den Konsum von Musik sind dadurch ebenfalls gesunken. Eine Studie der Universität Glasgow und der Universität Oslo zeigt, dass ein Album auf einer Schallplatte im Jahr 1977 etwa 29 US-Dollar (Spitzenjahr des Schallplattenverkaufs) kostete, auf Kasette im Jahr 1988 etwa 17 US-Dollar (Spitzenjahr des Kassettenverkaufs), auf CD im Jahr 2000 etwa 22 US-Dollar (Spitzenjahr des CD-Verkaufs) und als digitales Album im Jahr 2013 etwa 11 US-Dollar“ (S. 27).

und Musik) und des Zeit-Rebounds (schneller Zugang zu Streaminginhalten, der Zeit spart) zuzuordnen.

Ausmaß möglicher Rebound-Effekte

Hinweise zum Ausmaß möglicher Rebound-Effekte finden sich für Video-Streaming bei Hintemann & Hinterholzer (2020). „Für das Streamen eines einzelnen Videos wird in den meisten Fällen nur wenig Energie benötigt. Allerdings hat die Nutzung des Internets für Videostreaming in den vergangenen Jahren sehr stark zugenommen. Das führt dazu, dass der Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen durch Videostreaming in Summe deutlich angestiegen sind“ (S. 2). Zwar nimmt der Energiebedarf pro Gigabyte beim Videostreaming kontinuierlich ab, dem steht allerdings der Trend zur Nutzung höherer Auflösungen gegenüber. In Summe wird die Schlussfolgerung gezogen, dass der Trend zu höheren Auflösungen die Effizienzsteigerungen der Technik auszugleichen scheint, wodurch der durchschnittliche Energiebedarf für eine Stunde Videostreaming (für den betrachteten Zeitraum 2018 bis 2020) insgesamt etwa konstant geblieben ist (Hintemann & Hinterholzer 2020).

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Treiber für die Mehrnachfrage nach Streamingdiensten dürfte die generelle technologische Entwicklung sein, welche auf Effizienzverbesserungen abzielt, in Kombination mit Angeboten, die einen einfachen, schnellen und bequemen Zugang zu Filmen, Musik und Podcasts mit insgesamt niedrigen Transaktionskosten ermöglichen. Ein zentraler Faktor sind dabei Flatrate-Angebote der Streaming-Portale. Erheblichen Einfluss auf die Umweltbilanz haben die digitale Infrastruktur, insbesondere die Art der Datenübertragung (Glasfaser, VDSL, WLAN-Hotspots, mobile Übertragungstechnik wie 4G, 5G), Videoauflösungen (SD, HD, Ultra HD, etc.) und nutzungsbedingte Einflussfaktoren (z. B. Mobilfunknetz vs. WLAN, normales Fernsehen vs. Live-Stream, Wahl der Auflösung und des Endgeräts). Der mögliche Rebound-Effekt von Streaming kann deutlich verringert werden, wenn es gelingt, „die Menge der übertragenen Daten zu senken (z. B. durch die Anpassung der Standardauflösung an die Displaygröße der Endgeräte), die Energieeffizienz in Telekommunikationsnetzen zu erhöhen und [...] diese mit Elektrizität aus erneuerbaren Energien [zu betreiben]“ (Bieser et al. 2022, S. 11). „Nutzer*innen können die THG-Emissionen dadurch senken, indem sie unnötigen Konsum von Videoinhalten reduzieren (z. B. Videos im Hintergrund abspielen), und effiziente Abspielgeräte nutzen (z. B. mit kleinen Displays)“ (S. 14)“. Anbieter von Video- und Musikstreaming (wie YouTube) könnten Nutzer*innen die Möglichkeit geben, die Videoübertragung zu deaktivieren, wenn nur Musik gehört wird“ (Bieser et al. 2022). Darüber hinaus kann der Umweltaufwand bei der Datenübertragung reduziert werden, indem Mobilfunkbetreiber Standorte und Geräte gemeinsam nutzen, um so unnötige Parallelinfrastrukturen zu vermeiden, die Autoplay-Funktion von Videos bei Websites standardmäßig abgestellt wird und wenn Anreize zum Mehrkonsum entfallen.

Datenlage

Empirische Daten zu Wirkmechanismen des Streamings, die zu Rebound-Effekten führen können, sind kaum verfügbar.

A.1.6 E-Books

Definition

Als E-Book werden im Alltagsgebrauch elektronische Bücher bezeichnet. Es handelt sich dabei um elektronische Dateien, die bei ihrer Darstellung auf einem elektronischen Lesegerät Buchinhalte so wiedergeben, dass sie gedruckten Büchern ähneln. Man kann die Buchinhalte multimedial aufbereiten und mit Links ergänzen, sodass es zum Enhanced oder Enriched E-Book wird, also zum verbesserten, erweiterten oder angereicherten elektronischen Buch. Übersetzungshilfen und Leserkommentare sowie Augmented Reality erweitern das E-Book weiter (Bendel 2024).

Ziele und Einsatzbereiche

E-Books werden über Onlinehändler vertrieben, über spezielle Plattformen im Web oder über mobile Shops (Bendel 2024). Sie können grundsätzlich mit fast jedem IT-Endgerät (Smartphone, Tablet, Notebook, PC) gelesen werden. Daneben werden aber auch spezielle E-Book-Reader verwendet, die aufgrund ihrer Bauart, ihres Gewichts und ihrer Akkuleistung besonders für das Lesen von elektronischen Büchern geeignet sind. Die populärsten Anbieter von E-Book Readern sind hierzulande *Amazon*, *Tolino* (*Thalia*, *Weltbild*, *Hugendubel*, *Mayersche*, *Osiander*, sowie diverse freie Buchhändler und Tochterunternehmen) und *PocketBook*. Auf Smartphones und Tablets lassen sich ebenfalls E-Books lesen. Dafür bedarf es einer passenden App. Auch am PC und Notebook kann man alle Dateiformate öffnen und damit digitale Bücher lesen. Allerdings ist das Lesen längerer Texte unpraktischer als am Smartphone und Tablet, insbesondere weil man dafür meist in einer „Arbeitshaltung“ vor dem Schreibtisch sitzt. In erster Linie eignet sich der Computer als Lesegerät dann, wenn man neben der Lektüre eines Textes im Kontext von Arbeitszwecken auch im Internet recherchieren muss, und auf möglichst nahtloses Multitasking angewiesen ist (El-Heliebi 2018). Generell lassen sich E-Books in Dateien mit fester Bildschirmdarstellung und Dateien mit variabler, anpassbarer Textanzeige unterteilen. Bei einer PDF-Datei handelt es sich immer um ein fixes Layout, das insbesondere für Kinderbücher, Comics und Fachbücher aufgrund bild- und tabellenreicher Inhalte eingesetzt wird. ePub ist der offene Standard für die allermeisten elektronischen Bücher im Publikumsbereich, vornehmlich Romane, Geschichten, etc. *Amazon* bietet für eBooks eigene Formate an. Diese können nur auf den *Amazon* eigenen Kindle-Geräten geöffnet werden. Was die Verbreitung von E-Books anbetrifft, nimmt einer Erhebung des Bundesamts für Statistik (2020) zufolge, der Anteil von Personen, die E-Books lesen, deutlich zu. 6,5 Mio. Menschen in Deutschland kauften im Jahr 2019 mindestens ein E-Book. Das waren rund 9 % der Bevölkerung ab zehn Jahren. Die Zahl der E-Book-Leser*innen in Deutschland hat gegenüber 2017 um 12 % zugenommen (Destatis 2020). Gemäß Statista ist der Umsatzanteil von E-Books im Publikumsmarkt in Deutschland in den letzten Jahren kontinuierlich gewachsen. Im Jahr 2022 lag er bei rund 6 %, acht Jahre zuvor waren es noch 0,5 %. 2022 betrug der Gesamtabsatz von E-Books rund 37,3 Mio. Exemplare (Statista 2024c).

Erwartete Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Umweltentlastungspotenziale durch den Ersatz von gedruckten Büchern durch digitale Bücher werden schon seit längerem diskutiert, so etwa in Bezug auf E-Book-Reader. Anders als bei herkömmlichen Anzeigegeräten (Tablets, Notebooks, Smartphones) wird bei einem E-Book-Reader kein LCD, sondern ein besonderes e-Ink-Display verwendet, welches die Eigenschaften eines Buches digital nachstellen soll. So kommen diese Displays ohne Hintergrundbeleuchtung aus, was neben einer Stromersparnis und sehr langen Akkulaufzeiten ein entspanntes Lesen ermöglichen soll (Hintemann & Clausen 2016; El-Heliebi 2018). Aus der Studienlage wird insgesamt deutlich, dass mögliche Umweltwirkungen stark von den Nutzungs- und

Rahmenbedingungen abhängen. Manhart et al. (2011) kommen in einer Studie zu E-Books zu dem Ergebnis, dass E-Book-Reader bei 10 Bücher pro Jahr Vorteile beim Energieverbrauch und den Treibhausgasemissionen gegenüber herkömmlichen Büchern aufweisen. Am stärksten ausgeprägt sind diese Vorteile bei E-Book-Readern mit eInk-Displays. Insgesamt findet ein Großteil der Umweltauswirkungen in der Herstellungsphase statt, sodass eine möglichst lange Nutzungsdauer der Geräte entscheidend für die Gesamtbilanz ist. Die Autor*innen betonen zudem, dass sichergestellt sein muss, dass E-Book-Reader auch tatsächlich zum Ersatz von gedruckten Büchern führen, ansonsten fällt die Umweltbilanz für E-Book-Reader negativ aus (Manhart et al. 2011). In einer Studie im Auftrag des Fachverbandes Druck und Papier im VDMA (Behrendt 2010) wurden E-Books mit gedruckten Taschenbüchern hinsichtlich ihres Primärenergiebedarfs, Treibhausgasemissionen und Gesamtumweltbelastung untersucht. Demzufolge schneidet das Taschenbuch beim Gesamtenergieverbrauch und der Gesamtumweltbelastung besser, beim Primärenergieverbrauch schlechter ab als das E-Book. Mit dem E-Book-Reader müssten mehr als 59 Taschenbücher gelesen werden, um einen besseren Carbon Footprint wie beim gedruckten Taschenbuch zu erreichen. Da die Deutschen im Schnitt zwölf Bücher im Jahr lesen, sind -so die Schlussfolgerung der Studie- E-Book-Lesegeräte nur für Vielleser von Vorteil (Behrendt 2010).

Mögliche Rebound-Effekte

Die Anschaffung und Nutzung eines E-Book-Readers ist nur dann ökologisch vorteilhaft, sofern der Kauf und die Herstellung von Büchern vermieden wird, und zwar mindestens in der Größenordnung der in den oben genannten Studien ermittelten „Break-even points“. Dies ist bei rund 10 bis 60 Büchern der Fall – je nach Umfang des Buchs und je nach Umweltindikator. Liest man weniger als diese Anzahl an Büchern auf dem E-Book-Reader besteht die Möglichkeit von Rebound-Effekten (Lange & Santarius 2018; Bieser et al. 2022). Es liegen jedoch keine empirischen Erhebungen vor, ob die Anschaffung eines E-Book-Readers tatsächlich den Kauf und damit die Herstellung von Papierbüchern vermeidet, und somit ein Substitutionseffekt tatsächlich eintritt. Nach einer repräsentativen Befragung im Auftrag des Digitalverbands Bitkom lesen 37 % der Menschen in Deutschland mitunter E-Books, 10 % lesen überwiegend E-Books, 13 % digitale und gedruckte Bücher zu gleichen Teilen und 14 % lesen zwar E-Books, bevorzugen aber die Print-Version (Bitkom 2022). Daraus kann vermutet werden, dass in der Gruppe derjenigen, die überwiegend E-Books lesen, Substitutionseffekte möglich sind, also bei 10 % der Menschen. Der Großteil nutzt hingegen beide Formate komplementär, was auf einen möglichen Rebound-Effekt hindeutet.

Wirkmechanismen

Auf Ebene der Leser*innen kann es zu einem Rebound-Effekt kommen, der als Konsum-Akkumulations-Effekt bezeichnet werden kann. Er hebt auf den Fall ab, dass der Erwerb von E-Book-Readern, nicht herkömmliche Printbücher ersetzt, zumindest nicht in dem Maße, wie es notwendig wäre, um einen Umweltvorteil zu erzielen, sondern oft zusätzlich zu ihnen erfolgt. Die Akkumulation von Printbüchern und neuen E-Book-Readern äußert sich als materieller Rebound-Effekt. Bieser et al. (2022) gehen darüber hinaus davon aus, dass die Anzahl an gelesenen Büchern durch E-Book-Reader steigen könnte, da durch den E-Book-Reader der Bezug von Büchern einfacher und ggf. auch günstiger wird. E-Books sind meist billiger als gedruckte Bücher (zwischen 15-25 % Preisersparnis; El-Heliebi 2018). Hinzu kommen Komfortaspekte: E-Books können bequem direkt von zuhause gekauft und sofort gelesen werden. E-Books sind platzsparend. Tausende Titel haben auf einem einzigen Gerät Platz. Man kann dadurch viele Bücher leicht mit sich führen, was praktisch für den Urlaub und unterwegs ist. Bei zunehmender Multimedialisierung und Hypertextifizierung treten zudem diejenigen Mechanismen in Kraft, die mit der digitalen Mediennutzung generell einhergehen.

Benutzer*innen von E-Books werden daran gewöhnt, über das Lesen von Texten hinaus Bilder, Videos, Kommentare und verlinkte Ressourcen im Internet zu konsumieren (Bendel 2024).

Der Konsum-Akkumulations-Effekt (herkömmliche Printbücher werden nicht oder nicht in ausreichendem Maße ersetzt) entspricht vom Typus her dem des materieller Rebound-Effektes. Außerdem spielen Preis- (günstiger), Komfort- (einfacher, bequemer, platzsparend) und zeitbezogene Rebound-Effekte eine Rolle.

Ausmaß eines möglicher Rebound-Effektes: Wie groß ist der Rebound-Effekt

Es liegen keine Studien vor, welche mögliche Rebound-Effekt von E-Books quantifizieren.

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Rebound-Effekte bei E-Books hängen vor allem von vier Faktoren ab: Ob für das Lesen von E-Books ein neues Gerät beschafft wird, die Umweltbelastungen durch Herstellung des Geräts, Netzwerktechnik, die Datenübertragung und die Aufwände im Rechenzentrum, die Nutzungsdauer des Geräts und ob Printbücher durch die Nutzung von E-Book-Readern weniger hergestellt werden oder auch nicht (Bieser et al. 2022). Verstärkt werden mögliche Rebound-Effekte durch den Kauf von E-Book-Readern, wenn nur wenig Bücher gelesen werden.

Umgekehrt werden mögliche Rebound-Effekte vermindert, wenn E-Book-Reader hauptsächlich von Leser*innen genutzt werden, die generell viele Printbücher lesen und diese in der Regel neu beschaffen und möglichst darauf verzichten, Papierbücher zu kaufen. Rebound-mindernd wirkt sich auch aus, wenn jemand schon ein Gerät besitzt, welches für das Lesen von E-Books geeignet ist (z. B. ein Tablet), und kein weiterer E-Book-Reader beschafft wird. Die Geräte sollten dann für möglichst viele Zwecke, wie das Lesen von Büchern, Zeitungen, Zeitschriften und anderen Dokumenten verwendet werden (Bieser et al. 2022). Ferner ist relevant, ob sich mehrere Personen ein Buch teilen, dies gilt sowohl für die herkömmliche Printversion (durch Leihen, Verschenken, Wiederverkauf) als auch in begrenztem Maße für die elektronische Form des E-Books (z. B. im Familien- und Freundeskreis). Das Ausmaß des Rebound-Effektes wird dadurch je nach Variante in die eine oder andere Richtung beeinflusst. Ferner relevant ist der Zeitaspekt, nämlich dass Lesen eine zeitintensive Tätigkeit ist und nicht beliebig mehr konsumiert werden kann. Wenn mehr gelesen wird, dann muss irgendeine andere Tätigkeit reduziert werden. Dies entspricht dem Befund der Reboundforschung, dass bei zeitintensiven Tätigkeiten der Rebound geringer ist, da eine Ausweitung der Tätigkeit nur begrenzt möglich ist.

Datenlage

Belastbare Daten zu möglichen Rebound-Effekten von E-Books liegen nicht vor.

A.1.7 Digitale Zeitung

Definition

Eine digitale Zeitung, auch Online-Zeitung, elektronische Zeitung oder kurz e-Zeitung genannt, ist eine Zeitung, die dem Leser im Gegensatz zur gedruckten Form digital zur Verfügung steht. Das Format, in dem die Zeitung erscheint, wird als ePaper bezeichnet.

Ziele und Einsatzbereiche

Zeitungen bauen seit Jahren ihr Online-Angebot aus. Laut der Informationsgemeinschaft zur Feststellung der Verbreitung von Werbeträgern werden digitale Zeitungen immer beliebter. Lag der Anteil digitaler Zeitungen im Jahr 2016 in Deutschland bei 5,1 %, stieg er im Laufe der Jahre stetig an und betrug 2022 17,1 % (iwd 2022). Die insgesamt steigenden Verkäufe der digitalen Tageszeitungen gleichen die Auflagenverluste der Printprodukte allerdings monetär bis dato

nicht aus. Denn mit dem Auflagenverlust geht ein Rückgang der Werbeumsätze einher (iwd 2022). Reagiert wird mit zusätzlichen Angeboten in Form von Apps mit aktuellen Nachrichten, Social-Media-Kanälen, Videoangeboten und Podcasts für verschiedene – insbesondere mobile – Betriebssysteme. Diese Zusatzangebote sind auch ein Türöffner zu Zielgruppen, die mit dem Printtitel bislang nicht erreicht wurden. So sind, wie eine Studie der Zeitungsmarktforschung Gesellschaft (ZMG) im Auftrag des Bundesverbands Digitalpublisher und Zeitungsverleger (BDZV) mit aktuellen Leistungsdaten zu Leser*innen, Nutzer*innen, Werbekund*innen ermittelt hat, 46 % der bisherigen Nichtleser*innen an Apps mit aktuellen Nachrichten interessiert, 43 % möchten die Webangebote der Zeitungen nutzen, rund ein Drittel ist aufgeschlossen für Social Media-, Video- oder Podcast-Angebote. Vor allem E-Paper finden immer mehr Anhänger. Wer sie nutzt, schätzt ihre flexible Verfügbarkeit („E-Paper bekomme ich einfacher als Print und kann lesen, wann und wo ich will“: 76 %) und Vorteile beim Handling („da kann man interessante Seiten oder Beiträge besser aufheben“: 58 %) (BDZV 2024). Die Priorität der Zeitungsverleger liegt gemäß einer Trendumfrage des Bundesverband Digitalpublisher und Zeitungsverleger (BDZV) beim Wachstum durch Paid Content und der Digitalisierung bestehender Print-Abonnements. Dabei wird bis 2030 eine deutliche Veränderung in der anteiligen Zusammensetzung der Abonnements über Print, E-Paper und Plus-Abos erwartet. Während heute 70 % des Geschäfts auf gedruckte Zeitungen, 17 % auf E-Paper und 13 % auf Plus-Abos entfallen, soll für 2030 der Printanteil nur noch 38 % ausmachen, E-Paper und Plus-Abos wären mit 32 % beziehungsweise 28 % dann fast ebenso wichtig (BDZV 2024b).

Erwartete Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Mit Blick auf Umwelteffekte, die durch den Ersatz von gedruckten Zeitungen durch digitale Zeitungen zu erwarten sind, hat der Fachverband Druck- und Papiertechnik im VDMA zwei Studien erstellen lassen, eine vom Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, eine zweite von Fraunhofer Umsicht (Behrendt 2010). Beide Studien liefern ein differenziertes Profil der Umwelteffekte. So verbraucht die Printzeitung im Vergleichsszenario zur Online-Zeitung deutlich mehr Primärenergie. Der Carbon Footprint ist ebenfalls größer. Die Gesamtumweltbelastung ist bei der gedruckten Zeitung auch höher. Allerdings verschiebt sich dieses Ergebnis, wenn einzelne Beurteilungsparameter verändert werden. Die Print-Zeitung ist gegenüber der Online-Zeitung ökologischer, wenn sie länger als 26,5 Minuten gelesen wird und wenn der Datentransfer der Online-Version über UMTS erfolgt. Denn das Lesen einer Online-Zeitung, die über Mobilfunk übertragen wird, hat eine wesentlich höhere Umweltbelastung zur Folge als bei einer Übertragung via WLAN. Sie ist auch ökologischer, wenn sie von mindestens 3,2 Leser*innen gelesen wird (Behrendt 2010). Zu ähnlich differenzierten Ergebnissen kommen die Untersuchungen von Arushanyan et al. (2014) und Achachlouei & Moberg (2015a; 2015b). In der Studie von Arushanyan et al. (2014) wurden die Morgen- und Abendexemplare der Online-Ausgabe mit der Print-Ausgabe (eines Medienhauses Alma Media) verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Online-Zeitungen geringere Umweltauswirkungen als ihre gedruckten Versionen pro Jahr und auch pro Leser und Woche aufweisen. Allerdings waren die Auswirkungen pro Lesestunde bei den gedruckten Zeitungen in vielen Fällen geringer. Da die Leser*innen der untersuchten Zeitungen in der Regel mehr Zeit mit der Lektüre der gedruckten Version als mit der Online-Version verbringen, erhalten sie unterschiedliche Mengen an Informationen aus den beiden Versionen. Außerdem kann es sein, dass das Lesen der Online-Version ganz andere Informationen liefert als das Lesen der gedruckten Version. In der Untersuchung wurde nicht berücksichtigt, dass eine Person sowohl die gedruckte als auch die Online-Zeitung lesen könnte und dass der Grund für den geringen Zeitaufwand beim Lesen der Online-Version darin liegen könnte, dass die Informationen aus der gedruckten Version stammen. Dies ist ebenfalls ein wichtiger Aspekt, da es sein kann, dass E-Media-Lösungen gedruckte Versionen nicht ersetzen, sondern eher ergänzen (Arushanyan et al 2014). Auch die

Ergebnisse Achachlouei & Moberg (2015a; 2015b) zeigen, dass die ökologischen Effekte wesentlich von den Rahmen- und Nutzungsbedingungen abhängen. Sie verglichen ein Referenzszenario der Print-Ausgabe mit der aufkommenden Online-Ausgabe sowie der hypothetischen, ausgereiften Online-Ausgabe des Magazins pro Leser*in. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Produktion der Inhalte den größten Beitrag zu den Umweltauswirkungen leisten kann, wenn es nur wenige Leser*innen gibt (wie bei der neuen Version der untersuchten Zeitschrift). Bei mehr Leser*innen oder einer größeren Dateigröße des Tablet-Magazins kann die elektronische Speicherung und Verteilung den größten Beitrag leisten. Bei einer ineffizienten, geringen Gesamtnutzung des Tablets mit einer ausgereiften Version des Tablet-Magazins wurde gezeigt, dass die größte Wirkung von der Leseaktivität (d. h. der Nutzungsphase) ausgeht. Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass die relativen Umweltauswirkungen des Tablet-Magazins bei einer hohen Anzahl von Leser*innen, ihrer effizienten Nutzung des Tablets (d. h. für viele Zwecke über eine lange Lebensdauer des Geräts) und einer kleineren Magazindatei erheblich abnehmen würden (Achachlouei & Moberg 2015a; 2015b).

Mögliche Rebound-Effekte

Die Entwicklung der verkauften Auflage der Tageszeitungen ist seit Jahren rückläufig. Die Anzahl der verkauften Zeitungsexemplare ist seit dem Jahr 1991 stark gesunken und hat sich seitdem mehr als halbiert, während die Nutzung von E-Paper in Deutschland zunimmt (Statista 2021). Zeitungen sind immer mehr Teil eines crossmedialen Angebots und in ein komplexes Mediennutzungsverhalten eingebettet, was Konsum-Akkumulations-Effekte zur Folge haben kann. Aktuell haben die Zeitungen 38,9 % Kombinationsnutzer*innen, die sowohl eine Print- als auch eine Digitalausgabe lesen, 32,2 % der Zeitungsleser nutzen nur digitale Angebote, 28,9 % der Leser*innen nutzen nur Print (BDZV 2024).

Wirkmechanismen

Bieser et al. (2022) halten medienkonsumsteigernde Effekte für wahrscheinlich, „da das Internet den Zugang zu Artikeln einer großen Anzahl an Medienunternehmen (aber auch von Privatpersonen) oft umsonst ermöglicht. Durch Verlinkungen zwischen Artikeln können Nutzer*innen schnell von Artikel zu Artikel springen und kontinuierlich weiterlesen. Zusätzlich können in Online-Zeitungen auch weitere Medienformate (wie Videos) auf einfache Weise eingebettet werden, wodurch das Datenvolumen“ und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen steigen können (Bieser et al. 2022, S. 31). Ein möglicher Rebound-Effekt kann jedoch nicht isoliert betrachtet werden, da mehrere Effekte, wie die Zunahme online veröffentlichter Inhalte durch Medienunternehmen und Privatpersonen oder Leserschwund gleichzeitig auftreten und interagieren.

Preis-, Komfort- und Zeit-bezogene Wirkmechanismen spielen eine Rolle. Sie lassen sich nicht eindeutig den unterschiedlichen Typen zuordnen.

Ausmaß möglicher Rebound-Effekte

Es konnte keine Studie gefunden, welche mögliche Rebound-Effekt von digitalen Zeitungen quantifiziert. Es ist zu erwähnen, dass Lesen eine zeitintensive Tätigkeit ist und nicht beliebig mehr konsumiert werden kann, wie dies bereits in den Ausführungen zum Fallbeispiel E-Books ausgeführt wurde. Wenn mehr gelesen wird, dann müssten andere Tätigkeiten reduziert werden.

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Die wichtigsten Einflussfaktoren sind: Die Anzahl der produzierten Print-Ausgaben vor und nach der Einführung der Online-Ausgabe, die Dateigröße der Online-Ausgabe, die Anzahl der

Leser*innen der Online-Ausgabe und deren Lesedauer sowie das für das Lesen genutzte Gerät und die Netzinfrastruktur (Bieser et al. 2022). Verstärkt wird der Rebound-Effekt, wenn Online-Ausgaben, wie in vielen Fällen, Print-Ausgaben gar nicht ersetzen, sondern zusätzlich gelesen werden. Vermindert wird der Rebound-Effekt, wenn sich Leser*innen entscheiden, entweder die Print- oder Online-Ausgabe, jedoch nicht beides, zu lesen. Bieser et al. (2022) schlussfolgern aus den vorliegenden Befunden, dass „tendenziell Personen, welche sehr lange Zeitung lesen, eher Print-Ausgaben nutzen sollten, und diese idealerweise mit mehreren Personen teilen. Personen, die in jedem Fall Online-Zeitung lesen, sollten vermeiden, zusätzlich Print-Ausgaben zu kaufen. Ab welcher Anzahl Leser und welcher Lesedauer welche Variante vorteilhaft ist, lässt sich auf Basis der bestehenden Literatur jedoch nicht eindeutig sagen und hängt auch von der Dateigröße und dem genutzten Lesegerät ab“ (Bieser et al. 2022, S. 32).

Datenlage

Empirisch belastbare Daten zu möglichen Rebound-Effekten von digitalen Zeitungen liegen nicht vor.

A.1.8 Smart Home

Definition

Smart Home bezeichnet digitale Systeme, automatisierte Verfahren und vernetzte, ferngesteuerte Geräte in Wohnräumen und Häusern. Zum Einsatz kommen sogenannte IoT-Geräte (Internet-of-things), wie smarte Steckdosen, Glühbirnen und LED-Streifen, Jalousien, Heizungskörperthermostate, Smart-TVs und vernetzte Lautsprecherboxen mit digitalen Sprachassistenten. Sie werden über zentrale Steuerungseinheiten verknüpft, die ihrerseits eine Nutzerschnittstelle aufweisen. Der Zugang erfolgt zumeist über das Internet, die Steuerung über mobile Endgeräte oder Computer und die Datenspeicherung erfolgt in einigen Fällen in einer Cloud. Im vorliegenden Fallbeispiel wird der Fokus auf Anwendungen zur Energieeinsparung im Haushalt gerichtet.

Ziele und Einsatzbereiche

Von Anbietern werden Smart Home-Lösungen offensiv damit beworben, dass sie dazu beitragen, Energie einzusparen. So werden sie eingesetzt, um die Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage automatisch zu steuern, die Beleuchtung automatisch anzupassen und den Energieverbrauch von Geräten zu überwachen und zu steuern. Einige Smart Home-Systeme zielen darauf, Photovoltaik-Anlagen in ein Energiemanagement einzubinden, um den Stromverbrauch und die eigene Stromproduktion aufeinander abzustimmen.

Umwelteffizienzpotenziale und wer sie erwartet

Nach dem Branchenverband SmartHome Initiative Deutschland, ist die Einsparung von Energie eines der wichtigsten Ziele von Smart Home. Der Branchenverband ist ein Zusammenschluss von Unternehmen rund um den Bereich Smart Home, die naturgemäß ein Interesse daran haben, die Vorteile ihrer Produkte hervorzuheben. Der Verband rechnet damit, dass sich durch Smart Home-Lösungen etwa 20 bis 30 % der Heizenergie einsparen lässt (Breithut 2022, 17 Juli). Die Kosten für die smarte Technik rechneten sich dabei nach etwa zwei Jahren. Auch von Seiten der Wissenschaft wird auf Umwelteffizienzpotenziale hingewiesen, allerdings fallen die errechneten Effizienzpotenziale niedriger aus. Je nach Technologie liegen die Heizungsbezogenen Energieeinsparungen zwischen 5 % und bis zu 20 % bei smarten Thermostaten bzw. bei bis zu 10 % bei der smarten Temperaturregelung bestimmter Räume ("Smart Zoning") sowie zwischen 10 % und 20 % bei intelligenter Fenstersteuerung (IEA 2019). Die Einsparpotenziale variieren

zwischen 8 % und 19 % der Endenergie für Heizung und Trinkwarmwasser, je nach Anzahl bzw. Anwesenheitszeiten der Personen im Haushalt und der energetischen Qualität sowie dem Typ und Alter des Gebäudes (Kerksen et al. 2018). Des Weiteren zeigen szenario-basierte Modellberechnungen des Öko-Instituts (Quack et al. 2019), dass mit Smart Home-Lösungen Haushalte ihre Heizenergie um 9 % bei einer Wohnung und um 14 % bei einem Haus senken können. In absoluten Werten beträgt das jährliche Heizwärmeeinsparpotenzial 911 kWh bei einer Wohnung bzw. 2.780 kWh bei einem Haus. Demgegenüber steht der Stromverbrauch, den der Einsatz der Geräte verursacht¹². Er beträgt je nach Vernetzung und Ausstattung jährlich 55 kWh bis 224 kWh bei einer Wohnung und 100 kWh bis 564 kWh bei einem Haus. Trotz des erhöhten Stromverbrauchs würden damit in der Nettoenergiebilanz die durch Smart Home-Lösungen möglichen Energieeinsparungen überwiegen.

Mögliche Rebound-Effekte

In der Praxis fällt die Energieeinsparung oft kleiner aus als erwartet. So verzeichnete die Feldstudie von Oh (2020) eine Senkung des Stromverbrauchs von 3,53 % mit Hilfe von smarten Lichtschaltern und Steckdosen, wobei die Information der Nutzer*innen eine bedeutende Rolle spielt. In der Feldstudie von Chen et al. (2018) hingegen erhöhte sich der Stromverbrauch um 13,5 %. Obwohl die Nutzer*innen nach Erhalt der Information über ihren Mehrverbrauch versuchten, diesen zu senken, blieb der Mehrverbrauch bei 9,4 %. Lange et al. (2023) stellten eine durchschnittliche Raumtemperatur von 19,43 °C bei Smart-Home-Nutzer*innen und 19,45 °C bei der Kontrollgruppe fest. Die smarten Heizsysteme bewirkten also keinen signifikanten Unterschied im Heizverhalten. Außerdem untersuchte die Feldstudie von Rehm et al. (2018) den Effekt des Einsatzes von intelligenten Heizkörperthermostaten in 120 Haushalten über einen Zeitraum von zwei Jahren. Im Durchschnitt ergab sich im Vergleich zu den Vorjahren ein Rückgang des Erdgasverbrauchs von 4 %. Dieser moderate Durchschnittseffekt ist das Ergebnis einer sehr heterogenen Verteilung der Effekte bei einzelnen Haushalten: Während einige wenige Haushalte ihren Erdgasverbrauch um rund 30 % senken konnten, wurden auch Mehrverbräuche bis zu 27 % beobachtet. Empirische Erhebungen zu smarten Heizungssystemen sowie anderen digitalen Smart Home-Systemen (Steckdosen, Beleuchtung, Jalousien, etc.) mit einem großen und repräsentativen Stichprobeumfang sind derzeit nicht breit aufgestellt¹³. Sie geben aber erste Hinweise darauf, dass mit Smart Home-Lösungen eher geringere Ressourceneinsparereffekte erzielt werden und diese sich im einstelligen Prozent-Bereich bewegen (Frondele 2021).

Wirkmechanismen

Die Gründe für die Abweichungen von den theoretisch erwarteten Effizienzpotenzialen sind in verschiedenen Faktoren zu verorten. So könnten Probleme mit der Handhabung (Rehm et al. 2018) oder der unsachgemäße Umgang mit Smart Home-Technologien ein Grund sein. Ein weiterer Einflussfaktor könnte in der komfortablen Steuerung verschiedener Smart Home-Applikationen liegen. So könnte die „einfache und komfortable Steuerung der Heizkörperventile auch von weit außerhalb der Wohnung es den Haushalten erlauben, ihre Heizungen intensiver zu nutzen und die Raumtemperatur bereits zu erhöhen, bevor sie ihre Wohnungen erreichen.“ (Frondele 2021, S.412). Hinzu kommt, dass Smart Home-Konzepte nicht nur auf das Energiesparen ausgerichtet sind, sondern vielmehr auf die Befriedigung weiterer Konsumbedürfnisse, wie beispielsweise mehr Komfort, Sicherheit und Entertainment (Nicholls

¹² Der Stromverbrauch ist insbesondere auf folgende Faktoren zurückzuführen: Die zentrale Steuerungseinheit muss kontinuierlich in Betrieb sein, die Geräte führen permanent Überwachungsfunktionen aus und warten auf Steuersignale und die Geräte müssen eine Netzwerkverbindung aufrecht halten, um Daten zu empfangen oder zu senden (Quack et al. 2019). Der Energie- und Ressourcenaufwand für die Herstellung der Hardware ist in diesen Berechnungen nicht berücksichtigt.

¹³ n= 20 Haushalte (Hargreaves et al. 2015), n=23 Haushalte (Jensen et al. 2018), n=40 Haushalte (Nicholls et al. 2017), n=120 Haushalte (Rehm et al. 2018; Schneiders et al. 2018), n=125 Haushalte (Oh 2020), n= 150 Personen (Mataloto et al. 2023), n=375 Personen (Frick/Nguyen 2021), n=16 Personen und n=51 Personen (Chen et al. 2018).

et al. 2017; Jensen et al. 2018; Frick & Ngyuen 2021; Hargreaves et al. 2015). Das in der Praxis dominierende Verkaufsargument der Anbieter ist der Komfort. Der Übergang zwischen Komfortansprüchen und dem Energieaspekt ist dabei fließend. Durch eine erhöhte Geräteanschaffung und -nutzung könnten Energieeinsparungen tendenziell „neutralisiert“ werden (Frick & Ngyuen 2021; Estermann et al. 2020). Das Öko-Institut geht insgesamt durch den Einsatz von Smart-Home-Lösungen eher von einer Erhöhung des Energieverbrauchs aus und macht dafür auch Rebound-Effekte verantwortlich, indem bisher nicht mögliche Nutzungen ermöglicht werden, wie z. B. Öffnen und Schließen von Rollläden bei Ferienabwesenheit, Beleuchtung von Räumen nach Zeitplan, Vorheizen von Räumen „von unterwegs“ (Quack et al. 2019).

Die Wirkmechanismen sind denen des „Komfort-Rebound“ und des „materiellen Rebounds“ zuzuordnen. Auch indirekte „Preis-Rebound“-Effekte erscheinen möglich, wenn Kosteneinsparungen dazu führen, dass neue Konsumoptionen entstehen.

Ausmaß möglicher Rebound-Effekte

Geht man von dem vom Branchenverband Smarthome beworbenen Potenzialwert aus (20 bis 30 %) und vergleicht diesen mit der tatsächlichen Energieeinsparung (im einstelligen Prozentbereich), wäre das Ausmaß der Rebound-Effekte als hoch einzustufen. Bei niedrigeren Potenzialabschätzungen würde auch der Rebound-Effekt entsprechend geringer ausfallen.

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Wesentliche Faktoren, die die Rebound-Effekte beeinflussen, sind: Anzahl und Leistungsfähigkeit der vernetzten Geräte; Strombedarf der Geräte und Netzinfrastruktur; Nutzungsdauer der Geräte; Produktion und Entsorgung von Smart Home-Geräten und Infrastrukturen; Optimierungspotenziale von Heizenergiesystemen; Gebäudezustand; Nutzungsverhalten und persönliche Umstände (Aufenthaltszeiten und Nutzungsverständnis). Ein weiterer Faktor ist die softwarebedingte Obsoleszenz, da Smart Home-Anwendungen immer durch Software gesteuert werden, entsteht hier ein Obsoleszenzrisiko, beispielsweise wenn die Cloudverbindung nicht mehr zur Verfügung gestellt wird, die aber letztendlich die Funktionalität der Geräte ausmacht.

Datenlage

Es liegt eine Vielzahl von Einzelfallanalysen vor. Ihnen ist zu entnehmen, dass die Bandbreite der Einsparpotenziale durch Smart Home erheblich variiert und stark von den Rahmenbedingungen und dem Untersuchungsdesign abhängig ist. Um das Ausmaß der Rebound-Effekte sicher abschätzen zu können, fehlt es an repräsentativen Erhebungen zur Nutzung von Smart Home-Lösungen in der Praxis.

A.1.9 Smart Metering

Definition

Bei intelligenten Messsystemen handelt es sich um „ein elektronisches System, das in der Lage ist, die in das Netz eingespeiste oder die daraus verbrauchte Elektrizität zu messen, das mehr Informationen als ein konventioneller Zähler liefert und mittels elektronischer Kommunikation Daten zu Informations-, Kontroll- und Steuerungszwecken übertragen und empfangen kann“ (Gähns et al. 2021a, S.11). Die Daten werden anschließend an Endverbraucher*innen übermittelt, indem sie benutzerfreundlich und leicht verständlich aufgearbeitet werden. Bei Bedarf können Nutzer*innen jederzeit ein Feedback erhalten und die Verbräuche in hoher

Auflösung direkt vom Zähler oder Display ablesen, zum Beispiel über Wohnungsdisplays oder über ein Webportal auf digitalen Endgeräten.

Ziele und Einsatzbereiche

Durch die Einführung intelligenter Messgeräte und digitaler Zähler werden traditionelle und analoge Messmethoden durch moderne Technologie ersetzt. Das Ziel von Smart Metering besteht darin, den Energieverbrauch sowie Einsparpotenziale in privaten Haushalten und Unternehmen zu erfassen, genauer zu überwachen und dementsprechend zu steuern. Die Bereitstellung von Stromverbrauchsdaten an Endverbraucher*innen gilt als entscheidend für Energieeinsparungen und für die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen. Während Endverbraucher*innen üblicherweise nur einmal jährlich Einblick in ihren Stromverbrauch erhalten, bietet das intelligente Messsysteme ihnen die Möglichkeit einer kontinuierlichen Überwachung ihres Energieverbrauchs sowie eines regelmäßigen Abrufs von Informationen über ihre Verbrauchsmuster (Wohlschlager et al. 2020).

Erwartete Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz plant die Verbreitung intelligenter Stromzähler im Rahmen des Gesetzes zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende (GNDEW). Es zielt darauf ab, die Digitalisierung im Bereich der Energieversorgung voranzutreiben. Bis 2032 wird erwartet, dass diese Technologie flächendeckend in Haushalten und Unternehmen vorhanden ist und weitgehend zum Standard wird (BMWK 2023). Außerdem hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Jahr 2019 ein Förderprogramm mit dem Titel „Einsparzähler“ eingeführt. Das Ziel ist es, Kund*innen dabei zu unterstützen Energieressourcen einzusparen, und gleichzeitig „den Markt für Energieeffizienz-Dienstleistungen und die Entwicklung smarter Geschäftsmodelle für die Energiewende“ zu fördern (BMW 2019). Seitens der Forschung stellt das Institut für ökologische Wirtschaftsforschung fest, dass durch Smart Metering und das damit einhergehende Verbrauchsfeedback (ohne Geräteerkennung) Einsparungen von 1,5 % bis zu 9,2 % erzielt werden können (Aretz et al. 2022). Bei einem Standard-Feedback wird eine Einsparung von etwa 1 % erwartet, während diese bei Echtzeit-Feedback bei etwa 8 % liegt (Gähns et al. 2021a). In einer Felduntersuchung¹⁴ von Raw & Ross (2011), bei der Smart Metering und In-Home-Displays in Haushalten in England eingesetzt wurden, wurde eine durchschnittliche Senkung des Strom- und Gasverbrauchs um 3 % über einen Zeitraum von zwei Jahren festgestellt. Die Bereitstellung eines Echtzeit-Displays erwies sich als bedeutender Faktor, da die Einsparungen um 2-4 % höher lagen als bei der Verwendung eines digitalen Zählers ohne Echtzeit-Display. Das Feldexperiment¹⁵ von Renner et al. (2012) zeigte ebenfalls, dass die Ausstattung mit einem Smart Meter und direktem Verbrauchsfeedback (durch ein In-Home-Display und ein Webportal) zu einem durchschnittlichen Rückgang in österreichischen Haushalten um 3,9 % führte. Die Haushalte reagierten somit auf das erhaltene Feedback und die monatliche Stromabrechnung, indem sie ihr Verhalten änderten und/oder weitergehende Maßnahmen ergriffen, um ihren Stromverbrauch und die damit verbundenen Kosten zu reduzieren. Ähnliche Größenordnungen von Einsparungen wurden auch in einem Feldtest in deutschen und österreichischen Haushalten¹⁶ vom Fraunhofer ISE (2011) festgestellt. So führte der Einsatz des Smart Metering in Kombination mit einem Webportal mit umfangreichen Energieverbrauchsdaten zu einer Einsparung von 3,7 %, bei zeitvariablen Tarifen sogar bei 9,5 %. In einem Feldversuch des Instituts für ZukunftsEnergieSysteme wurden Daten von Smart Metering automatisch in ein

14 Die Stichprobengröße beträgt 18 370 Haushalte für einen Zeitraum von 34 Monaten.

15 Der Stichprobenumfang beträgt 287 Haushalten bzw. Dienstleistungsunternehmen für einen Versuchszeitraum von 12 Monaten.

16 Über 2000 Haushalte in Deutschland und Österreich nahmen an der 18-monatigen Feldphase des Projekts teil.

digitales Energiesparkonto übertragen, wodurch eine durchschnittliche Energieeinsparung von 2,9 % erzielt wurde (Hoffmann et al. 2012). Zusammenfassend ermöglicht der Einsatz von Smart Metering Systemen und Verbrauchsfeedback Einsparungen, auch über einen längeren Zeitraum. Die Höhe der Einsparungen variiert u. a. je nach Feedback-System, der Visualisierung bzw. der Datenbereitstellung. Insgesamt sind die prozentualen Einsparungen durch Verbrauchs-Feedback meist geringfügig (Gähns et al. 2021a, Gähns et al. 2021b; Dromaque & Grigoriou 2018, Aretz et al. 2023). Bei einer Einführung eines Feedback-Systems, mit einer inklusiven und detaillierten Gerätekennung in Haushalten können Einsparungen jedoch noch deutlich höher liegen, bei bis zu 12 – 13,9 % (Aretz et al. 2022; Meinecke 2017). Weiterhin zeigen szenariobasierte Berechnungen (Gähns et al. 2021a), dass bis zum Jahr 2030 etwa 4 Mio. Haushalte mit intelligenten Messsystemen ausgestattet sein werden. Unter der Annahme, dass 5 bzw. 25 % dieser Haushalte ein Echtzeit-Feedback-System nutzen, könnten THG-Emissionen in Höhe von 18.000 bis 230.000 t CO₂e eingespart werden und der Stromverbrauch der Haushalte um 0,04 bis 0,4 % reduziert werden.

Mögliche Rebound-Effekte

Wirkmechanismen

Wie empirische Befunde zeigen, kann ein Verbrauchs-Feedback via Smart-Metering lediglich zu moderaten Einspareffekten führen und sich im einstelligen Prozentbereich bewegen (Fraunhofer ISE 2011; Raw & Ross 2011; Hoffmann et al. 2012; Renner et al. 2012; Degen et al. 2013; Meinecke 2017). Aretz et al. (2023) werteten Daten von insgesamt 1.056 deutschen Haushalten aus, die am Einsparzählerprogramm teilnahmen, und liefern Einblicke in die Verhaltensmuster beim Energieverbrauch. Während die größte Gruppe (568 Haushalte) kaum Veränderungen in ihrem Stromverbrauch aufwies, ergab sich bei den übrigen Haushalten eine gleichmäßige Verteilung zwischen Einsparungen und Mehrverbrauch. So verbrauchten 273 Haushalte weniger Strom, 215 Haushalte hingegen mehr. Der Durchschnittswert des zusätzlichen Verbrauchs liegt bei 20 %, während der Durchschnittswert für die Einsparung 22 % beträgt. Die Gesamtersparnis über alle Kund*innen hinweg beläuft sich auf insgesamt 1 %. Dies bestätigen auch die Ergebnisse von Pyrko (2011)¹⁷, dass der Stromverbrauch bei einigen Haushalten zurückgegangen und gleichzeitig bei anderen angestiegen ist. So nutzten Haushalte mit bereits hohem Stromverbrauch den Feedback-Service und die statistischen Daten, um Unklarheiten in ihren Stromrechnungen zu klären und ein besseres Verständnis über ihren Verbrauch zu erlangen. Dies könnte entweder dazu führen, dass sie ihr Verhalten ändern und die Stromnachfrage reduzieren. Jedoch blieb der Stromverbrauch in vielen Haushalten trotz Einblicks und Überprüfung in ihren Stromrechnungen unverändert oder stieg sogar an. Das erhaltene Feedback diente lediglich als Bestätigung sowie als Selbsteinschätzung und um zu überprüfen, ob ihre Abschätzungen ihrem "gewöhnlichen" Verbrauch entsprechen (Pyrko 2011). Laut der empirischen Untersuchung von Darby et al. (2015) berichteten Nutzer*innen von intelligenten Zählern, dass sie keine Anpassungen in ihrem Energieverbrauch vorgenommen haben, da sie ihr aktuelles Verbrauchsniveau als akzeptabel empfanden und weitere Verhaltensänderungen einen Komfortverlust bedeuten könnten (Komfort-Rebound-Effekt).

Als weiterer Grund für die begrenzten Einspareffekte könnte darin liegen, dass Smart Metering-Technologien nur den Gesamtstromverbrauch erfassen und keine detaillierten Informationen über den Verbrauch einzelner Geräte liefern. Dies könnte zu Fehleinschätzungen bezüglich der Energieeffizienz einzelner Geräte führen, da nur grobe Daten verfügbar sind und entsprechende Anpassungen und Korrekturen erschwert werden (Frondele 2021).

¹⁷ Die Studie basierte auf Daten aus Abrechnungssystemen von drei schwedischen Netzbetreibern sowie auf Umfragen von 1.000 Kund*innen.

Laut Houde et al. (2013) und van Dam et al. (2010) reagieren Haushalte auf Rückmeldungen und Echtzeit-Stromfeedback und reduzieren insbesondere am Anfang der Einführung ihren Energieverbrauch. Die Herausforderung besteht darin, diese Einsparungen über einen längeren Zeitraum aufrechtzuerhalten, da „ein Energiemonitor für die Mehrheit der Nutzer*innen über einen längeren Zeitraum (mehr als vier Monate) nicht effektiv ist“ (van Dam et al. 2010, S.467). So wird in den beiden Feldexperimenten beobachtet, dass anfängliche Stromeinsparungen sogar schon nach mehreren Wochen abnehmen und verschwinden. Van Dam et al. (2010) identifizieren mehrere mögliche Ursachen: die Rückkehr zu früherem Verhalten, den Erwerb neuer Geräte und den Rebound-Effekt. Laut Pyrko (2011) führt die Einführung und Nutzung von Smart Metering nicht zwangsläufig zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs. So wird in schwedischen Haushalten beobachtet, dass der Stromverbrauch innerhalb von 3 Jahren zwischen 18 bis 28 % anstieg.

Es könnten Preis-Rebound-Effekte auftreten, indem der Stromverbrauch lediglich von Hoch- in Niedertarifzeiten verschoben wird. So betonen Wohlschlager et al. (2020), dass zeitvariable Tarife zu einem erhöhten Energieverbrauch außerhalb der Spitzenzeiten führen kann. Empirischen Untersuchungen (Degen et al. 2013) zeigen, dass ein Teil des Stromverbrauchs von teuren Hochtarifzeiten tagsüber auf günstigere Niedertarifzeiten nachts verlagert wird, um Energiekosten zu senken. Verbraucher*innen erleben keine signifikante Reduktion ihres Gesamtverbrauchs, obwohl sie Maßnahmen zu den Einsparungen ergreifen, da die anfänglichen Einsparungen durch die zeitliche Verlagerung ausgeglichen werden. Auch in einem Feldexperiment (Azarova et al. 2020) mit österreichischen Haushalten (n=434) wurde eine Reduzierung des Energieverbrauchs in der abendlichen Spitzenlastzeit (18 bis 18:15 Uhr) festgestellt. Gleichzeitig wurde jedoch ein Anstieg des Verbrauchs zwischen 19 und 22 Uhr beobachtet, wobei eine Steigerung des Energieverbrauchs von 7-8 % ermittelt wurde.

Außerdem ergab eine Ökobilanzierung von Gähns et al. (2021a) eine höhere Bewertung der CO₂-Emissionen des Smart Metering (21 kg CO₂eq/a) im Vergleich zu einem herkömmlichen analogen Zähler (12 kg CO₂eq/a). Dies lässt sich auf den höheren Material- und Energieaufwand bei der Produktion des intelligenten Messsystems sowie den stärkeren Energieverbrauch für den Betrieb zurückführen. In der Lebenszyklusanalyse von Wohlschlager et al. (2020) werden ökologische Auswirkungen für drei Haushaltstypen näher untersucht. Die Prosumer- und Flexumer-Haushalte sind jeweils mit einem intelligenten Messsystem ausgestattet, bestehend aus einer modernen Messeinrichtung und einem Smart Meter Gateway. Flexumer verwenden zusätzlich eine Steuerbox. Diese werden mit einem konventionellen Endverbraucher, dem sogenannten Consumer, mit Nutzung eines Ferrariszählers gegenübergestellt. Konkrete Zahlen zeigen, dass Consumer im Vergleich zu Prosumer und Flexumer geringere direkte Emissionen Ressourcenintensitäten aufweisen: Der Wasserverbrauch liegt bei 0,12 m³ im Vergleich zu 0,25 bzw. 0,31 m³, der Metallverbrauch bei 2,67 kg Fe(eq) gegenüber zu 16,34 bzw. 17,69 kg Fe(eq) und die THG-Emissionen bei 29,23 kg CO₂e im Vergleich zu 51,57 bzw. 63,28 kg CO₂e (Gähns et al. 2021a). Zudem betonen Wohlschlager et al. (2020), dass durch die Einführung des intelligenten Messsystems eine Mehrnachfrage nach neuen Infrastrukturen entsteht. Es werden „zusätzliche IT-Systeme für verschiedene Marktteilnehmer benötigt, um beispielsweise Übertragung, Verarbeitung, Analyse und Speicherung von Daten inkl. das Management des Messsystems zu ermöglichen. Dafür ist die Entwicklung, Produktion und der Betrieb neuer IT-Systeme sowie eine Anpassung bereits bestehender Backend-Systeme notwendig“ (S.10). So könnten materielle Rebound-Effekte erscheinen.

Ausmaß eines möglichen Rebound-Effektes: Wie groß ist der Rebound-Effekt

Das Ausmaß der Rebound-Effekte wurde bislang noch kaum ermittelt (Wohlschlager et al. 2020).

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Die Höhe der Einsparungen hängt von technologischen Faktoren ab, d. h. von der Art des Feedback-Systems, der Visualisierung bzw. Datenbereitstellung (Gähns et al. 2021a), sowie von der anschließenden Verwendung des Feedbacks zur Realisierung von Einsparungen. Zudem spielen Aspekte der Wohnsituation eine Rolle, wie die Art und Größe des Wohnraums, der Zustand des Gebäudes, das Heizsystem und der Energieträger sowie die Geräteausstattung, die Anzahl der Haushaltsmietglieder und die Aufenthaltsdauer im privaten Haushalt. Zusätzlich sollten individuelle Einstellungen berücksichtigt werden, wie die Haltung gegenüber Smart Metering und die Affinität zur Technik (Renner et al. 2012; Hoffmann et al. 2012) sowie Entwicklung neuer Routinen (Dam et al. 2010).

Datenlage

Die Metaanalyse von Stede et al. (2024) bewertet die Studienlage hinsichtlich der Potenziale für positive Umwelteffekte im Energiebereich als umfangreich. Insbesondere ist der Einsatz von Smart Metering und preisdynamischen Tarifen als Anwendungsfall breit erforscht. Es gibt eine hohe Anzahl von Testfeldern in Haushalten und von empirischen Schlussfolgerungen für die Höhe des Energieverbrauchs (Renner et al. 2012; Fraunhofer ISE 2011; Raw & Ross 2011; Hoffmann et al. 2012; Renner et al. 2012; Degen et al. 2013; Pyrko 2012; Meinecke 2017; Aretz et al. 2023; Houde et al. 2013; Dam et al. 2010; Darby et al. 2015; Azarova et al. 2020). Zusätzlich wurde auch Ökobilanzierungen und Lebenszyklusanalysen (Louis et al. 2015; Wohlschlager et al. 2020; Gähns et al. 2021a; Gähns et al. 2021b) sowie szenariobasierte Modellierungen (Gähns et al. 2021a; Gähns et al. 2021b; Malmmodin & Coroama 2016) durchgeführt. Allerdings gibt es noch eine Forschungslücke zu möglichen Rebound-Effekten (Wohlschlager et al. 2020).

A.1.10 Autonomes Fahren

Definition

Autonomes Fahren bezeichnet selbstfahrende Fahrzeuge oder Transportsysteme, die sich ohne Eingriff einer menschlichen Fahrperson zielgerichtet fortbewegen. Wie die Entwicklungsstufen zu einem solchen vollautonomen Fahrzeug aussehen, hat die Society of Automotive Engineers SAE International mit dem J3016-Standard definiert. Die Stufen des autonomen Fahrens reichen von Level 1 Assistiertes Fahren, Level 2 Teilautomatisiertes Fahren, Level 3 Hochautomatisiertes Fahren, Level 4 Vollautomatisiertes Fahren bis hin zu Level 5 dem fahrerlosen Fahren. Beim fahrerlosen Fahren, also dem eigentlichen autonomen Fahren, übernimmt das System die Fahrzeugführung vollständig vom Start bis zum Ziel auf allen Straßentypen, in allen Geschwindigkeitsbereichen und bei allen Umfeld- und Wetterbedingungen (Kolarova et al. 2020).

Ziele und Einsatzbereiche

Autonome Fahrzeuge sind eine Zukunftstechnologie. Noch ist unsicher, wie schnell sich autonomes Fahren durchsetzen wird. Eine technische Herausforderung ist Umgebungserkennung unter freiem Himmel. Denn im Straßenverkehr muss die Funktionsweise der Sensoren sowohl bei Sonne, Regen oder Nacht gewährleistet werden. Aus dem Grund kommen mehrere Systeme zum Einsatz, wie etwa 3D-Kameras, Radarsensoren oder Laserscanner. Auch bei der Wegfindung sind noch technische Hürden zu überwinden. Eine weitere Herausforderung sind die rechtlichen Fragestellungen, die sich durch das autonome Fahren aufwerfen (Wirtschaft digital BW o.J.). Die Industrie rechnet mit einer schnellen Einführung in den nächsten Jahren und einer nennenswerten Marktrelevanz ab 2030. Industrierferne Mobilitätsexpert*innen rechnen mit wesentlich längeren Zeiträumen. Der

Zeitpunkt, wann selbstfahrende Autos in Deutschland auf die Straßen kommen sollen, ist immer noch unklar. Die Automatisierung von individuell genutzten automatisierten Fahrzeugen besteht in der schrittweisen Weiterentwicklung von Assistenzsystemen, mit denen Privat-Pkw bereits heute ausgestattet sind (Kolarova et al. 2020). Neben der individuellen Nutzung von autonomen Fahrzeugen bestehen erhebliche Potenziale im Bereich Sharing in Kombination mit Öffentlichen Verkehren (ÖV), insbesondere in Form von On-Demand-Services, Sammeltaxis oder Robot-Taxis und autonomen Bussen. Solche Angebote haben „das Potenzial, Tür-zu-Tür-Mobilität ohne Besitz eines Privatfahrzeugs zu ermöglichen. Darüber hinaus können sie eine sinnvolle Ergänzung zum regulären öffentlichen Personenverkehr darstellen oder zu seiner Attraktivitätssteigerung beitragen, indem sie beispielsweise in das ÖV-System integriert oder auf der ersten und letzten Meile eingesetzt werden“ (Kolarova et al. 2020). Die Möglichkeiten für das autonome Fahren sind aber noch weitaus vielfältiger, denn prinzipiell kommt jedes Fortbewegungsmittel dafür infrage. So ergeben sich Einsatzmöglichkeiten für autonome Lastwagen, Züge, Schiffe oder Flugzeuge (iks 2024).

Erwartete Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Laut Agora Verkehrswende, Umwelteffizienzpotenziale ergeben sich durch eine Verbesserung der Effizienz im Verkehrsablauf, die aus einer abgestimmten Fahrweise der Fahrzeuge und kleineren Sicherheitsabständen zwischen den Fahrzeugen resultieren. Bei gleichmäßiger und abgestimmter Fahrweise ermöglichen automatisierte Fahrzeuge durch weniger starkem Beschleunigen und Abbremsen eine energieeffizientere Fortbewegung als manuell gesteuerte Fahrzeuge. Schätzungen zufolge beträgt die mögliche Energieersparnis 10 bis 20 % (Kolarova et al. 2020). Größere Effekte werden durch autonome Fahrzeuge erwartet, die im Flottenbetrieb, das heißt seriell in Form von kooperativen Mobilitätsdienstleistungen (Carsharing, Ridesharing etc.) in Verbindung mit ÖV eingesetzt werden. Simulationen zeigen, dass mit der Automatisierung des straßengebundenen ÖV und MIV lediglich 10 bis 30 % des Fahrzeugbestandes notwendig sind, um die gegenwärtige Verkehrsnachfrage abzudecken. Eine Reduzierung des Fahrzeugbestandes in einer derart signifikanten Größenordnung kann den Energieverbrauch im Verkehr deutlich senken. Darüber hinaus erweitert sich dadurch zugleich der Gestaltungsspielraum hinsichtlich Flächennutzung und Stadtentwicklung. Als eine der häufig vermuteten Auswirkungen gilt die Reduktion des Parkflächenbedarfs durch flächeneffiziente Bündelung von Parkflächen in innerstädtischen Parkhäusern (Kolarova et al. 2020).

Mögliche Rebound-Effekte

Den Umweltentlastungspotenzialen stehen mögliche Rebound-Effekte gegenüber, die daraus resultieren, dass es infolge der Fahrzeugautomatisierung zu einem Anstieg der Fahrleistung sowie des Energie- und Flächenverbrauchs kommen kann.

Wirkmechanismen

Folgende Wirkmechanismen lassen (Bechtold et al. 2018, S. 28) Rebound-Effekte durch automatisierte Fahrzeuge erwarten: „Durch steigende Bequemlichkeit und einfachere Nutzung kommt es zu Verlagerung von Gehen, Radfahren und Öffentlichem Verkehr auf automatisierte Fahrzeuge (Verlagerung). Die Möglichkeit Fahrzeiten produktiv zu nutzen, macht es deutlich wahrscheinlicher, dass längere Fahrstrecken mit automatisierten Fahrzeugen in Kauf genommen werden (längere Fahrtzeiten). Da kein Führerschein mehr nötig ist und auch Nutzungsbarrieren durch körperliche Einschränkungen wegfallen, wird die Gruppe der potenziellen Nutzer*innen erweitert (zusätzliche Nutzende). Automatisierte Fahrzeuge können einerseits das Mobilitätsangebot in dünn besiedelten Räumen verbessern, bergen andererseits aber auch das Risiko einer weiteren Zersiedlung (Zersiedelung)“.

Außerdem könnten Fahrzeuge leer herumfahren, statt auf einem kostenpflichtigen Parkplatz zu stehen. Es wäre möglich, dass „Halter autonomer Fahrzeuge einen passagierlosen Parkvermeidungsverkehr verursachen können, indem sie das Auto in der Stadt zirkulieren lassen, um Parkgebühren zu sparen“ (Hochfeld et al. 2017, S.44). Auch die Bereitschaft zum Pendeln weiter Strecken mit dem privaten Pkw könnte zunehmen, da der Nutzwert der Reisezeit steigt und damit die Distanzempfindlichkeit sinkt. Des Weiteren ist auch eine substanzielle Verlagerung von Wegen des klassischen Umweltverbundes auf autonome Flotten mit kostengünstigem Tür-zu-Tür-Service denkbar. Die Agora Verkehrswende kommt zu der Einschätzung: „Das autonome Fahren kann unter Beibehaltung der heutigen Mobilitätskultur und Besitzverhältnisse zu mehr Fahrzeugen mit einer deutlich höheren Fahrleistung führen). Selbst bei einer (theoretisch möglichen) drastischen Reduzierung des Pkw-Bestandes um bis zu 90 % sind verkehrsinduzierende Effekte, zum Beispiel im Falle einer weitgehenden Substituierung des ÖPNV durch gemeinschaftlich genutzte autonome Pkw und Kleinbusse, den bisherigen Szenarien zufolge nicht auszuschließen“ (Hochfeld et al. 2017, S.44). Neben den verkehrlichen Effekten des autonomen Fahrens ist der Energieverbrauch durch On-board-Komponenten, Vernetzung im Mobilfunk und Vernetzung mit dem Backend zu berücksichtigen. Durch „zusätzliche Systemkomponenten steigt der Energieverbrauch automatisierter Fahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen an. Besonders stark ins Gewicht fallen die in den Steuergeräten verbauten Prozessoren (Central Processor Units, CPUs und Graphics Processor Units, GPUs) und Speicher“ (Krail 2020, S.5). Je mehr Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur (Vehicle-to-Infrastructure) sowie zwischen Fahrzeug und Datenplattform (Vehicle-to-Cloud) notwendig ist, desto höher ist der daraus resultierende Energieverbrauch“ (Krail et al. 2020, S.5). Nach Angaben von Krail et al. (2020) könnten aus heutiger Sicht pro automatisiertem Fahrzeug Datenmengen von 1,4 bis 19 Terabyte pro Stunde (TB/h) anfallen. Sie sind eine entscheidende Größe für den Energieverbrauch des Gesamtsystems. Bereits eine übertragene Datenmenge von 0,8 TB/h kann sämtliche Energieeffizienzvorteile, die das automatisierte Fahren an anderer Stelle bringt, zunichtemachen (Krail et al. 2020, S.5). Die bisherigen genannten Studien basieren sich auf Szenarien und Vermutungen, doch in der Studie von Harb et al. (2018) wurde ein naturalistisches Experiment mit 13 Probanden durchgeführt, um die Veränderungen im alltäglichen Nutzungsverhalten durch eine Simulation des autonomen Fahrens zu untersuchen. So wurde das Fahr- und Reiseverhalten über einen Zeitraum von drei Wochen beobachtet, wobei jeder Testperson innerhalb eines siebentätigen Zeitraums ein „selbstfahrendes“ Auto (also mit einem kostenlosen Chauffeur) zur Verfügung stand. Diese geringe Stichprobe bestand aus Familien, Rentner*innen und jungen Erwachsenen. Es wurde eine signifikante Zunahme der zurückgelegten Kilometer und der Anzahl der Fahrten festgestellt, insbesondere bei Fahrten am Abend, für längere Strecken sowie für „zero-occupancy-trips“. Die Steigerungen der gesamten zurückgelegten Fahrzeugkilometer während der Woche mit Chauffeur variierten von einem Minimum von 4 % bei einem der jungen Erwachsenen (von 857 auf 892 Kilometer) bis zu einem Maximum von 341 % bei einem der Rentner (von 188 auf 830 Kilometer). Insgesamt betrug die Erhöhung des Fahrzeugkilometer für die gesamte Stichprobe 83 % (von 5382 auf 9845 Kilometer). In den Interviews mit den Testpersonen wurden die folgenden Faktoren als einflussreichsten für vermehrtes Fahren bewertet: Produktivität (die Möglichkeit des Multitaskings und der effizienten Nutzung der Reisezeit), „zero-occupancy“ Fahrzeuge (für Besorgungen wie das Abholen von Einkäufen, das Parken oder das Tanken ohne ihre Anwesenheit) sowie Bequemlichkeit (Erleichterung von längeren Fahrten und Fahrten bei Müdigkeit oder unter Alkoholeinfluss). Genauer gesagt unternahmen die Testpersonen durchschnittlich 58 % mehr Fahrten, 88 % mehr abendlichen Fahrten (nach 18 Uhr) und 91 % mehr Fahrten von über 32 Kilometer.

Folgende Rebound-Typen sind festzustellen: automatisierte Fahrzeuge können den motorisierten Individualverkehr komfortabler, flexibler und sicherer machen, was zu einer steigenden Nutzung führen könnte (Komfort-Rebound). Finanzielle Einsparungen sind möglich, wenn nur noch für die gefahrenen Kilometer gezahlt wird und diese deutlich günstiger sind als einen Pkw zu besitzen. Dies könnte zu Preis-bedingten Rebound-Effekten führen. Für die Automatisierung und Vernetzung der Fahrzeuge werden zusätzliche Systemkomponenten eingesetzt und für die Kommunikation (Vehicle-to-Infrastructure, Vehicle-to-Cloud) werden Daten erzeugt, die mit einem zusätzlichen Energieverbrauch einhergehen, was einem materiellen Rebound-Effekt zuzuordnen wäre. Möglich wäre das Mobilfunknetz zu verdichten, da an jeder Stelle einwandfreier Empfang möglich sein muss. Außerdem sind Zeiteinsparungen möglich, die wiederum zu neuen Verhaltens- und Konsumweisen (z. B. Nutzung des Autos als Entertainment) führen können (Zeit-Rebound).

Ausmaß eines möglicher Rebound-Effektes: Wie groß ist der Rebound-Effekt

Die Abschätzung der Größenordnung möglicher Rebound-Effekte variiert in den Studien. Bechtold et al. (2018) halten einen Anstieg des Verkehrsaufwands um bis zu 40 % für möglich. Die Studie e-mobilBW (Becher et al. 2017) rechnet mit deutlichen Veränderungen des Modal Split durch autonome Fahrzeuge. Nach Krail et al. (2019) fallen die Änderungen des Modal Split geringer aus (Krail 2019). Die Analyse von Agora Verkehrswende prognostiziert Energieeffizienzgewinne von 4 bis 10 %. Höherer Energieverbrauch durch gesteigerte Fahrleistung, Datenübertragung und Infrastruktur kann Vorteile jedoch leicht zunichte machen. Ein Anstieg der Fahrleistung um nur 1 bis 2,6 % könnte mögliche Energieeffizienzgewinne kompensieren (Krail 2020, S. 27). In diesem Fall würde es zu einem „Backfire“ kommen.

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Es ist davon auszugehen, dass Rebound-Effekte verstärkt werden, wenn speziell die Attraktivität des motorisierten Individualverkehrs durch Kosten-, Zeit- und Komfortvorteile steigen sollte. Faktoren sind die Vereinfachung der Fahrzeugnutzung, die technische Ermöglichung von und mögliche wirtschaftliche Anreize für Leerfahrten, längere Pendelwege aufgrund geänderter Wohnstandortpräferenzen sowie der Zugang neuer Nutzergruppen zum MIV. Sinkende Nutzerkosten für automatisierte Sharing- und Pooling-Angebote (z. B. in Form von Robotaxis) könnten sich außerdem zulasten der aktiven Verkehrsmodi (Fahrradfahren und Zufußgehen) sowie des konventionellen öffentlichen Verkehrs (ÖV) auswirken (Kolarova et al. 2020). Die Verminderung von Rebound-Effekten hängt maßgeblich von der Gestaltung der politischen, rechtlichen planerischen und sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen ab. Zentral ist die Einbettung autonomer Fahrzeuge in eine Verkehrswende, die auf Verkehrsvermeidung und -verlagerung vom motorisierten Individualverkehr auf ÖV-, Fuß- und Radverkehr abzielt. Ein Ansatz ist die Etablierung neuer Mobilitätsdienstleistungen als Plattform für den Flottenbetrieb autonomer Fahrzeuge. Für die Optimierung des Gesamtsystems ist außerdem wichtig, Datenmengen möglichst gering zu halten Sie sind ein entscheidender Faktor für den Energieverbrauch des Gesamtsystems (Krail 2020).

Datenlage

Da die Einführung, Verbreitung und Nutzung autonomer Fahrzeuge unsicher ist, stützt sich Abschätzung möglicher Rebound-Effekte im Wesentlichen auf Szenarien (Albrecht et al. 2023; Hochfeld et al. 2017; Krail et al. 2020; Kolarova et al. 2020), die Plausibilitätsannahmen aus der aktuellen Verkehrsforschung widerspiegeln. Es gibt eine Studie von Harb et al. (2018), die die Auswirkungen des alltäglichen Reise- und Fahrverhalten durch eine Simulation des autonomen Fahrens empirisch untersucht hat.

A.1.11 Routenplanungs- und Navigationssysteme

Definition

Bei Routenplaner handelt es sich um Computerprogramme, die Strecken zwischen Start- und Zielort berechnen und auf einer Karte graphisch darstellen können. Zur elektronischen Zielführung dienen Navigationssysteme, die mithilfe von Positionsbestimmung (Satellit, Funk, GSM bzw. inertes oder autonomes System) und Geoinformationen (Topologie-, Straßen-, Luft- oder Seekarten) eine Zielführung zu einem gewählten Ort oder eine Route unter Beachtung gewünschter Kriterien ermöglichen (Wikipedia 2024).

Ziele und Einsatzbereiche

Routenplaner gibt es großer Zahl offline für PCs, online in Form von Apps im Internet verfügbar oder für eingebaute GPS-Navigationssysteme in Fahrzeugen. Führende Anbieter sind u. a. *TomTom*, *Navigon* oder *Google Maps*, die vermutlich bekannteste Navi-App. Ziel von Routenplanern ist es, Benutzer*innen eine optimale Route hinsichtlich bestimmter Faktoren zu berechnen, in der Regel den kürzesten Weg oder die schnellste Strecke zu suchen. Vielfach werden verschiedene Zusatzinformationen angeboten, welche entlang der zu berechnenden Route angezeigt werden können. Dazu gehören beispielsweise die aktuelle Verkehrslage, das Wetter, Restaurants, Unterkünfte oder Sehenswürdigkeiten. Neben Straßenkarten und Luftbildern sind häufig auch Aufnahmen der Landschaft in einer Schrägansicht sowie 3D-Modelle von Gebäuden abrufbar. Viele Routenplaner bieten außerdem die Möglichkeit verschiedene Routen alternativ für Fahrzeuge, Zug, ÖPNV, Rad, Motorrad, Camper oder zu Fuß anzuzeigen. Darüber hinaus gibt es spezielle Routenplaner beispielsweise zum Wandern, Fahrradfahren oder Mountainbiking.

Erwartete Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Sowohl die Routenplanung als auch die Navigation haben einen Einfluss auf die Verkehrsflüsse und können durch alternative Routen die Umweltwirkungen verändern. Die Routenplaner verfolgen primär das Ziel, die Nutzer auf dem schnellsten Weg von einem Ausgangsort zu einem Zielort zu bringen. Doch der schnellste Weg ist nicht zwangsläufig der umweltfreundlichste. Aus Studien geht hervor, dass Routing-Ansätze, die den optimalen Pfad nicht nur auf der Grundlage von Entfernung, Fahrzeit und Wahrscheinlichkeit der pünktlichen Ankunft berechnen, sondern auch ökologische Kriterien einbeziehen, einen geringeren Treibstoffverbrauch und geringere Emissionen während der Fahrt ermöglichen (Zeng et al. 2016). *Google* hat ein neues Routing-Modell entwickelt, das den Treibstoffverbrauch auf der Grundlage von Faktoren wie Straßengefälle, Stop-and-Go-Verkehrsmuster und Straßentypen, optimiert. *Google Maps* errechnet daraus standardmäßig die Route mit dem geringsten CO₂-Fussabdruck, wenn diese ungefähr die gleiche Ankunftszeit hat wie die schnellste Route. Dies soll die Nutzer*innen dabei unterstützen, ihren ökologischen Fußabdruck zu verringern. In Fällen, in denen die umweltfreundliche Route die Ankunftszeit erheblich verlängern könnte, können Nutzer*innen die relative CO₂-Belastung zwischen den Routen vergleichen, damit sie sich besser entscheiden können. Nach Angaben von *Google* leistet die Funktion in den USA einen Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen. Seit Einführung des Features konnten (bis 2022) dadurch CO₂-Emissionen eingespart werden, als hätte man 100.000 Fahrzeuge aus dem Verkehr genommen. Weltweit sieht *Google* (2022) ein Einsparpotenzial von eine Millionen Tonnen CO₂ jährlich.

Mögliche Rebound-Effekte

Wirkmechanismen

Rebound-Effekte werden in der Literatur für möglich gehalten (Bieser er al. 2022). Ein Wirkmechanismus, der zu einen Rebound-Effekt führen könnte ist der, dass Routenplanungs-

und Navigationssysteme Verkehr, speziell mit dem Auto, komfortabler und effizienter machen, wodurch mehr gefahren werden könnte (Bieser et al. 2022). Der Wirkmechanismus kann dem Typ des Komfort-Rebound und des Zeit-Rebound zugeordnet werden.

Ausmaß eines möglicher Rebound-Effektes: Wie groß ist der Rebound-Effekt

Zum Ausmaß möglicher Rebound-Effekte liegen keine Informationen vor.

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Der zentrale Faktor ist, ob und wie die Routenplanung zu einer Veränderung im Fahrverhalten führt und welche Konsequenzen dies für THG-Emissionen hat (Bieser et al. 2022).

Datenlage

Es liegen keine empirischen Daten vor.

A.2 Unternehmen

A.2.1 Precision Farming

Definition

Precision Farming (Präzisionslandwirtschaft) bezeichnet die ortsdifferenzierte, zielgerichtete und variable Ausbringung von landwirtschaftlichen Betriebsmitteln mit Hilfe digitaler Technologien. Die Menge der eingesetzten Betriebsmittel wird dabei exakt an den aktuellen spezifischen Bedarf der jeweiligen landwirtschaftlichen Teilfläche angepasst (EFI 2024, S. 52).

Ziele und Einsatzbereiche

Ziel von Precision Farming ist es, Ressourcen wie Saatgut, Dünger, Wasser und Pflanzenschutzmittel optimal zu nutzen und gleichzeitig die Ernteerträge zu maximieren. Zentral für die Anwendung sind „satellitengestützte Navigationstechnologien, die eine exakte Positionsbestimmung ermöglichen. Die über Sensoren gewonnenen Informationen können in geografischen Informationssystemen, sogenannten Ackerschlagkarteien, verarbeitet werden. Arbeitsprozesse und Betriebsmitteleinsatz können mithilfe solcher Schlagkarteien optimiert und durch automatisierte Landmaschinen ausgeführt werden“ (EFI 2024, S. 52). Die Einsatzmöglichkeiten für digitale und smarte Agrartechnologien sind vielfältig. Ein Einsatzbereich ist beispielsweise die Nutzung von Dohnendaten für einen teilflächenspezifischen Pflanzenschutz, der eine ortsdifferenzierte und zielgerichtete Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen ermöglichen soll. Pflanzenschutzmittel werden dabei räumlich differenziert – auf Grundlage von Drohnenbefliegungsdaten – und lokal konzentriert nach Bedarf und Notwendigkeit einzusetzen, ein Verfahren, das auch als Spot Spraying bezeichnet wird. Ein weiterer Einsatzbereich ist die teilflächenspezifische Gülleapplikation zur Ausbringung organischer Düngemittel. Zur Anwendung kommen Sensoren am Güllefass, die durch das indirekte Messverfahren der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) den Stickstoffgehalt (sowie weitere Nährstoffgehalte wie Phosphor und Kalium) der Gülle, bei der Befüllung des Fasses sowie bei der Ausbringung des organischen Düngers, messen. Durch die genaue Bemessung der Düngerzusammensetzung und der genauen Kartierung von Düngebedarfen auf der Ackerfläche (abhängig von Pflanzenbedarf und Bodenverhältnissen sowie roten/nicht roten Gebieten) in Applikationskarten kann eine möglichst optimale Passung für die Nährstoffapplikation ermittelt und die Ausbringmengeneinstellung vorgenommen werden (Behrendt & Gegner 2022b). In der Präzisionslandwirtschaft können auch digitale (teil-)automatisierte Landmaschinen, Roboter oder Drohnen eingesetzt werden. (Teil-

Automatisierte Landmaschinen umfassen z. B. Traktoren mit Spurführung oder Teilbreitenschaltung zur ortsspezifischen Ausbringung von Betriebsmitteln (EFI 2024). Zur Verbreitung digitaler Techniken, die dem Precision Farming zugeordnet werden, liegt eine jüngst im Auftrag der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) im Zeitraum von Mai bis Juni 2023 durchgeführte nicht-repräsentative Umfrage vor. Ihr zufolge „gaben 40,9 % der teilnehmenden landwirtschaftlichen Betriebe und Lohnunternehmen an, dass sie FMIS (Farmmanagement-Informationssysteme) bzw. DSS (Decision Support System) einsetzen. Mit geringem Abstand folgt der Einsatz digitaler Technologien für Landmaschinen. Digitale Informationsplattformen werden von etwa jedem dritten und Drohnen von jedem vierten befragten Betrieb eingesetzt. Während die Erfassungs- und Sensortechnologie noch bei jedem fünften Betrieb eine Rolle spielt, kommen Feldroboter bislang nur bei 4,2 % der befragten Betriebe zum Einsatz. Allerdings gaben 12,7 % der Befragten an, den Einsatz von Feldrobotern zu planen (EFI 2024, S. 53).

Erwartete Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Allgemein wird erwartet, dass durch Precision Farming die Ausbringungsmengen von Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln verringert werden. Dadurch lassen sich Betriebskosten einsparen und gleichzeitig negative Umweltauswirkungen reduzieren (EFI 2024, Gotsch et al. 2020, Kehl et al. 2021, Meyer-Aurich et al. 2021, VDI 2022). Stellvertretend für diese Erwartung kann die Plattform PLANT 2030, die das Bundesministerium für Bildung und Forschung bei Programmen der angewandten Pflanzenforschung in Deutschland begleitet, zitiert werden: Durch die Analyse von „Daten können Landwirte fundierte Entscheidungen treffen, um ihre Anbau- und Bewirtschaftungsmethoden zu optimieren. Sie können beispielsweise die Menge und Verteilung von Düngemitteln an die spezifischen Bedürfnisse der Pflanzen anpassen, Bewässerungssysteme effizienter gestalten, Unkrautbekämpfungsmaßnahmen gezielter durchführen und den Einsatz von Pestiziden reduzieren“ ... „Die Vorteile von Precision Farming liegen in der Steigerung der Produktivität, der Ressourceneffizienz und der Rentabilität der landwirtschaftlichen Betriebe. Gleichzeitig trägt es zur Reduzierung von Umweltauswirkungen bei, indem es den Einsatz von Chemikalien und Wasser minimiert und die Bodengesundheit verbessert“ (Pflanzenforschung o.J.). Gesicherte Zahlen zur Entwicklung der Umwelteffekte infolge der Nutzung von technischen Fortschritten liegen bislang nicht vor. Obwohl die Erwartungen an eine Digitalisierung der Landwirtschaft zum Ressourcen-, Klima-, Umwelt- und Naturschutz vielfach sehr hoch sind (Walter et al. 2017; Finger et al. 2019; Nüssel 2018), ist bemerkenswerterweise festzustellen, dass kaum empirische und systematische Untersuchungen bis dato darüber existieren. Dies bestätigt auch die Untersuchung des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag mit dem Titel „Digitalisierung der Landwirtschaft: gesellschaftliche Voraussetzungen, Rahmenbedingungen und Effekte“ (Kehl et al. 2021). „Während Ausgestaltung und Funktionsfähigkeit sowie die Wirtschaftlichkeit intensiv untersucht sind, gibt es nur eine begrenzte Anzahl wissenschaftlicher Studien zu den Umwelteffekten von Technologien der Präzisionslandwirtschaft, in der Regel basierend auf Feldversuchen oder Modellberechnungen. Die Veränderung von Umweltwirkungen durch in der landwirtschaftlichen Praxis eingeführte Technologien ist bislang fast gar nicht wissenschaftlich dokumentiert (Kehl et al. 2021, S. 95). Dies gilt erst recht für die Nutzung der Digitalisierung und Automatisierung zur Steigerung der Öko-Effizienz auf Makroebene im Zusammenspiel der verschiedenen Entwicklungsdynamiken. Generell wird aber erwartet, dass sich mit der Weiterentwicklung und Verbreitung von digitalen Applikationen in der Landwirtschaft neue Potenziale zum Umwelt-, Ressourcen- und Klimaschutz ergeben, die den ökologischen Fußabdruck der Landwirtschaft deutlich reduzieren können (Kehl et al. 2021; Walter et al. 2017).

Mögliche Rebound-Effekte

Verbesserungen der Ressourcen- oder Emissionseffizienz in der Landwirtschaft können direkte Rebound-Effekte nach sich ziehen (Bieser et al. 2022). In einer Studie von Paul et al. (2019) wurden Rebound-Effekte in Bezug auf die Steigerung der Bodenproduktivität und Verbesserungen bei der Bewässerung und das daraus resultierende höhere Produktionsniveau diagnostiziert (Paul et al., 2019).

Wirkmechanismen

Nach Bieser et al. (2022) besteht das Hauptrisiko darin, „dass die Produktivitätssteigerungen nicht dazu genutzt werden, den Nettoressourceneinsatz und die damit verbundenen Emissionen zu verringern, sondern die Produktion zu steigern und die Preise zu senken, was letztlich zu einem Anstieg des Ressourcenverbrauchs und der Emissionen führen könnte“ (Bieser et al. 2022). Ein weiterer Effekt könnte sein, dass die Effizienzsteigerungen dazu führen können, dass Biomasse für mehr Nicht-Ernährungszwecke benutzt wird, weil sie dann konkurrenzfähiger wird. Reichel et al. (2021) und Kliem et al. (2022) berichten, dass smarte Landmaschinen und -roboter aufgrund ihrer Flexibilität, Autonomie und Präzision die Bewirtschaftung kleiner (Rand-)flächen und Saumstrukturen erleichtern, und infolge auch zu einer Ausweitung der landwirtschaftlich intensiv genutzten Fläche führen können. Ökologische Nischen würden verloren gehen und das Risiko eines Verlustes an Biodiversität steigen. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht wird es aber als relativ unwahrscheinlich angesehen, dass der teurere Einsatz smarterer Landtechnik auf kleinen Restflächen erfolgen wird. Weiterhin könnte die Verbreitung digitaler landwirtschaftlicher Technologien mit einer Erhöhung der Schlaggrößen und auch hier mit einem Verlust an Biodiversität einhergehen (Reichel et al. 2021). Nach Weller von Ahlefeld (2019) können Rebound-Effekte bei der Bewässerung auftreten. Rebound-Effekte können für die Nutzung von Nährstoffen in Form von Düngemitteln und für Pflanzenschutzmittel beim Einsatz von Sensortechniken erwartet werden. Verwiesen wird u. a. auf Schieffer und Dillon. Sie konnten zeigen, dass die Nutzung von Technologien der Präzisionslandwirtschaft, wie automatische Lenksysteme und teilflächenspezifische Applikation, die Ausbringungsmenge an Düngemitteln steigern kann, und es für die Landwirte einen Anreiz zum höheren Einsatz der Ressourcen infolge der verringerten Kosten gab (Weller von Ahlefeld 2019, S. 10). Weiterhin sind nach Weller von Ahlefeld (2019) Rebound-Effekten möglich, „wenn auf qualitativ sehr unterschiedlichen bzw. stark wechselnden Ackerböden (durch z. B. Tonstellen, die sehr schnell vernässen) die Düngeintensität bisher eher gering war. Die Heterogenität kann auch mit Blick auf die unterschiedlichen Nährstoffbedürfnisse der Pflanzen auf Basis der Informationen der Sensoren aufgefangen werden. Der Rebound-Effekt besteht dann darin, dass die Düngemittelintensität insgesamt steigt. Zudem kann durch die Optimierung beispielsweise des Stickstoffeinsatzes der Bedarf auch anderer Nährstoffe gemäß dem Minimumgesetz ansteigen“ (Weller von Ahlefeld 2019, S. 10). Ein von Bieser et al. durchgeführtes Interview mit einem Landwirtschaftsexperten in der Schweiz zeigte, dass Landwirte zwar den Düngemiteleinsatz durch Präzisionslandwirtschaftstechnologien reduzieren können, aber dennoch die maximal zulässige Menge an Düngemitteln ausbringen könnten, um die Produktion zu steigern“ (Bieser 2022, S. 61). Dies wird auch in der Studie von Henseling et al. (2021b) zur NIRS-Technologie für eine teilflächenspezifische Ausbringung von organischen Düngemitteln bestätigt. Darin äußern Landwirte die Erwartung, dass sie sich durch die zielgenauere Ausbringung noch weiter an die gesetzlich erlaubten Maximalmengen annähern können. Darüber hinaus besteht die Erwartung, dass durch die Möglichkeit der sehr gezielten Gülleausbringung und einer genauen Aufzeichnung der ausgebrachten Mengen mit Hilfe der NIRS-Technologie der Gesetzgeber überzeugt werden könnte, Umweltauflagen

(besonders in roten Gebieten) zu lockern, um Landwirten mehr Handlungsspielraum zu gewähren (Henseling et al. 2021b).

Mechanismen, die infolge der verringerten Kosten zu einem höheren Einsatz der Ressourcen führen können, lassen sich dem finanziellen Rebound-Typ zuordnen. Ein materieller Rebound-Effekt liegt vor, wenn infolge der Digitalisierung die Schlaggrößen erhöht werden. Dies könnte mit einem Verlust an Biodiversität einhergehen. Auch psychologische Mechanismen können festgestellt werden, und zwar derart, dass Landwirte den Düngemiteleinsatz durch Präzisionslandwirtschaftstechnologien zwar verringern, aber dennoch sich vorstellen können, die maximal zulässige Menge an Düngemitteln auszubringen, um die Produktion zu steigern. Entsprechend handelt es sich hierbei vom Typ her um einen psychologischen Rebound-Effekt.

Ausmaß eines möglicher Rebound-Effektes: Wie groß ist der Rebound-Effekt

Es fehlen Informationen zur Größenordnung der Effekte.

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Die Ausprägung von möglichen Rebound-Effekten hängt von der Ausgangslage vor der Einführung neuer digitaler Agrartechnologien und speziell den betrieblichen Bedingungen ab. Außerdem spielen die naturräumlichen Bedingungen und die Beschaffenheit der Betriebsflächen, der Pflanzenanbau und -systeme eine wichtige Rolle. Es ist anzunehmen, dass ökonomische Kalküle, Routinen und Einstellungen der Landwirte je nach Ausprägung entweder mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern können. Die Kosten für z. B. Düngemittel sind hier besonders relevant. Auch Ordnungsrecht dürfte eine wichtige Rolle spielen.

Datenlage

Belastbare Daten zu möglichen Rebound-Effekten des Precision Farming liegen nicht vor.

A.2.2 Cyber Physical Systems in der Produktion

Definition

Cyber Physical Systems (CPS) beschreiben ein vollständiges, real-vernetztes System, bei dem die Interaktion zwischen den Komponenten möglich ist und das auch die Möglichkeit bietet, Einfluss auf die Komponenten zu nehmen. CPS dienen der Prozesssteuerung und sind eine grundlegende Technologie für die als Industrie 4.0 bezeichnete Digitalisierung der Produktion (Berg & Ramesohl 2019). Die klassische, zentral gesteuerte Produktionshierarchie wird durch dezentrale Selbstorganisation abgelöst. So sollen vernetzte Lösungen für die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation entstehen, die mithilfe von Sensoren und Aktoren Prozesse der physikalischen Welt erkennen, sie mit der virtuellen Softwarewelt verbinden und in Interaktion mit Menschen interpretieren, bewachen und steuern.

Ziele und Einsatzbereiche

Ziel ist es, die Industrie auf diese Weise insgesamt effizienter zu machen. Die Produktion soll flexibler und schneller an die Nachfrage und die Kundenwünsche angepasst werden und gleichzeitig den Bedarf an Rohstoffen und Energie senken. Die dabei eingesetzten Technologien und Anwendungsmöglichkeiten sind äußerst vielfältig, d. h. zu den technologischen Elementen gehören z. B. die Vernetzung von Sensoren und Aktoren, der Einsatz digitaler Objektgedächtnisse, dezentrale Steuerung, dynamisch kooperierende Systeme und Modularisierung sowie die Einführung und Verwendung von Ortungs- und Lokalisierungssystemen, Zustandsüberwachung, prädiktive Wartung, durchgängige Datenintegration, virtuelle Produktentwicklung und Cloud-Computing. Im Idealfall umfasst die "intelligente" Produktion

alle Bereiche der Wertschöpfungskette bzw. alle Lebensphasen eines Produktes, so dass diese von der Konzeption über die Entwicklung, Fertigung, Nutzung und Wartung bis hin zum Recycling reicht.

Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Verschiedene Industrieverbände sehen in der Realisierung von Cyber Physical Systems in der Produktion ein erhebliches Ressourceneffizienzpotenzial. Darin spiegelt sich das Interesse der vertretenen Unternehmen wider, die Vorteile ihrer verfolgten Technologiestrategien darzustellen. Fallanalysen lassen aber eher niedrige Ressourceneffizienzpotenziale vermuten. Karl & Zitzmann (2018) schätzen, dass der Einsatz von virtuellen Simulationsmodellen parallel zu physischen Prozessen und Maschinen das Potenzial hat, den Energie- und Rohstoffbedarf zu senken und einen Produktivitätszuwachs von 10 % zu erzielen. Die erhöhte Prozesstransparenz durch Datenerfassung und -aufbereitung kann zu jährlichen Effizienzsteigerung von mindestens 3,3 % innerhalb der Industrie führen. Durch den Einsatz der additiven Fertigung können Abfälle in der Produktion vermieden werden. Die Produktion vor Ort reduziert außerdem den Ressourceneinsatz des Transports. Zunehmender Einsatz von RFID-Chips könnte zu einer beschleunigten Identifikation, kürzeren Durchlaufzeiten und somit einer erhöhten Energieeffizienz beitragen (Karl & Zitzmann 2018). Fallstudien des VDI-ZRE (Schebek et al. 2017) zeigen ebenfalls, dass Unternehmen durch Praxisanwendungen¹⁸ im Kontext von Industrie 4.0 Ressourcen einsparen können. Genauer gesagt werden die Ressourceneinsparpotenziale (durch Verringerung des Stromverbrauchs und des Materialeinsatzes, Vermeidung oder Verminderung von Abfällen, Einsparung von Transporten, Reduzierung fehlerhafter Teile und damit Ausschuss und Einsparung von Lagerraum) auf bis zu 25 % (von den Unternehmen) geschätzt, teilweise darüber. Allerdings ergibt sich aus szenariobasierten Ökobilanzierungen, die das VDI-ZRE beispielhaft für zwei Anwendungen durchgerechnet hat, ein deutlich differenziertes Bild als es die Schätzungen vermitteln. So weist die Praxisanwendung „Druckluft-Leckage-App“¹⁹ eine positive Bilanz hinsichtlich des CO₂-Aufwands und der CO₂e-Einsparung auf, während die Praxisanwendung „Data on a Stick“²⁰ eher negativ ausfällt (Schebek et al. 2017). Dies zeigt deutlich, dass eine spezifische Betrachtung hinsichtlich Einsparungen und Aufwänden notwendig ist.

Mögliche Rebound-Effekte

Studien zeigen, dass die Modernisierung von Produktionsprozessen gemäß Industrie 4.0 zwar zu Effizienzgewinnen führen dürfte, in vielen Fällen jedoch keine signifikante Reduzierung des Material- und Energieverbrauchs nachgewiesen werden kann (Fritzsche et al. 2018).

Wirkmechanismen

In Bezug auf Industrie 4.0 können Rebound-Effekte auftreten, wenn Unternehmen aufgrund der Effizienzgewinne mehr produzieren oder wenn neue Anwendungen von Technologien zu zusätzlichem Ressourcenverbrauch führen. Die Wirkmechanismen liegen „in einer absoluten Steigerung der Produktion, einer Tendenz, sich im Laufe der Zeit ausschließlich auf die

18 Zu folgenden Praxisanwendungen gehören Optimierte Geschäftsprozesse, Druckluft- Leckage-App, One Piece Flow, Warehouse Management System, Data on a Stick, Virtuelle Produktsimulation, Business Warehouse System, Virtuelle Produktfertigung im Prototypenbau, Cloud- basierte Fertigung, FoamCreator.

19 Die "Druckluft-Leckage-App" ist eine Anwendung die entwickelt wurde, um Lecks in industriellen Druckluftsystemen schnell zu erkennen und um Energieverlusten zu beheben. Relevante Daten zur Leckgröße, zu Energie- und Kostenverluste, Reparaturvorschläge und erste Kostenschätzungen werden an einen internen Server im Unternehmen übermittelt und verwaltet.

20 Um eine papierlose Fertigung zu erreichen, wurden Datenträger in den Produktionsprozess integriert, auf denen alle Herstellungsschritte aufgezeichnet werden. Diese Datenträger begleiten jedes Produkt, erfassen alle produktspezifischen Informationen und speichern sie zentral im unternehmenseigenen MES-System. Vor der Implementierung dieser Lösung wurden Produktions- und Produktdaten manuell auf Reinraumpapier festgehalten.

Prozesseffizienz zu konzentrieren, und einem Versäumnis, das Potenzial der Digitalisierung im Umweltmanagement von Unternehmen auszuschöpfen“ (Beier et al. 2020). Wenn Produkte durch Digitalisierung effizienter und damit preisgünstiger hergestellt werden können, ist mit Rebound-Effekten zu rechnen (Schebek et al. 2017). Die Plattform Industrie 4.0 konstatiert, dass „neben der digitalen Infrastruktur positive Umweltaspekte von nachhaltigen Geschäftsmodellen vor allem durch eine vermehrte Nutzung aufgehoben“ werden (Plattform Industrie 4.0 2021, S. 8).

Die Wirkmechanismen entsprechen denen des „Preis-Rebounds“. Aufgrund von Effizienzgewinnen werden Produkte kostengünstiger, was wahrscheinlich zu einer Nachfragerhöhung führt. Zusätzlich könnte die flexible Anpassung der Produktion an Kundenwünsche die Nachfrage nach individualisierten Produkten auslösen, was wiederum zu einem Mehrkonsum führen könnte. Außerdem wäre es möglich, dass die durch die Individualisierung der Produktion die Vielfalt der Produkte zunimmt und dadurch das Recycling der Produkte erschwert wird.

Ausmaß möglicher Rebound-Effekte

Berner et al. (2022) haben wachstumsinduzierte Rebound-Effekte für das deutsche Verarbeitende Gewerbe untersucht. Er beträgt 4,5-5,3 %. Angesichts der Vielfalt der Anwendungen im Kontext von Industrie 4.0 und der fehlenden Empirie lässt sich das Ausmaß spezifischer Rebound-Effekte, die auf die Digitalisierung im Kontext von Industrie 4.0 - Anwendungen zurückzuführen sind, aber nicht abschätzen. Da Wachstum oftmals mit Digitalisierung in Unternehmen verbunden ist, wäre zu vermuten, dass mögliche Rebound-Effekte sich in dieser Größenordnung bewegen. Dabei ist zu betonen, dass die Eigenschaften der Unternehmen und ihre Investitionsentscheidungen zu deutlich heterogenen Effekten führen, wie Berner et al. (2022) in ihrer Analyse feststellen.

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Die genaue Ausprägung von Rebound-Effekten in Bezug auf Industrie 4.0 hängt von vielen Faktoren ab, z. B. von der Branche, den spezifischen Technologien und den Unternehmenspraktiken. Auch die Prozesseffizienz, Steigerung der Produktion, Kosteneinsparungen, Preiseffekte und Preiselastizität spielen dabei eine Rolle. Die Realisierung von Potenzialen und die Vermeidung von Rebound-Effekten hängen auch von einem ganzheitlichen Management von Energie- und Ressourceneffizienz in Unternehmen (Wolff et al. 2023) und von der Schaffung adäquater Anreize, Rahmenbedingungen und Verpflichtungen seitens der Politik ab (Fritzsche et al. 2018).

Datenlage

Die Potenzialabschätzungen der Auswirkungen von Industrie 4.0 berücksichtigen keine Rebound-Effekte. Während es für die Abschätzung direkter und indirekter Umweltfolgen für einzelne Anwendungen eine gewisse empirische Basis gibt (insbesondere Schebek et al. 2017), stehen Aussagen über langfristige Effekte von Industrie 4.0 noch auf wenig gesichertem Boden. Es werden bis dato nur Einzelaspekte beleuchtet, bisher aber keine umfassenden integrierenden ökologischen Analysen des Zusammenhangs von Industrie 4.0 und Rebound-Effekten durchgeführt.

A.2.3 Additive Fertigung

Definition

Generative additive Fertigung, auch bekannt als 3D-Druckverfahren, ist eine Fertigungstechnologie, bei der dreidimensionale Objekte schichtweise aufgebaut werden, während Baumaterialien entweder in flüssiger oder pulverförmiger Form zum Einsatz kommen. In Gegensatz dazu erfolgt die herkömmliche Serienfertigung von Produkten üblicherweise durch konventionelle Fertigungsmethoden wie Gießen, Fräsen oder Schmieden (Bierdel et al. 2019; Fastermann 2016). Das 3D-Druckverfahren basiert auf CAD-Modellen (Computer-Aided Design). Dabei handelt es sich um virtuelle Darstellungen und Modellierungen von dreidimensionalen Objekten, die mithilfe digitaler Software erstellt werden. Diese Modelle enthalten detaillierte Informationen über die geometrischen Parameter (Proportionen, Größe, Struktur etc.) sowie andere Eigenschaften des zu druckenden Objekts. CAD-Modelle dienen als Ausgangspunkt für den 3D-Druckprozess, indem sie dem Drucker die erforderlichen Anweisungen zur Erzeugung des physischen Objekts liefern (Fastermann 2016).

Ziele und Einsatzbereiche

Das additive Fertigungsverfahren gilt als Schlüsseltechnologie der Digitalisierung, insbesondere im Kontext von Industrie 4.0. Es handelt sich um ein Herstellungsverfahren zur schnellen Fertigung von Prototypen, Werkzeugen und zunehmend auch Endprodukten (Fastermann 2016). Derzeit steht der Einsatz von 3D-Druckverfahren kurz davor, kleine bis mittelgroße Serien zu produzieren. Zukünftig wird dieser vermehrt von kleinen und mittleren Unternehmen im produzierenden Gewerbe genutzt, insbesondere in Branchen wie Luft- und Raumfahrt, Medizintechnik sowie für bionische Produktkonzepte (Bierdel et al. 2019).

Erwartete Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Den additiven Fertigungsverfahren wird generell eine positive Ökobilanz zugesprochen, da sie es ermöglichen, Bauteile „endkonturnah“ herzustellen, was im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren wie Drehen oder Fräsen zu minimalem oder keinem Abfall führt. „So wird zum einen nur dort Material eingesetzt, wo es im Bauteil auch tatsächlich benötigt wird. Zum anderen ist es möglich, überschüssiges Material, wie es u. a. beim SLM-Verfahren²¹ im Pulverbett anfällt, relativ einfach aufzubereiten und wiederzuverwenden.“ (Witt et al. 2020, S.87). Ein weiteres Potenzial der Additiven Fertigung liegt in dem (zumindest theoretisch) verringerten Energieaufwand während des Transports und Logistik der fertigen Produkte. Aufgrund der Möglichkeit zur dezentralen Produktion mittels additiver Fertigungsverfahren können entsprechende Bauteile in unmittelbarer Nähe des Einsatzortes produziert werden. Darüber hinaus lassen sich während des Gebrauchs additiv gefertigter Bauteile Energieeinsparungen erzielen. So erleichtert die ausgeprägte geometrische Freiheit bei additiven Fertigungsverfahren die Konstruktion von Bauteilen. Zusätzlich führt die vorwiegend einheitliche Materialzusammensetzung additiv gefertigter Bauteile zu einer effektiveren Recyclingphase. Ebenso kann die Substitution von Einzelteilen durch ein einziges additiv gefertigtes Bauteil die Wiederverwertung am Ende der Lebensdauer erleichtern. Weiterhin bieten additive Technologien die Möglichkeit zur Reparatur von Komponenten, was Einsparungen ermöglicht, da Bauteile nicht vollständig ersetzt werden müssen, sondern nur erneuert werden (Witt et al. 2020). Der 3D-Druck für den Eigengebrauch könnte künftig die Möglichkeit bieten, Reparaturen zu Hause zu erleichtern, indem schnell und einfach Ersatzteile hergestellt werden können, die im Handel nur selten oder gar nicht erhältlich sind, und so die Lebensdauer der Produkte verlängern (Keppner et al. 2018). Laut des Instituts

21 Das LBM-Verfahren steht für Laser Beam Melting (Laserstrahlschmelzen). Bei diesem Verfahren wird ein Laserstrahl verwendet, um schichtweise Metallpulver zu schmelzen und dadurch dreidimensionale Bauteile zu erzeugen.

für ökologische Wirtschaftsforschung erscheinen additive Verfahren „durchaus als vorteilhaft, da sie beispielsweise als sehr materialeffizient gelten: so wird dem generativen Produktionsprozess *erstens* zugeschrieben, quasi keinen Abfall zu generieren, da nur das tatsächlich benötigte Rohmaterial verarbeitet wird. *Zweitens* können in dreidimensionalen Produktionsprozessen besonders komplexe Leichtbaustrukturen realisiert werden, die sich im Lebenszyklus entsprechender Bauteile positiv auswirken. *Drittens* sollen energetische Mehraufwände beispielsweise durch den Bedarf zusätzlicher Werkzeugmaschinen oder den Transport zwischen verschiedenen Produktionsschritten im Fall generativer Fertigung weitestgehend ausgeschlossen werden. [*Viertens* kann] in dezentralisierten Wertschöpfungssystemen darüber hinaus der Aufwand für Transport und Logistik deutlich gemindert werden [...]“ (Petschow et al. 2014, S.26-27). Betont wird aber auch, dass es sich hierbei um eine verkürzte Darstellung handelt und dass potenzielle ökologische Risiken ebenfalls berücksichtigt werden sollten (Petschow et al. 2014).

Mögliche Rebound-Effekte

Wirkmechanismen

In einer Ökobilanzierung von Bierdel et al. (2019) wird der Energie- und Ressourcenverbrauch von additiven LBM-Fertigungsverfahren (Al-Si10Mg und Scalmalloy²²) im Vergleich zu einem konventionellen Fertigungsverfahren in der industriellen Produktion von Dämpfergabel für Pkw verglichen. Die konventionelle Fertigung erfordert einen deutlich geringeren Energieaufwand (250 MJ-eq./FE) im Vergleich zu den additiven Verfahren (1.080 MJ-eq./FE für Al-Si10Mg und 2.230 MJ-eq./FE für Scalmalloy). Auch der Rohstoffbedarf ist bei der konventionellen Fertigung geringer (20 kg/FE gegenüber 70 bzw. 125 kg/FE) sowie der Wasserverbrauch (22 m³/FE gegenüber 69 bzw. 145 m³/FE) und die CO₂-Emissionen (19 kg CO₂e/FE gegenüber 60 bzw. 160 kg CO₂e/FE). Insgesamt lässt sich feststellen, dass die additive Fertigung im Vergleich zur konventionellen Art über alle umweltbezogenen Kategorien hinweg signifikant stärkere Auswirkungen hat. Dies lässt sich insbesondere „auf den hohen elektrischen Grundverbrauch der LBM-Anlage zurückführen und deutet auf eine Anlagentechnik mit Optimierungspotenzial hinsichtlich der Energieeffizienz hin“ (Bierdel et al. 2019, S.16). Aufgrund des höheren Energieaufwands könnten materielle Rebound-Effekte auftreten.

Eine weitere Ökobilanzierung zeigt, dass Umweltbelastungen durch die Art des Druckverfahrens, die verwendeten Materialien sowie die Art der Nutzung des 3D-Drucks verursacht werden können. Die Druckdauer sowie die Häufigkeit bzw. die Intervalle der Nutzung könnten sich auf den Energieverbrauch auswirken. Ein Drucker, der selten verwendet wird oder lange Leerlaufzeiten zwischen den Druckaufträgen hat, verbraucht aufgrund des wiederholten Aufheizens erheblich mehr Energie. Wenn der 3D-Drucker nicht kontinuierlich in Betrieb ist und nicht maximal ausgelastet ist, könnte sich der Energieverbrauch pro Produkt um das Zehnfache erhöhen²³. Betont wird ebenfalls, dass 3D-Druckverfahren unter bestimmten Bedingungen einen geringeren Energieverbrauch aufweisen können als andere Herstellungsverfahren (Keppner et al. 2018). Allerdings bewertet Petschow et al. (2014) den bisherigen Energieaufwand zur Herstellung 3D-gefertigter Produkte allgemein als hoch. „Zwar ist dieser Vergleich gegenüber herkömmlichen Verfahren nicht ganz gerecht, da die spezifischen Potenziale der Produktgestaltung (Leichtbau, Modularität usw.) dabei unberücksichtigt bleiben,

22 Scalmalloy und Al-Si10Mg sind spezifische Legierungen, die in der additiven Fertigung verwendet werden.

23 Die Differenz in Energieverbrauch variiert jedoch beträchtlich je nach dem angewandten Verfahren. Beispielsweise zeigt sich beim Fused Deposition Modeling, als extrusionsbasiertes Verfahren, kaum ein Unterschied im Energieverbrauch, ob das Druckgerät vollständig ausgelastet ist oder nur ein einzelnes Produkt hergestellt wird. Im Gegensatz dazu verbraucht das Laser-Sintern-Verfahren (pulverbasiert) unter Vollausslastung 98 % weniger Energie pro gedrucktem Produkt. Dies liegt vor allem an den hohen Energieanforderungen für das Aufwärmen und Abkühlen des Pulvermaterials (Keppner et al. 2018)

jedoch erscheinen abgesehen davon vor allem die häufig verwendeten Lasertechnologien bisher energetisch besonders ineffizient“ (S.28). Trotzdem zeigt sich eine allgemeine Beurteilung des Energieaufwands verschiedener Verfahren als schwierig, da die Nachhaltigkeit dieser Verfahren von verschiedenen Faktoren abhängt, darunter die Produktart und -anzahl (Keppner et al. 2018).

Außerdem ist der aktuelle Materialeinsatz noch hauptsächlich auf Kunststoffe und Metalle beschränkt, was das Risiko birgt, dass Ressourceneinsparungen durch diese begrenzte Auswahl und den verstärkten Einsatz bestimmter Rohstoffe beeinträchtigt werden. Die Entsorgung solcher Produkte würde zusätzliche Herausforderungen im Recycling mit sich ziehen, insbesondere bei komplexeren 3D-Produkten, die aus verschiedenen Materialien bestehen (Stahl 2013; Faludi et al. 2015). „Bezüglich der Rohstoffeffizienz wird das Argument der abfallfreien Produktion teilweise relativiert werden, denn auch beim 3D-Druck entstehen Abfälle während der Produktion, unter anderem durch Stützstrukturen, Fehldrucke und die Degradation von Material. [...] Bisher fehlen außerdem Standardisierungen für Design und Best Practice-Vorgaben – aus dem CAD-Modell können so Objekte entstehen, die sich bezüglich ihrer Oberfläche und Lagetoleranz unterscheiden. Grund hierfür sind die unterschiedlichen verwendeten Druckverfahren, Materialien und die Positionierung des Modells. Dadurch können mehrere Versuche notwendig werden, bis das Objekt den Anforderungen entspricht, so dass Fehldrucke anfallen. In Zukunft kann auch das Hinzufügen von Elektronik und Schaltkreisen während des Druckprozesses den Prozess verkomplizieren und zusätzliche Fehldrucke auslösen“ (Keppner et al. 2018, S.24). „Obwohl generative Verfahren idealtypisch nur das Material verbrauchen, das tatsächlich zur Herstellung eines Produkts notwendig ist, fallen in vielen Anwendungen aktuell noch Abfälle durch nachträgliches Bearbeiten oder die begrenzte Wiederverwendbarkeit des nicht genutzten Rohmaterials an“ (Petschow et al. 2014, S.28).

Es wird vermutet, dass Kosteneinsparungen durch Reduktion von Lagerkosten und Stehzeiten in Fertigungsprozessen, geringeren Materialeinsatz und Gewichtsersparungen (Seebauer et al. 2018) zu Preissenkungen führen könnten, welche wiederum eine steigende Nachfrage zur Folge haben könnten. Allerdings dürfte es die Kosteneinsparungen nur für Einzelprodukte oder eventuell Kleinserien geben (Preis-Rebound).

Des Weiteren könnte die Bereitstellung von personalisierten 3D-Druckern im privaten Bereich neue Bedürfnisse schaffen, die zuvor so nicht existierten (Petshow et al. 2014). Bisher beschränkt sich der private Einsatz von 3D-Druck vor allem auf bestimmte Anwendungen wie beispielsweise Dekoration. Eine Bestätigung hierfür liefert auch ein Blick in die Plattform Thingiverse, auf der Nutzer*innen ihre eigenen erstellten 3D-Designs zum Austausch zur Verfügung stellen können. Obwohl dort auch Designs für Ersatzteile geteilt werden, liegt der Schwerpunkt hauptsächlich auf Kunst-, Mode-, Gadgets- und Hobby-Designs (Keppner et al. 2018). Es kann ebenfalls damit gerechnet werden, dass die Nutzungszeit von Produkten verkürzt wird, wenn Verbraucher*innen problemlos immer wieder neue Varianten selbst herstellen können. Dies könnte in der Folge zu einem erhöhten Verbrauch von Materialien führen, anstelle einer Ressourcenschonung (Stahl 2013). Es könnten Komfort-Rebound-Effekte auftreten, da die relativ einfache Herstellung von Produkten durch 3D-Druck zu einer Mehrproduktion führen könnte (Petschow et al. 2014; Stahl 2013). Mit der zunehmenden Verbreitung des 3D-Drucks könnte es ebenfalls zu einer deutlichen Zunahme von sogenannten nonsense-Objekten führen, die keinen wirklichen Mehrwert für Nutzer*innen bzw. Verbraucher*innen bieten (Keppner et al. 2018). Wenn aufgrund unzureichender technischer Kenntnisse fehlerhafte Objekte (sogenannte "crappy objects") ausgedruckt werden oder Objekte kontinuierlich angepasst und verbessert werden, könnte unnötiger Abfall produziert werden (Keppner et al. 2018).

Ausmaß eines möglichen Rebound-Effektes: Wie groß ist der Rebound-Effekt

Es liegen keine Studien vor, welche mögliche Rebound-Effekte von 3D-Druckverfahren quantifizieren.

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Das Potenzial der Technologie zur Belastung oder Entlastung hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter das Druckverfahren, die verwendeten Materialien sowie das spezifische Anwendungsfeld oder das gedruckte Objekt im Vergleich zu anderen Produktionsverfahren. Zusätzliche Faktoren wirken sich auf den Energieverbrauch beim 3D-Druck aus, darunter die Druckdauer, die Häufigkeit bzw. die Intervalle der Nutzung sowie Gesamtauslastung (Keppner et al. 2018; Witt et al. 2020). Dazu zählen auch der Grad der räumlichen Dezentralisierung, die Wahl der Ausgangsmaterialien sowie deren Einbettung in die Wertschöpfungskette (Petschow et al. 2014).

Datenlage

Die mangelnde quantitative Erforschung der Umwelteffekte additiver Fertigungsverfahren führt dazu, dass die qualitativen Erkenntnisse größtenteils auf Vermutungen und Einschätzungen basieren. Bislang wurden nur vereinzelt systematische Daten zu den Umweltwirkungen erhoben worden. Die geringe Anzahl an quantitativen Untersuchungen sowie deutliche Unterschiede in den Fragestellungen, Forschungsdesigns, Auswahl des Druckverfahrens sowie Nutzungskontexte, in denen sich entsprechende Geräte einbetten, erschweren die Durchführung eines direkten Vergleichs (Petschow et al. 2014). Es wurden Ökobilanzierungen durchgeführt (Petschow et al. 2014; Faludi et al. 2015; Keppner et al. 2018; Steiner 2018; Bierdel et al. 2019), dennoch besteht weiterhin der Bedarf, den tatsächlichen Energie- und Materialverbrauch zu erforschen, der mit der Herstellung und Nutzung eines additiv gefertigten Bauteils über seinen gesamten Lebenszyklus einhergeht. Bislang gibt es noch Unklarheiten und keine eindeutigen Schlussfolgerungen darüber, ob die additive Fertigung tatsächlich so ressourcenschonend ist, wie häufig behauptet wird (Witt et al. 2020). So besteht weiterhin Unsicherheiten und Interpretationsspielraum hinsichtlich der ökologischen Bewertungen des 3D-Druckprozesses (Steiner 2018).

A.2.4 Digitaler Produktpass

Definition

Der Digitale Produktpass (DPP) ist „eine strukturierte Sammlung produktbezogener Informationen mit vorab definiertem Umfang, die auf elektronischem Wege über einen digitalen Datenträger zugänglich sind“ (Piétron et al. 2023, S.12). Er umfasst Daten aus dem gesamten Produktlebenszyklus (einschließlich Rohstoffbeschaffung, Zusammensetzung, Verarbeitung, Design, Nutzung, Demontage, Reparatur und Entsorgung am Ende der Lebensdauer) (Götz et al. 2021).

Ziele und Einsatzbereiche

Sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene wird das Konzept des Digitalen Produktpass als wegweisendes und zentrales Instrument für den Datenaustausch in der Kreislaufwirtschaft betrachtet. Erstmals wurde ein solcher DPP im EU Green Deal von 2019 als Instrument genannt und in der geplanten EU-Ökodesign-Verordnung von 2022 näher konkretisiert. Zum jetzigen Zeitpunkt zeichnet es sich ab, dass die EU-Ökodesign-Verordnung nach Abschluss der aktuellen Verhandlungen zwischen der Europäischen Kommission, dem Europäischen Parlament und dem Europäischen Rat bis zum Jahr 2024 in Kraft treten wird.

Frühestens ab den Jahren 2026 oder 2027 werden voraussichtlich die ersten delegierten Rechtsakte für spezifische Produktgruppen zur Verfügung stehen (Neligan et al. 2023). Laut dem Green Deal sollen bis zum Jahr 2030 alle ressourcenintensiven Produkte mit einem Digitalen Produktpass ausgestattet sein (Alt et al. 2023). Aktuell bedarf es jedoch noch einer klaren Ausgestaltung des Passes, wobei die Berücksichtigung von Informationstransparenz als Ziel von entscheidender Bedeutung ist (Lell et al. 2020). Der Produktpass soll eine kontinuierliche Bereitstellung von Informationen zum Produkt und seiner Umweltwirkungen entlang des gesamten Lebenszyklus ermöglichen, und zwar über Unternehmensgrenzen hinweg (Ramesohl et al. 2022). Infolgedessen soll er darauf ausgerichtet sein, „allen relevanten Akteursgruppen [zu] dienen, von Unternehmen zur Erleichterung von Berichtspflichten, über Verbraucher*innen für nachhaltige Konsumententscheidungen bis hin zu Reparaturbetrieben und Unternehmen der Recyclingwirtschaft“ (Götz et al. 2021, S.19).

Erwartete Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Eine Studie, durchgeführt von acatech in Zusammenarbeit mit Circular Economy Initiative Deutschland und SYSTEMIQ, hat konkrete Handlungsempfehlungen für den Aufbau einer Kreislaufwirtschaft in Deutschland erarbeitet. Diese umfassen u. a. die Einführung neuer zirkuläre Geschäftsmodelle, Standardisierung in verschiedenen Produktsystemen sowie die Verbesserung der Transparenz entlang der Lieferketten. Besonderes betont wird die Bedeutung eines sicheren und vertrauenswürdigen Datenaustausch während der Prozesse sowie in diesem Zusammenhang die Rolle Digitaler Produktpässe als zentraler Treiber für die Transformation und Umsetzbarkeit (Kadner et al. 2021). Laut dem Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) kann der Digitale Produktpass „bei einer transparenten und zielgerichteten Ausgestaltung einen wichtigen Beitrag zu einer sozial-ökologische Ressourcenwende sowie zu Kreislaufwirtschaft, Klima- und Verbraucherschutz leisten“ (Korduan et al. 2023, S.3). Auch Germanwatch e.V. sieht die Bedeutung des Digitalen Produktpasses als Instrument, um „den Weg zu einer grüneren, kreislaforientierten und sozial gerechten Wirtschaft zu ebnen“ (Denter et al. 2023, S.1). Indem er relevante Informationen für Reparatur-, Wiederaufbereitungs- oder Recyclingbetriebe bereitstellt, trägt er dazu bei, dass Produkte und ihre Bestandteile möglichst lange im Kreislauf bleiben. Dadurch kann er einen Beitrag zur Verlängerung von Produktlebenszyklen leisten und somit den Ressourcenverbrauch reduzieren. Darüber hinaus könnte er durch die Bereitstellung einer Informationsbasis zur Optimierung der Material- und Energieeffizienz beitragen. Er ermöglicht zudem Verbraucher*innen den Zugang zu wichtigen Produktinformationen wie CO₂-Fußabdruck, Reparierbarkeit und Haltbarkeit, um sie bei ihren Kaufentscheidungen zu unterstützen. Auf der Verwaltungs- und Kontrollebene unterstützt er bei der Einhaltung und Überwachung von Sorgfaltspflichten entlang der Wertschöpfungskette und hilft dabei, Greenwashing aufzudecken bzw. zu verhindern, während er gleichzeitig den bürokratischen Aufwand für Unternehmen verringert. Die Realisierung dieses Potenzials hängt maßgeblich von der Gestaltung der Produktpässe ab (Denter et al. 2023).

Mögliche Rebound-Effekte

Wirkmechanismen

„Die künftige Transparenz durch den digitalen Produktpass ermöglicht einen faireren Wettbewerb am „Nachhaltigkeitsmarkt“. Die Verfügbarkeit von umfassenden Informationen wird dazu beitragen können, das Vertrauen von Verbrauchenden in produktbezogene Nachhaltigkeitsaussagen zu stärken und bei entsprechender Nachfrage nachhaltigen Wirtschaftsakteuren Wettbewerbsvorteile und eine größere Marktmacht zu verleihen“ (Beitz et al. 2023, S.2). Gleichzeitig könnte diese Transparenz und Rückverfolgbarkeit materielle

Rebound-Effekte verursachen und den Konsum steigern, da Verbraucher mehr Produkte kaufen, weil diese als nachhaltig wahrgenommen werden (Ellsworth-Krebs et al. 2022).

Derzeit gibt es noch eine unzureichende Datenlage bezüglich des Energie- und Ressourcenverbrauchs des DPP-Systems, also der digitalen Infrastruktur hinter dem DPP. Die Aktivitäten der Datenspeicherung, -verarbeitung und -übertragung sind mit eigenen ökologischen Fußabdrücken verbunden, die durch den Bedarf an digitaler Infrastruktur (wie Datenträgern, Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen) sowie notwendigen Geräten (wie Datenlesegeräten) entstehen. In diesem Zusammenhang könnten materielle Rebound-Effekte entstehen. Um eine realistische Bewertung des Klima- und Umweltnutzens des Digitalen Produktpasses zu ermöglichen, sind umfassende Vorstudien erforderlich. Insbesondere sollte erforscht werden, ob „sein tatsächliches Potenzial zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs größer ist als der eigene Energie- und Ressourcenbedarf des DPP-Systems selbst“ (Denter et al. 2028, S.8). Ebenfalls wichtig ist die Bestimmung der geeigneten Art von Datenträgern unter Berücksichtigung ihrer Ressourcenintensität (Denter et al. 2023).

Eine Betrachtung der digitalen Infrastruktur zeigt sowohl technische als auch ökologische Herausforderungen bei der Datenbereitstellung und -verfügbarkeit. Insbesondere der Betrieb von Computern zur dezentralen Speicherung, Verarbeitung und Abrufung von großen produktbezogenen Datenmengen könnte einen hohen Energie- und Ressourcenverbrauch nach sich ziehen (von Geibler & Gnanko 2022; Piétron et al. 2023). Um eine minimale Datenmenge zu gewährleisten, könnten große Dateien wie Reparaturanleitungen und Bilder nicht direkt auf dem Pass gespeichert, sondern durch Links verknüpft werden (Korduan et al. 2023). Die flächendeckende Einführung einer Digitalen Produktakte und die damit einhergehende horizontale Vernetzung zahlreicher Unternehmen werden in Zukunft weitere Herausforderungen mit sich bringen. „Ein großer Teil produktspezifischer Daten sollte zukünftig nicht x-fach bei allen im zirkulären Wertschöpfungsnetzwerk beteiligten Unternehmen multipel, sondern [...] redundanzfrei vorgehalten werden“ (Schuh et al. 2023, S.184). Ebenso kann der Einsatz von NFC- oder RFID-Chips zur Identifizierung von Produkten den Bedarf an Metallen wie Silizium oder Gold erheblich erhöhen, wenn sie in großem Umfang eingesetzt werden (Piétron et al. 2023). Angesichts dieses Zielkonfliktes zwischen digitalem Datenaustausch und Nachhaltigkeit muss geprüft werden, ob der Mehrwert durch die verbesserte Verfügbarkeit von Produktdaten sowie die Rückführung und Recyclingfähigkeit von Materialien die ökologischen Kosten übersteigt. Bei diesen Produktdaten ist im Vergleich zu Social-Media- oder Streaming-Plattformen grundsätzlich mit geringeren Datenmengen zu rechnen, doch eine systemische Bewertung steht noch aus (Piétron et al. 2023).

Ausmaß eines möglichen Rebound-Effektes: Wie groß ist der Rebound-Effekt

Es gibt keine vorhandenen Studien, die die Größe des Rebounds-Effekte des Digitalen Produktpass empirisch untersucht haben.

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Das Ausmaß des Rebound-Effektes hängt u. a. von den technologischen Voraussetzungen ab. Dazu gehört die inhaltliche Ausgestaltung des Passes und der dafür benötigten Datenmenge. Große Dateien wie Reparaturanleitungen und Bilder könnten durch Links statt direkter Speicherung auf dem Pass bereitgestellt werden (Korduan et al. 2023). Weitere Faktoren sind der Einsatz von speziellen Chips, die jährlich umgetauscht werden müssen (Ramesohl et al. 2022; Schuh et al. 2023; Piétron et al. 2023), sowie das Kaufverhalten von Verbraucher*innen (Beitz et al. 2023; Ellsworth-Krebs et al. 2022).

Datenlage

Die digitale Kreislaufwirtschaft setzt große Hoffnungen und Erwartungen in Digitale Produktpässe. Jedoch zeigt eine zuletzt erschienene Metastudie (Stede et al. 2024), dass bisher nur begrenzte Studien existieren, die sich mit diesem Konzept auseinandersetzen und die Auswirkungen in der Praxis empirisch belegen können. Ebenso weist Götz et al. (2021) auf die Forschungslücke hin und hebt die Bedeutung zukünftiger Folgeabschätzungen, Pilotprojekte und Reallaborsätze mit direkt anschließender Implementierungsphase hervor. Derzeit liegt der Schwerpunkt auf dem konzeptionellen Design und der möglichen Regulierung des Systems, sowie auf der Dateninfrastruktur und der potenziellen Integration mit anderen ähnlichen Systemen in Entwicklung (Götz et al. 2022).

A.2.5 Home-Office

Definition

Home-Office, auch Telearbeit oder Mobiles Arbeiten genannt, beschreibt eine Arbeitsform, bei der Arbeitnehmer ihre beruflichen Tätigkeiten ganz oder teilweise außerhalb der eigentlichen Büroräume oder Betriebsstätten ausüben, entweder an einem eingerichteten Arbeitsplatz im Privatbereich oder an einem anderen entfernten Ort. Zur technischen und digitalen Ausstattung für ein Home-Office gehören Computer/Laptop mit einer stabilen Internetverbindung, zusätzliche Bildschirme, Peripheriegeräte (Tastatur, Maus, Drucker und Scanner), Headset, Lautsprecher, Webcam sowie Software und Apps (Videokonferenz-Tools, Cloud-Speicherlösungen, Instant Messaging und Chat-Apps, etc.).

Ziele und Einsatzbereiche

Bereits vor dem Ausbruch der COVID-19-Pandemie arbeiteten einige Berufstätige von zu Hause aus, jedoch erst durch die Lockdowns in den Jahren 2020 und 2021 wurde das Arbeiten im Home-Office in vielen Branchen zur neuen Normalität (Alipour et al. 2020). „Durch die plötzlich einsetzende Pandemie mussten dann Industrie, Verwaltung und Dienstleistungssektor gleichsam über Nacht an technischen, rechtlichen und organisatorischen Lösungen arbeiten, um über alle Branchen und Hierarchiestufen hinweg die Arbeitsprozesse in Gang zu halten. Dies betraf damals die Mehrzahl der Beschäftigten. Im Mai 2020 wurde dementsprechend mit knapp 40 % der Befragten der höchste Wert an orts- und zeitflexibler Arbeit gemessen. Als die Restriktionen langsam gelockert wurden und sich die Interessenlage der Arbeitnehmerschaft etwas besser strukturieren konnte, blieb der Anteil weiter hoch, im September 2022 waren es immer noch 35 % der Befragten. Im November sind es noch ein Viertel aller Beschäftigten, die in Deutschland orts- und zeitflexibel arbeiten. Im November 2023 werden durchschnittlich 2,44 Tage nicht mehr im Büro verbracht. Knapp 65 % der Befragten gehen im Übrigen davon aus, dass sie auch in Zukunft orts- und zeitflexibel arbeiten werden. Die Mehrheit präferiert tatsächlich auch zwei bis drei Tage in der Woche. Rund 14 % der Befragten sind an allen fünf Werktagen im Homeoffice“ (Follmer et al. 2024, S.21). Die Pandemie hat den Wandel der Arbeitswelt sowie die Verbreitung der Telearbeit beschleunigt und gleichzeitig das Potenzial des Home-Office hervorgehoben. Es wurden Erfahrungswerte gesammelt, sowohl betriebliche als auch gesellschaftliche Widerstände verringert und Investitionen in digitale Infrastrukturen verstärkt (Alipour et al. 2020).

Erwartete Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Seitens der Politik erkennt die Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM 2019)²⁴ die Bedeutung der CO₂-Einsparung durch die Vermeidung von Verkehr, und sieht in der Digitalisierung eine Möglichkeit, die Häufigkeit der Wege zu minimieren. In diesem Kontext erwartet sie für das Jahr 2030 ein Minderungspotenzial von 0,6 bis 1,3 Mt CO₂e durch Ausweitung der Home-Office-Nutzung. Auch seitens der Wissenschaft werden die Einsparpotenziale und direkten Auswirkungen durch verringerten berufsbedingten Verkehr quantifiziert.²⁵ kommt ebenfalls zu der Schlussfolgerung, dass Home-Office einen Beitrag zur Reduzierung von CO₂ leisten kann. Wenn 25 % der Erwerbstätigen ein bzw. zwei Tage pro Woche im Home-Office arbeiten, könnten jährlich 10,9 bzw. 20,9 Milliarden Personenkilometer und gleichzeitig 1,6 bzw. 3,2 Mt CO₂e eingespart werden. Durch ein- bzw. zweitägiges Arbeiten im Home-Office für 40 % der Erwerbstätigen könnte jährlich eine Reduzierung von 18,4 bis 35,9 Milliarden Personenkilometer sowie Emissionseinsparungen von 2,8 bis 5,4 Mt CO₂e erzielt werden. Weitere szenariobasierte Berechnungen vom Borderstep Institut (Schramm 2022; Clausen & Schramm 2021) stellen ebenfalls Einsparpotenziale in ähnlicher Höhe fest. Die Metastudie von Hook et al. (2020) verglich eine Reihe von Untersuchungen zu den THG- und Energieeffekten von Home-Office. Sie zeigt, dass durch Home-Office THG-Emissionen verringert werden kann, indem Pendelverkehr, Staus und der Energieverbrauch für Heizung, Kühlung und Beleuchtung von Büroflächen reduziert werden. Studien zum Einfluss von Home-Office auf die zurückgelegten Fahrzeugkilometer zeigen eine Bandbreite von -20 % bis +3,9 %. Studien zu Personenkilometer ergaben hingegen Reduktionen zwischen 11,9 % und 19 %. Studien zu Pendelwegen errechneten wöchentliche Reduktionen von 2,3 % bis 30 %. Studien zum Energieverbrauch stellten Einsparungen zwischen 0,01 % und 14 % fest, während Studien zu THG-Emissionen Reduktionen zwischen 0,1 % und 80 % ergaben.

Mögliche Rebound-Effekte

Ebenso schätzte das Institut für Energie- und Umweltforschung (Lambrecht et al. 2021) kurzfristige und langfristige CO₂-Minderungspotenziale für verschiedene Home-Office-Zukunftsszenarien²⁶. Dabei wurden auch mögliche Rebound-Effekte und Zusatzemissionen berücksichtigt, wodurch die Einsparpotenziale geringer ausfallen. Als Zusatzemission zählen hierbei längere Arbeitswege durch Umzug sowie Zusatzwege von Aktivitäten, die normalerweise während des Arbeitswegs kombiniert wären. Ergebnisse zeigen, dass kurzfristig der Anteil von Nutzer*innen von 13 % auf 20 % bzw. auf 40 % steigen könnte. Dies würde zu Reduktionen der Arbeitswege von 4,6 % bzw. um 13,9 % führen und Einsparungen von 1,9 bzw. 5,8 Mt CO₂e ermöglichen. Für den langfristigen Ausblick bis zum Jahr 2030 wird mit einer Steigerung des Nutzeranteils von 13 % auf 40 % bzw. 55 % gerechnet. Hierdurch könnten die Transportleistung auf den Arbeitswegen um 13,9 % bzw. 21 % gesenkt sowie die THG-Emissionen um 4,7 bzw. 7,1 Mt CO₂e pro Jahr vermindert werden. Durch die Einbeziehung von Emissionen, die ausschließlich durch zusätzliche Wege für Aktivitäten wie Einkaufen, Bring- und Holddienste, Freizeit entstehen, verringert sich das THG-Minderungspotenzial um 0,6 Mt CO₂e (bei 40 % Home-Office) bzw. um 0,9 Mt CO₂e (bei 55 % Home-Office). Dadurch würden die Emissionen

24 Es wird angenommen, dass 18 % der 3,4 Millionen Erwerbstätigen ein bis zwei Tage pro Woche im Home-Office arbeiten. Die Pendeldistanz (Hin- und Rückweg) beträgt 33,7 km pro Tag und die Pkw-Nutzung liegt bei 100 %.

25 Es werden zwei Szenarien entwickelt, in denen 25 % bzw. 40 % Erwerbstätigen ein bzw. zwei Tage pro Woche im Home-Office arbeiten. Es wurde jeweils ein Verkehrsmittelmix und eine Pendeldistanz (Hin- und Rückweg) von 32 km pro Tag angenommen.

26 Bei der Analyse der kurzfristigen Minderungspotenziale sind im konservativen Szenario 20 % und im optimistischen Szenario 40 % der Erwerbstätigen im Home-Office. In beiden Szenarien wird angenommen, dass 13 % der Erwerbstätigen 3,3 Tage pro Woche im Home-Office arbeiten. Langfristig erhöht sich im konservativen Szenario der Anteil der Nutzer von 13 % auf 40 %, und im optimistischen Szenario auf 55 %.

von 4,7 auf 4,1 Mt CO₂e pro Jahr bzw. von 7,1 auf 6,2 Mt CO₂e pro Jahr zurückgehen. Damit wird das Minderungspotenzial der eingesparten Arbeitswege um ca. 10 – 20 % vermindert. Außerdem wurden Emissionen von zusätzlichen Umzügen mit geänderten Arbeitswegen berücksichtigt, mit der Annahme, dass 20 % der Home-Office-Nutzer*innen aus städtischen Gebieten in ländliche Räume umziehen. Bis zum Jahr 2030 könnten zusätzliche Emissionen von etwa 1,5 bzw. 2,1 Mt CO₂e entstehen, was dazu führt, dass das Minderungspotenzial insgesamt um 39 % bzw. 34 % verringert wird: von 4,1 auf 2,5 Mt CO₂e bzw. von 6,2 auf 4,1 Mt CO₂e (Lambrecht et al. 2021).

Wirkmechanismen

Obwohl Home-Office den Pendelverkehr vermeiden kann, könnte es zu zusätzlichem Verkehr für andere Zwecke führen. Halbtätige Telearbeiter und Nicht-Telearbeiter tendieren dazu, private Aktivitätsziele (wie Einkaufs- und Freizeitaktivitäten, Restaurantbesuche) innerhalb einer Entfernung von 6 bis 8 km von ihrem Wohnort zu halten, während ganztätige Telearbeit Fahrtdestinationen wählen, die bis zu 20 km entfernt sind (Asgari et al. 2019). Es könnten also Zeit-Rebound-Effekte auftreten, wenn die eingesparte Zeit für längere Fahrdistanzen genutzt wird. Es könnten zusätzliche Wege anfallen, wenn an Home-Office-Tagen Zeitkapazitäten hierfür frei werden (Zeit-Rebound-Effekte) oder falls Aktivitäten wie Einkäufe, sportliche Aktivitäten oder Bring- und Holdienste nicht mehr auf dem Hin- oder Rückweg von der Arbeit erledigt werden können (Silva & Melo 2017; Lambrecht et al. 2021).

Das Home-Office könnte sich ebenfalls auf die zurückgelegten Wege des gesamten Haushalts auswirken. Wenn ein Haushaltsmitglied an einem Home-Office-Tag arbeitet, entfällt die Möglichkeit, gemeinsame Pendelstrecken zu bündeln (Rüger et al. 2020). Zudem könnte frei gewordene Fahrzeugkapazitäten durch andere Haushaltsmitglieder genutzt werden, wodurch die Effekte der Telearbeit kompensiert werden (Kim et al. 2015).

Home-Office kann den Energieverbrauch in Haushalten aufgrund der Anwesenheit während des Tages erhöhen (Nakanishi 2015; Shi et al. 2023; Crow & Millot 2020). Shi et al. (2023) haben empirisch nachgewiesen, dass Telearbeiter*innen durch das Heizen und Beleuchten ihrer Wohnräume zusätzliche Emissionen verursachen können. Insbesondere zeigen ihre Untersuchungen, dass bei Telearbeit von 1-2 Tagen pro Woche die Emissionen bis zu 17 % und bei 3-5 Tagen pro Woche um 24 – 30 % höher liegen im Vergleich zu einer Situation ohne Telearbeit. Ergänzend dazu hat Crow & Millot (2020) in seinen Berechnungen den zusätzlichen Energieverbrauch im Home-Office für Heizen und Strom berücksichtigt und ein Netto-Einspareffekt von 4,9 kg CO₂e im Sommer bzw. 3,1 kg CO₂e im Winter pro Home-Office-Tag ermittelt. Im Sommer könnten die zusätzlichen Home-Office-Emissionen gering (< 10 %) ausfallen, während im Winter fast die Hälfte des verkehrlich eingesparten Energieverbrauchs ausgeglichen wird.

Wenn Unternehmen und Institutionen ihre bisherigen Strukturen beibehalten, in denen Mitarbeiter*innen sowohl zu Hause als auch im Büro seinen eigenen Arbeitsplatz haben, könnten materielle Rebound-Effekte und zusätzliche Kosten für die räumliche und technische Ausstattung sowie den Betrieb von zwei Arbeitsplätzen entstehen (Lambrecht et al. 2021).

Das Home-Office könnte langfristig auch weitere Haushaltsentscheidungen beeinflussen, insbesondere bei der Wahl des Fahrzeugs. Für Haushalte mit mittleren und längeren Pendelstrecken stellen die Ausgaben für Kraftstoff bei Benzin- und Dieselaautos sowie für Strom bei Elektrofahrzeugen einen erheblichen Anteil des Budgets dar. Obwohl Fahrzeuge mit geringerem Verbrauch diese Kosten senken könnten, sind effizientere Modelle derselben Fahrzeugklasse häufig teurer in der Anschaffung. Durch die dauerhafte Reduzierung der Arbeitsfahrten durch das Home-Office könnten Haushalte ihre finanzielle Lage verbessern und

Geld sparen. Gleichzeitig könnte der Anreiz sinken, in ein Fahrzeug mit niedrigem und effizienterem Kraftstoffverbrauch zu investieren (Marz & Sen 2021; Marz 2022).

Die zunehmende und dauerhafte Nutzung des Home-Office könnte auch zu geänderten Wohnstandortentscheidungen und somit zu längeren durchschnittlichen Pendeldistanzen führen. Bei festen langfristigen Home-Office-Arbeitsplätzen sinkt die Anzahl der Wege und damit sowohl die finanziellen als auch die zeitlichen Aufwände. Der Umzug in das Umland und in ländliche Räume gewinnt an Attraktivität und schafft den Anreiz, von kostengünstigerem Wohnraum zu profitieren und so längere Pendeldistanzen in Kauf zu nehmen (Marz 2022). Dies könnte folglich zu einer stärkeren Streuung der Bevölkerung und einer weiteren Ausdehnung der Stadt mit größeren und weniger dichten Wohneinheiten führen. Bei der Erweiterung der privaten Wohnflächen könnten im Haushalt höhere Heizungs- und Strombedarfe auftreten, sodass sich die eingesparten Ausgaben für das Verkehrspendeln und Kraftstoffverbrauch in den Wohnbereich verlagern und Preis-Rebound-Effekte auftreten (Larson & Zhao, 2017; Marz & Sen 2021; Clausen & Schramm 2021). Komfort-Rebound-Effekte könnten sich zeigen durch eine Verlagerung des Wohnorts.

Ausmaß eines möglicher Rebound-Effektes: Wie groß ist der Rebound-Effekt

Studien haben die Spannweite der Rebound-Effekte ermittelt und hohe Werte zugeschrieben, so dass Rebound-Effekte bei 30 % (Hilty & Bieser 2017) liegen. Andere Studien legen aber auch die Vermutung nahe, „dass mobiles Arbeiten langfristig sogar zu einer Überkompensation der Einspareffekte führen kann („Backfiring“), wenn alle gesamtgesellschaftlichen Aspekte sowie indirekte Rebound-Effekte einbezogen werden (Hook et al., 2020). Die Metaanalyse kommt zu teilweise widersprüchlichen Ergebnissen, was die verkehrsbezogenen Umweltwirkungen anbelangt. Die Mehrheit der Studien deutet aber auf eine Verringerung des Energiebedarfs durch Homeoffice hin“ (Raimund 2023, S.30).

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Zu den kurzfristigen Einflussfaktoren gehören den Umfang des Home-Office, der Aufenthaltszeiten und der Anzahl der Personen zu Hause sowie den Energieverbrauch für das Heizen und Leuchten der Räumlichkeiten (was wiederum vom Energieträger, Gebäudezustand und der Wärmedämmung sowie Heizungsverhalten abhängig ist). Weitere Einflussfaktoren sind die Ausstattung und Nutzung des Fahrzeugtyps (Benzin- und Dieselaautos oder Elektrofahrzeuge), die Nutzung des ÖPNV und sowie der entsprechende Kraftstoffverbrauch. Langfristige Einflussfaktoren sind Veränderungen von Arbeitswegelängen, Verkehrsmittelwahl und Energiebedarf des Wohnens durch andere Wohnortentscheidung).

Datenlage

Die Höhe der CO₂-Einsparungen sowie die Reduktion des arbeitsbedingten Verkehrs wurden anhand von szenariobasierte Modellierungen quantifiziert (Büttner & Breitzkreuz 2020; Schramm 2020; Clausen & Schramm 2021; NPM 2019). Diese Studien variieren jedoch stark in ihren Einschätzungen über das Minderungspotenzial von Home-Office, aufgrund unterschiedlicher Annahmen über den Anteil der Beschäftigten im Home-Office sowie der Ausgangslage (teilweise werden die Home-Office-Nutzungen vor Corona berücksichtigt, teilweise nicht). Zudem wurden in den vorliegenden Studien und Berechnungen Zusatzemissionen nicht quantifiziert, obwohl Lambrecht (2021) diese in ihrer Szenarioentwicklung berücksichtigt hat.

Die empirische Datengrundlage zum alltäglichen Verhalten von Telearbeitern ist umfassend erforscht worden (Moos et al. 2006; Roth et al. 2008; Kim et al. 2015; Nakanishi 2015; Silva & Melo 2017; Asgari et al. 2019; Shi et al. 2023; Stiles & Smart 2020). Insbesondere wurden

empirische Daten zur Nutzung des Fahrzeugs sowohl von Telearbeiter*innen als auch von den andere Haushaltsmitgliedern, zum Heizungs- und Stromverbrauch im Haushalt sowie zu den längeren zurückgelegten Distanzen zu privaten Aktivitätszielen erhoben.

A.2.6 Videokonferenzen

Definition

Videokonferenzen, auch Video-Meetings, virtuelle Meetings, Online-Meeting oder Webkonferenzen genannt, bezeichnen Formate für einen synchronen Informationsaustausch zur Bild- und Tonübertragung. Teilnehmer*innen verbinden sich dabei mithilfe von Videokonferenzsoftware über das Internet, den Desktop, das Mobiltelefon oder ein Videosystem (Webex o.J.).

Ziele und Einsatzbereiche

Anbieter von Videokonferenz-Programmen sind u. a. *Microsoft Teams*, *Cisco Webex Meetings*, *Zoom*, *GoToMeeting*, *Jitsi* oder *BigBlueButton*. Videokonferenzen werden in der Regel eingesetzt, um Beschäftigte, die virtuell und remote arbeiten, miteinander zu verbinden. Virtuelle Meetings bieten eine Plattform für die Zusammenarbeit im Team, Geschäfts-Meetings, Präsentationen vor Kund*innen, Verkaufsdemos und vieles mehr. Seit der globalen Corona-Pandemie haben Videokonferenzen erheblich an Bedeutung gewonnen. Sie haben sich auf beruflicher wie privater Ebene etabliert und wurden für große Teile der Arbeitswelt unverzichtbar. Organisationen und Unternehmen setzen Videokonferenz-Lösungen ein, um Home-Office zu unterstützen und Geschäftsreisen und damit Reisekosten zu vermeiden. Darüber hinaus wird erwartet, dass die steigende Nachfrage nach Fern-Weiterbildung- und Fortbildung das Wachstum vorantreiben wird (Fortune 2024).

Erwartete Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Videokonferenzen werden im klimapolitischen Kontext häufig als „Paradebeispiel“ des Klimaschutzpotenzials durch Digitalisierung angeführt (Clausen & Schramm 2021). In einer Studie für das Umweltbundesamt stellen Gröger et al. (2021) fest, dass die Treibhausgasemissionen, die durch Videokonferenzen entstehen, verglichen mit den hohen Emissionen aus dem motorbetriebenen Verkehr sehr gering sind: „Findet eine Anreise zu einem Treffen mit der klimaschädlichsten Variante Pkw statt, so ist die Videokonferenz bereits ab einer Entfernung von 1,38 Kilometern die klimafreundlichere Alternative. Selbst wenn ein großer Videomonitor verwendet wird, der unter den Anzeigegeräte die höchsten Treibhausgasemissionen aufweist“ (Gröger et al. 2021, S. 137). Zusammenfassend kommen die Autor*innen der UBA-Studie zu dem Schluss, dass „eine Videokonferenz unter Klimaschutzgesichtspunkten immer dann eine gute Alternative zu einem physischen Treffen ist, wenn eine Anreise nicht per Fuß oder Fahrrad erfolgen kann. Wenn Videokonferenzen tatsächlich motorisierte Verkehrsleistung ersetzen, dann leisten sie einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz“ (Gröger et al. 2021, S. 137). Zur Abschätzung des Verkehrsminderungspotenzials durch Videokonferenzen führte das Borderstep Institut im Rahmen des BMBF-Projektes „Klimaschutzpotenziale der Digitalen Transformation (CliDiTRans)“ eine Befragung mit Fokus auf Dienstreisende durch. In der ersten Hälfte des November 2020 wurden online 500 Geschäftsreisende in Deutschland zu ihrer Sicht auf Videokonferenzen befragt, die im Jahr 2019 mindestens eine Dienstreise monatlich unternommen hatten. Clausen & Schramm (2021) kommen zu dem Schluss, dass „wenn das geänderte Dienstreiseverhalten, wie von den Befragten erwartet, im Anschluss an die Pandemie anteilig beibehalten wird und keine wesentlichen klimawirksamen Rebound-Effekte auftreten, könnten der Bahnverkehr um 28 %, der

Autoverkehr um 35 % und der Flugverkehr um 22 % dauerhaft zurückgehen. Es ist dann eine Reduktion der Treibhausgasemissionen durch den Geschäftsreiseverkehr von ca. 3 Mio. t CO₂e / Jahr zu erwarten“ (Clausen & Schramm 2021, S.1)

Mögliche Rebound-Effekte

Der Studienüberblick von Bieser et al. (2022) zeigt, dass virtuelle Konferenzen und Meetings erheblich Treibhausgas-Emissionen reduzieren können, da sie die An- und Rückreise der Teilnehmer*innen vermeiden. Allerdings ist nicht eindeutig geklärt, inwiefern Videokonferenzen tatsächlich zu einer Vermeidung von Reisen beitragen. Bieser et al. (2022) gehen davon aus, dass die Möglichkeit, an Konferenzen und Meetings virtuell teilzunehmen, auch zu Rebound-Effekten führen kann.

Wirkmechanismen

Ein Mechanismus, der zu einem Rebound-Effekt führen könnte, ist die Einsparung von Zeit und Geld, die nicht für Reisen aufgewendet werden. Ein zentraler Vorteil von Videokonferenzen liegt aufgrund des Wegfalls von Dienstreisen in Zeitgewinnen. Diese führen sowohl zu deutlich mehr Freizeit als auch zu einem Gewinn an disponibler Arbeitszeit (Clausen & Schramm 2021). Dass Videokonferenzen den Zeitaufwand für die Teilnahme an Meetings deutlich reduzieren, „weist auf ein sehr günstiges Kosten-Nutzen Verhältnis von Videokonferenzen im Vergleich zu realen Meetings hin. Zudem reduzieren sie auch die ausgabewirksamen Kosten immer dann, wenn sie eine Dienstreise ersetzen. In diesen Fällen ist auch der Zeitgewinn besonders groß“ (Clausen & Schramm 2021, S. 22). Dies kann dazu führen, dass Aktivitäten in andere Bereiche verlagert werden, die mit anderen Umweltwirkungen verbunden sind (Bieser et al. 2022).

Auch materielle Rebound-Effekte können auftreten, da Videokamera und Mikrophone für die Durchführung notwendig sind. Häufig werden in den Unternehmen auch professionelle Konferenzsysteme angeschafft und die technische Infrastruktur dafür wird dementsprechend ausgebaut. Komfort-Rebound-Effekte sind auch möglich, denn die Häufigkeit der Nutzung kann durch den einfachen Zugang steigen. Durch den Einzug von Videokonferenzen werden kaum noch Telefonanrufe durchgeführt, die wesentlich Energie und Datentransmission für die Übertragung und Videoauflösung brauchen.

Preis-Rebound (Reduktion von Arbeitskosten) ist einer der möglichen Rebound-Effekte. Ein weiterer der Zeit-Rebound durch Einsparung von Zeit. Beide Wirkmechanismen können zu indirekten Rebound-Effekten führen, die sich in Umweltwirkungen in anderen Bereichen bemerkbar machen.

Ausmaß eines möglicher Rebound-Effektes: Wie groß ist der Rebound-Effekt

Das Ausmaß möglicher Rebound-Effekte von Videokonferenzen kann quantitativ nicht abgeschätzt werden.

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Rebound-Effekte infolge von Videokonferenzen hängen von vielen Variablen ab, die je nach Sektor, sozioökonomischem Kontext und Zeitraum variieren (Bieser et al. 2022). Wichtigste Faktoren sind das tatsächliche Reiseverhalten (Zahl der Reisen, Reisedistanz, Verkehrsträger etc.) sowie die Verlagerung von Aktivitäten durch Einsparung von Zeit und Geld in andere Bereiche.

Datenlage

Belastbare Daten zu möglichen Rebound-Effekten von Video-Konferenzen liegen nicht vor.

A.2.7 Mobility-as-a-Service

Definition

„Das Mobility-as-a-Service (MaaS) Konzept ermöglicht es, die individuellen Mobilitätsbedürfnisse von Nutzerinnen durch die Bereitstellung eines nahtlosen, integrierten und multimodalen Verkehrssystems zu erfüllen, indem verschiedene Mobilitätsdienstleistungen über digitale Mobilitätsplattformen vermittelt werden. Neben den öffentlichen Verkehrsmitteln und aktiven Verkehrsmodi bieten vor allem bedarfsorientierte Mobilitätsdienstleistungen wie Shared-Mobility oder Fahrdienste eine kurzfristig nutzbare und flexible Alternative zum MIV.“ (Oehme et al. 2024) Zu den integrierten Mobilitätsdienstleistungen gehören u. a. Leih-Fahrräder, Carsharing, Ridesharing, Taxi sowie Autovermietung. Der Vorteil von MaaS besteht darin, dass Nutzer über eine einzige Plattform und einen einzigen Zahlungskanal auf unterschiedliche Angebote zugreifen können (anstelle mehrerer Ticket- und Zahlungsvorgänge).

Ziele und Einsatzbereiche

Mit der individuellen Nutzung von Autos sind erhebliche negative Umweltauswirkungen verbunden. Im Jahr 2021 wurden durch den MIV in Deutschland etwa 139,7 Mio. t Treibhausgase (CO₂e) ausgestoßen (BMDV 2023a). Dennoch wird das Auto als Verkehrsmittel von vielen Nutzer*innen gegenüber öffentlichen Verkehrsmitteln und anderen alternativen Mobilitätsformen bevorzugt. Eine Studie der ETH Zürich zeigt auf, dass die Bevorzugung des Autos häufig darauf zurückzuführen ist, dass ein Mangel an attraktiven alternativen Mobilitätsangeboten besteht (Martin et al. 2021). MaaS zielt darauf, den mit hohen THG-Emissionen verbundenen privaten Autoverkehr durch multimodalen Verkehr zu ersetzen, d. h. durch eine Kombination verschiedener Verkehrsmittel. „Die gesellschaftliche Motivation für MaaS besteht somit darin, die multimodale Mobilität durch digitale Plattformen attraktiver zu machen, sodass ein Wechsel weg vom Auto zu klimafreundlichen Verkehrsmitteln stattfindet (Hensher et al., 2021).“ (Bieser et al. 2022; S. 45)

Erwartete Umweltpotenziale und von wem sie erwartet werden

Umweltpotenziale von MaaS werden darin gesehen, dass der mit hohen Umweltbelastungen verbundene Individualverkehr reduziert werden kann, indem ein Teil der Wege multimodal mittels nachhaltiger Verkehrsmittel getätigt wird. Bieser et al. (2022) untersuchten in einer Meta-Studie verschiedene Forschungsarbeiten zu den Umweltpotenzialen von MaaS. „In einem Großteil der Literatur wird argumentiert, dass MaaS zu einer Verringerung der privaten Autonutzung und potenziell zu einer Reduzierung der THG-Emissionen des Verkehrs führen kann. Jedoch gibt es nur wenige Studien, die die Auswirkungen einer Einführung von MaaS oder anderen Verkehrsoptimierungen auf die THG-Emissionen berechnen.“ (Bieser et al. 2022; S. 45)

In einer Studie von Laine et al. (2018) wird eine quantitative Abschätzung des THG-Minderungspotenzials von MaaS vorgenommen. Die Studie bezieht sich auf die Länder Norwegen, Dänemark, Finnland, Schweden und Island und modelliert mögliche Umwelteffekte von MaaS auf Basis verschiedener Szenarien für 2023, 2040 und 2050. Unter anderem wurde untersucht, wie sich eine Reduktion des privaten Autobesitzes um 10 % auf die THG-Emissionen im Verkehr auswirken. Dabei wurde angenommen, dass eine Verlagerung der Fahrten auf den ÖPNV (Bus und Bahn) sowie auf Fahrgemeinschaften stattfindet und auch die Anzahl der Wege, die per Fahrrad, zu Fuß, Carsharing und Ridesharing zurückgelegt werden, zunimmt. Die Autor*innen kommen zu dem Ergebnis, dass eine solche Reduzierung des Pkw-Besitzes jährliche Reduktionen von 0,4 Mt CO₂ in 2030 ergeben würde (Laine et al. 2018). Auch andere Untersuchungen weisen darauf hin, dass MaaS hohe Potenziale birgt, mittels geteilter Mobilität

die private Autonutzung zu reduzieren (Carroll et al. 2019; International Transport Forum, 2017).

Ob MaaS tatsächlich zu einer Reduzierung privater Autofahrten führt, haben Storme et al. (2020) in einer Studie untersucht, bei der Nutzer*innen einer MaaS-App befragt wurden. In der Studie konnte allerdings keine wesentliche Reduzierung des privaten MIV unter den Nutzer*innen festgestellt werden. Bieser et al. (2022) kommen in ihrer Meta-Studie zu dem Schluss, dass MaaS ein deutliches Potenzial aufweist, die THG-Emissionen im Verkehr zu reduzieren. Ob dieses Potenzial realisiert werden kann, kommt auf die Ausgestaltung an. Damit ein MaaS-Angebot tatsächlich viele Nutzer*innen erreicht und bisherige Mobilitätsgewohnheiten ersetzt, sind weitere Faktoren wichtig, insbesondere finanzielle Vorteile und die einfache und praktikable Anwendung.

MaaS-Konzepte erleichtern den Zugang zu sowie den Komfort von alternativen Mobilitätsangeboten, wodurch sie die Nutzung klimafreundlicher Verkehrsmittel abseits des privaten Pkw attraktiver machen (Oehme et al. 2024). Während andere digital unterstützte Ansätze (wie smarte Verkehrslenkung, Routenplanung, autonomes Fahren) auf eine Optimierung des vorhandenen Verkehrssystems mit seiner Dominanz des MIV setzen, zielt MaaS auf eine Veränderung des Gesamtsystems, indem geteilte Mobilität gefördert wird. Vor diesem Hintergrund werden in der Literatur vielfach die Chancen und Potenziale von MaaS für eine umweltfreundlichere Mobilität thematisiert. In verschiedenen Studien geht es um die Frage, wie die Potenziale dieses Ansatzes tatsächlich ausgeschöpft werden können, d. h. wie die Angebote so gestaltet werden können, dass möglichst viele Nutzer gewonnen werden können. Auch die Frage, ob MaaS mit Rebound-Effekten im Sinne steigender Verkehrsleistung verbunden sein könnte sowie Wechselwirkungen mit dem MIV werden in Studien thematisiert.

Mögliche Rebound-Effekte

Wirkmechanismen

Rebound-Effekte könnten entstehen, wenn eine Verlagerung von Verkehrsmitteln des ÖPNV (Bahn, Bus) hin zu Angeboten mit weniger Personenkapazitäten erfolgt (z. B. Carsharing, Taxi), da diese mit höheren THG-Emissionen verbunden sind. Ein weiterer Effekt könnte sein, dass Formen der aktiven Mobilität (zu Fuß gehen, Fahrrad fahren) durch motorisierte Mobilität ersetzt wird (Fioreze et al. 2019). Ein weiterer Rebound-Effekt könnte auftreten, wenn durch die Steigerung der Attraktivität (besserer und komfortabler Zugang sowie einfache Abwicklung, günstige Preise) die Mobilität insgesamt zunehmen würde. Dies könnte potenzielle Umweltvorteile von MaaS vermindern. Des Weiteren könnten durch die Abo-Modelle, die häufig von MaaS-Anbietern angeboten werden, Effekte entstehen, die zu einer Erhöhung der Verkehrsleistung und der Anzahl der Wege führen. So kann bei den Nutzer*innen das Bedürfnis entstehen, das bereits gezahlte Abo möglichst umfangreich ausschöpfen zu wollen, um einen hohen Nutzen zu erzielen.

Verschiedene Studien untersuchen die Frage, inwieweit durch MaaS und die mit diesem Konzept geförderten alternativen Verkehrsangebote zusätzlicher Verkehr induziert wird. Eine Studie zu elektronisch vermittelten Fahrdiensten in den USA gibt den Anteil zusätzlicher Wege mit 12 % an (Baltic et al. 2019). Eine Studie von 2019 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur untersuchte die Umwelteffekte alternativer Mobilitätskonzepte in Deutschland (Doll et al. 2019). Die Autor*innen gehen dabei auch auf den zusätzlich erzeugten Verkehr ein (auf der Grundlage von verfügbarer Literatur und Interviewaussagen). In ihrer Szenarioanalyse für 2030 kommen sie zu dem Ergebnis, dass zusätzlicher Verkehr in folgender Höhe entstehen könnte: Durch Rideselling zwischen 8 und 12 %, durch Carsharing zwischen 2 und 4 %, durch Bedarfsverkehr (ohne Fahrplan) zwischen 5 und 10 %. Eine andere Studie, die

alternative Verkehrsangebote in Österreich untersucht hat, gibt an, dass durch Rideselling der Verkehr um etwa 8 % erhöht wird, durch Bedarfsverkehr (z. B. Ruf-Busse, Sammeltaxis) um etwa 18 % (Foljanty et al. 2016).

Die Studien zeigen, dass durch MaaS Komfort-Rebound-Effekte und Preis-Rebound-Effekte auftreten können.

Ausmaß möglicher Rebound-Effekte

Die oben zitierten Studien geben Rebound-Effekte in Höhe von 2 bis 18 % an.

Einflussfaktoren

Die entscheidende Frage ist, ob und wie MaaS zu einer Veränderung im Mobilitätsverhalten führt und welche Konsequenzen dies für THG-Emissionen hat. Nutzer*innen können vor allem durch die Wahl der Verkehrsmittel (v. a. Bevorzugung von ÖPNV und nicht-motorisierten Verkehrsmitteln) und die Vermeidung von Verkehr zur Verminderung von Rebound-Effekten beitragen. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Frage, ob MaaS attraktiver gegenüber Individualverkehr ist und diesen ersetzt (dann dürften Rebound-Effekte eher gering sein) oder ob MaaS attraktiver gegenüber anderen Verkehrsmitteln (z. B. ÖPNV, Fahrrad) ist. Im letztgenannten Fall ist damit zu rechnen, dass die Rebound-Effekte höher ausfallen.

Abo-Modelle können einen Anreiz für Nutzer zu vermehrter Mobilität darstellen. Anbieter könnten ein nachhaltiges Mobilitätsverhalten fördern, indem emissionsarme Optionen (wie ÖPNV und Fahrrad) mit einem Preisvorteil versehen werden.

Datenlage

Datenlage zu Umwelteffekten: Eine Reihe von Studien zeigt die Umweltpotenziale von MaaS – insbesondere die Potenziale zur Reduzierung von privatem Autoverkehr – auf. Allerdings beruhen die meisten Studien auf Potenzialabschätzungen und nicht auf empirisch erhobenen Angaben zum tatsächlichen Nutzerverhalten.

Datenlage zu Rebound-Effekten: Es liegen einige Studien vor, die den zusätzlich induzierten Verkehr von neuen Mobilitätsdiensten untersuchen und hier Einschätzungen vornehmen. Insgesamt ist die Datenlage hierzu aber begrenzt. Die Studie der PTV Group konstatiert, dass die Daten aus externen Quellen lückenhaft sind und teilweise eine erhebliche Bandbreite der Werte aufweisen. „Dies liegt unter anderem an der hohen Kontextabhängigkeit vom jeweils betrachteten Angebot, Geschäftsmodell, Marktteilnehmer und anderen Aspekten.“ (Doll et al. 2019, S. 148).

A.2.8 “Smarte” Transportlogistik

Definition

“Smarte” Transportlogistik definiert sich als daten- und vernetzungsbasierte Unterstützung von Transporten durch digitale Technologien. Sie wird auch als “Logistik 4.0” bezeichnet (VCÖ 2018).

Ziele und Einsatzbereiche

Die Digitalisierung der Transportlogistik umfasst vor allem fahrzeugseitige Assistenzsysteme, optimiertes Flottenmanagement sowie die Bündelung der Nachfrage nach Transportleistungen über Transportbörsen sowie integrierte Transportplattformen, die Unternehmen mithilfe von digitalen Technologien bei der Planung, Ausführung und Optimierung des Warenverkehrs unterstützen (VCÖ 2018). Zum Einsatz kommen beispielsweise Transportmanagementsysteme.

Sie werden von Unternehmen verwendet, die regelmäßig Waren versenden, bewegen oder empfangen müssen. Zu diesen gehören Hersteller, Händler, E-Commerce-Unternehmen, Einzelhändler und Logistikunternehmen. Das Ziel besteht darin, Routen effizient zu planen, Leerfahrten zu vermeiden und Ressourcen einzusparen. Für eine bessere Auslastung berechnen Transportmanagementsysteme die optimale Route und berücksichtigen dabei Verkehrsvorhersagen, aber auch Umwelteinflüsse und geben die Informationen in Echtzeit an Telematiksysteme im Lastkraftwagen weiter. GPS und mobile Daten übermitteln dem Empfänger ebenfalls in Echtzeit die voraussichtliche Ankunftszeit am Zielort. Bei langen Wartezeiten zum Entladen kann das Transportmanagementsystem eine Umroutung vornehmen. Möglich wird dieses Kommunikationsnetz, weil alle Beteiligten dieselben Live-Daten teilen und durch Schnittstellen miteinander verbunden sind (Oracle 2024).

McKinsey hat Speditionen und Logistikdienstleister zu ihren Investitionen in digitale Logistiktechnologien befragt. Demzufolge gehören Transportmanagementsysteme zum Standard im Logistikbereich. So verfügen 68 % der Logistikdienstleister und 56 % der Speditionen über Echtzeit-Transparenz, Routenoptimierung und Telematik-Systeme. Der Trend zur Digitalisierung in der Logistik dürfte in den kommenden Jahren noch zunehmen. 94 % der Unternehmen wollen laut der Umfrage ihre Investitionen bis 2026 beibehalten oder erhöhen (Gosling et al. 2023). Die intelligente Aufbereitung, Verknüpfung, Auswertung und Nutzung von Daten für logistische Entscheidungen gilt als „Enabler“ für Effizienzfortschritte (BVL 2017).

Zukünftig soll automatisierter Straßengüterverkehr die Transportlogistik auf Autobahnen effizienter machen (DiSerHub 2023). Derzeit befindet sich Platooning in der Experimentier-, Demonstrations- und Pilotphase. Beim Platooning (engl. für "Trupp, Einheit") vernetzen sich mehrere Lastkraftwagen, die auf der gleichen Strecke unterwegs sind, über Car-to-Car-Kommunikation zu einer Einheit. So hat beispielsweise DB Schenker mit Kooperationspartnern ein Pilotprojekt über das Fahren im Platoon abgeschlossen (Novak 2019, ADAC 2019). Angestrebt wird vor allem eine höhere Leistungsfähigkeit der Autobahnen durch weniger Staugefahr. Der zur Verfügung stehende Verkehrsraum soll besser genutzt und der Verkehrsfluss optimiert werden. Ziel ist es, dadurch auch den Kraftstoffverbrauch und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen zu verringern. Schließlich soll durch die automatisierte Kopplung von Lastkraftwagen die Verkehrssicherheit erhöht werden.

Erwartete Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Anbieter von digitalen Lösungen für die Transportlogistik werben damit, dass die Nutzung von solchen Systemen ökologische Vorteile bringt, indem sie die Transporteffizienz erhöhen und den Energieverbrauch und die Emissionen senken können. Durch eine effizientere Routenplanung ließen sich die gefahrenen Kilometer reduzieren. Ein erhebliches Potenzial wird auch darin gesehen, Leerfahrten zu verringern. Über 37 % der LKW in Deutschland fahren nach einer Lieferung leer zurück. EU-weit finden 33 % der LKW-Fahrten leer statt, 50 % der LKWs fahren halbleer. Potenzial zum Abbau dieser Ineffizienz wird insbesondere in KI-gestützten Tourenoptimierungen und der Integration von Frachtenbörsen gesehen. Zusätzlich bestehen Möglichkeiten durch synchromodale, also verkehrsträger-übergreifende Planung und Optimierung von Transportketten und gebündelte Dienstleistungen die Effizienz des Transportsektors zu erhöhen (VCÖ 2018). Dadurch soll gleichzeitig die Leistungsfähigkeit und Klimaverträglichkeit von Transport-Netzwerken erhöht werden.

Eine Kundenumfrage des auf die Logistik spezialisierten Softwareunternehmens Transporeon, die 2021 unter Vertretern von 110 Verladern und 251 Transportdienstleistern durchgeführt wurde, gibt Hinweise auf die Nutzung von Transportmanagementsystemen. Demzufolge ist die digitale Verbrauchsüberwachung, Routenoptimierung und Fahrverhaltensüberwachung (rund

58 bis 70 %) weit verbreitet. Maßnahmen zur Gewichtsreduktion oder Leerlaufvermeidung werden etwa halb so häufig genutzt. Auffällig ist, dass mehr als die Hälfte der befragten Unternehmen heute noch nicht in der Lage ist, CO₂e-Emissionen auszuweisen (Petersen & van Almsick 2021).

Umweltentlastungspotenziale des Platoonings werden in der besseren Ausnutzung der Straßeninfrastruktur gesehen. Durch die Verringerung des Luftwiderstands werden Kraftstoffeinsparungen und Emissionsreduzierungen erwartet (Flämig 2015). Dem Netzwerk DiSerHub, einem Zusammenschluss von Forschungseinrichtungen im Bereich der automobilen Wertschöpfungskette, zufolge bietet Platooning insbesondere Vorteile für die Erhöhung der Verkehrseffizienz. Für den Fall, dass alle Fahrzeuge in einer Kolonne fahren, wäre der Verkehr insgesamt flüssiger und effizienter. Staus und Verzögerungen könnten reduziert werden. (DiSerHub 2023). Nach szenariobasierten Berechnungen von Gyetko et al. (2021) hat autonomes Fahren im Straßengüterverkehr das Potenzial, die Treibhausgasemissionen gegenüber der angenommenen Referenz im Jahr 2050 um 29,2 % zu reduzieren. Dafür sorgen vor allem die spezifischen Verbrauchsverringerungen der autonomen Fahrzeuge sowie erhöhte Beladungsgrade durch optimierte Fahrttaktung (Gyetko et al. 2021).

Mögliche Rebound-Effekte

Wirkmechanismen

Verbesserungen der Transport- und Energieeffizienz im Güterverkehr können zu Rebound-Effekten führen. Bei der Digitalisierung der Transportlogistik können Rebound-Effekte durch erhöhte Transportnachfrage oder Veränderungen des Modal Split aufgrund von Effizienzsteigerungen auftreten (VCÖ 2018). Maxwell et al. (2011) stellen fest, dass die Verbesserung der Kraftstoffeffizienz die Kosten des Güterverkehrs senkt, was wiederum den Transport von mehr Gütern, über größere Entfernungen und mit größerer Häufigkeit kosteneffizient macht. Dies bedeutet, dass der Kraftstoffverbrauch infolge der Verbesserung der Energieeffizienz weniger stark gesenkt werden könnte als erwartet. Seebauer et al. (2018) gehen davon aus, dass durch "gravierende Kostenersparnisse" der Transport weg „vom Umweltverbund, vor allem der Bahn, hin zu Platooning verlagert werden, sowie dass die zurückgelegten Tonnen-km im Straßengüterverkehr stark zunehmen. Gyetko et al. (2021) beschreiben in einem Szenario die Möglichkeit eines Modal Shifts von der Schiene zur Straße durch kostengünstigere und flexiblere Lieferungsmöglichkeiten durch autonome LKW. Die Verkehrsleistung des Straßengüterverkehrs steigt durch den hohen Komfort, Verbesserung des Verkehrsflusses und die Flexibilität im Vergleich zum Schienengüterverkehr an. Durch den Einsatz von kleineren Lastkraftwagen zur Erhöhung der Flexibilität steigt die jährliche Anzahl der Fahrzeugkilometer. Dem wirkt die Nutzung Algorithmen-gestützter Fahrroutenplanung entgegen. Durch die weitere Optimierung von LKW-Kapazitäten mittels Algorithmen-gesteuerter Transportplanung wird die Auslastung erhöht. Gyetko et al. (2021) machen darauf aufmerksam, dass dadurch Energiebedarfs- und Emissionserhöhungen die Folge sein können.

Zusammengefasst ist festzustellen, dass alle Rebound-Typen eine Rolle spielen: der Preis-Rebound (durch Steigerung des Warentransports aufgrund sinkender Kosten), der materielle Rebound (infolge der Optimierung von LKW-Kapazitäten), der Komfort-Rebound (durch den hohen Komfort und die Flexibilität im Vergleich zum Schienengüterverkehr) und der Zeit-Rebound (durch Verbesserung des Verkehrsflusses auf Autobahnen).

Ausmaß eines möglicher Rebound-Effektes: Wie groß ist der Rebound-Effekt

Das Rebound-Risiko der Digitalisierung im Güterverkehr wird als sehr hoch eingeschätzt (Seebauer et al. 2018).

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Rebound-Effekte werden verstärkt, wenn die Attraktivität des Straßengüterverkehrs durch Kosten-, Zeit- und Komfortvorteile steigen sollte, so dass es zu einer Verlagerung des Schienengüterverkehrs auf die Straße kommt. Umgekehrt gilt auch, dass Rebound-Effekte verringert oder vermieden werden können, indem die Rahmenbedingungen so gesetzt werden, dass kein Modal Shift von der Schiene auf die Straße stattfindet. Zuwächse beim Energieverbrauch und Treibhausemissionen kann dadurch entgegengewirkt werden, indem LKW mit alternativen Antrieben eingesetzt werden, die klimaschonender und energieeffizienter sind. Würden statt Dieselfahrzeugen Elektroantriebe oder synthetische Kraftstoffe, wie E-Fuels, eingesetzt, könnte ein Teil des Rebounds vermieden werden (Seebauer et al. 2018, Gyetko et al. 2021). Dem Rebound tendenziell entgegen wirken Abgaben (z. B. höhere Steuern auf Kraftfahrzeuge oder Kraftstoffe) oder ein Emissionshandel (da hier eine absolute Obergrenze („Cap“) eingeführt wird (Raimund 2023)).

Datenlage

Die Einschätzungen stützen sich auf fall- und länderbezogene Analysen.

A.2.9 Metaverse

Definition

Metaverse wird als nächste zukünftige Evolutionsstufe des Internets beschrieben. Es handelt sich um einen digitalen dreidimensionalen Raum, der durch das Zusammenspiel virtueller, erweiterter und physischer Realität entsteht. Das Metaverse selbst ist keine Technologie, sondern entsteht durch die Zusammenführung und gemeinsame Anwendung von bereits vorhandenen Technologien. Die Kombination von Augmented (AR) and Virtual Reality (VR), Edgecomputing, Künstlicher Intelligenz, Blockchain Technologie sowie niedriglatenter Netzwerke (z. B. 5G/6G) stellt die technologische Grundlage und Voraussetzung dar, um virtuelle Welten zu schaffen (Peters et al. 2022; Klose & Kreutzer 2023).

Ziele und Einsatzbereiche

Im Metaverse haben Benutzer*innen nicht nur die Möglichkeit, mittels ihrer Avatare in virtuelle Welten „einzutauchen“ und sie zu erkunden, sondern auch mit anderen Akteuren, Subjekten und Objekten zu (inter)agieren und (gemeinsam) verschiedene Aktivitäten durchzuführen. Diese Aktivitäten können verschiedene Lebensbereiche abdecken, darunter Arbeit (virtuelle Besprechungen, Konferenzen und Büroumgebungen), Reisen, Kulturerlebnisse (virtuelle Museen, Ausstellungen und ähnliche Veranstaltungen), Bildung, Unterhaltung (virtuelle Konzertbesuche, Theateraufführungen und Gaming-Events), Einkaufsmöglichkeiten (in virtuellen Geschäften und Marktplätzen) sowie weitere Freizeitgestaltungen (Klose & Kreutzer 2023). So ermöglicht das Metaversum eine kontinuierliche Erweiterung des menschlichen Lebens in einer parallelen virtuellen, aber realitätsnahen Umgebung und eine neue Art von Vernetzung und Kommunikation (Sangeeta et al. 2023). Trotz der enormen Investitionen und der aufkommenden Technologietrends besteht weiterhin Unsicherheit über die Bedeutung des Metaversums und seine langfristigen Erfolgsaussichten (Peters et al. 2022, S.2).

Erwartete Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Die Wissenschaft sieht einen Vorteil des Metaverse darin, dass physische Ereignisse, Konstruktionen, Aktivitäten und Produkte virtuell stattfinden können. Zudem könnte das Metaverse zur Emissionsminderung im Verkehrssektor beitragen, indem es die Verschiebung zu einem höheren Anteil virtueller Meetings und Konferenzen, aber auch virtueller sozialer und

kultureller Aktivitäten unterstützt (Stoll et al. 2022; Sangeeta et al. 2023). So könnte die Freizeit- und Arbeitsmobilität durch eine nachhaltigere virtuelle Mobilität ersetzt werden, und zu Einsparungen von alltäglichem Arbeitspendeln und gelegentlichen Urlaubsreisen führen. „Ein Wechsel von konventionellen Mobilitätsparadigmen (schneller, überall, jederzeit) hin zu einem suffizienten Mobilitätsverständnis (virtuelle Mobilität zur gerechten Nutzung von Raum, Energie und Umwelt) könnte einer der zentralen Hebel der Mobilitätswende sein“ (Wernbacher et al 2023, S.11). Neben dem Verkehrssektor könnte die vermehrte Teilnahme an virtuellen Aktivitäten im Metaverse langfristig dazu beitragen, die Emissionen im Bausektor zu reduzieren, indem der Bedarf an physischen Infrastrukturen verringert wird. Obwohl ein verlängerter Aufenthalt zu Hause den Stromverbrauch und den Raumbedarf in privaten Haushalten erhöht, geht damit gleichzeitig ein Rückgang des Bedarfs an Bürogebäuden und ihrer Infrastruktur einher. Der Bausektor ist für 39 % der gesamten CO₂-Emissionen verantwortlich, wobei 11 % auf die Produktion von Baumaterialien wie Stahl, Zement und Glas entfallen (Stoll et al., 2022). Außerdem gibt es einen ersten Versuch, die ökologischen Auswirkungen des Metaverse zu quantifizieren. Szenariobasierte Berechnungen²⁷ von Zhao & You (2023) untersuchen Auswirkungen von metaversebasierten Anwendungen auf den Klimaschutz, in den Bereichen Arbeit, Reisen, Bildung und Spiele. Dabei wurde festgestellt, dass eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 10 bis 23 % erreicht werden könnte.

Mögliche Rebound-Effekte

Angesichts der Bedeutung und des Einsatzes von Technologien mit hohem Energiebedarf für die Umsetzung des Metaversums ist es noch unklar, ob positive Umwelteffekte überhaupt entstehen. Es gibt Bedenken, wie sich diese Effekte in einer Gesamtbilanz des Metaverse künftig bewerten lassen und ob die Entwicklung und Verbreitung des Metaverse mit Rebound-Effekten einhergehen wird (Peters et al. 2022).

Wirkmechanismen

Für das Betreten im Metaverse und für die immersive Erfahrung ist eine erweiterte Ausstattung von digitalen Endgeräten erforderlich. Beim Aufsetzen einer VR-Brille wird die physische Realität innerhalb weniger Augenblicke durch die virtuelle Realität ersetzt. Dies ermöglicht nicht nur ausführliche Erkundungen virtueller Welten, sondern auch eine Interaktion mit dieser. Unternehmen entwickeln neben VR-Brillen auch weitere Produkte (wie z. B. VR-Ganzkörperanzug, VR-Controller oder VR-Handschuhe), um ein intensiveres und realitätsnäheres Erleben zu gewährleisten (Klose & Kreutzer 2023). Der Stromverbrauch in Privathaushalten könnte insgesamt steigen, da Endnutzer zusätzliche Systeme und Geräte benötigen, um auf das Metaverse zuzugreifen (Stoll et al. 2022). Weiterhin könnte der kontinuierliche Fortschritt der Technologien dazu führen, dass eine große Menge an Elektroschrott (e-waste) entsteht, da ältere Geräte nicht mit den neuen Plattformen kompatibel und neue technologische Ausrüstungen erforderlich sind. Des Weiteren wird bei der Herstellung dieser Technologien auf seltene Materialien und Plastik zurückgegriffen (Vlăduțescu & Stănescu 2023). Seitens der Unternehmen werden für den Betrieb von AR-basierten und virtuellen Umgebungen auch eine umfangreichere Ausstattung mit Geräten benötigt. Dazu gehören professionelle Industriekameras sowie leistungsstarke Projektions- und Trackingsysteme, um „die Potenziale des Metaverse auszuschöpfen“ (Klose & Kreutzer 2023, S.50-51).

Als weitere zentrale Komponente des Metaverse ist die Bedeutung der Netzwerke und Cloud-Infrastruktur zu nennen. Die Anforderungen für die komplexe Darstellung des Metaverse

27 Drei Szenarien für die Verbreitung und Nutzung von Metaverse bis zum Jahr 2050 wurden untersucht, unter der Annahme, dass mehr als 90 % der Bevölkerung der USA Metaverse nutzen.

unterscheiden sich grundlegend von denen des bisherigen Internets. Die virtuelle und realitätsnahe Darstellung sowie Verknüpfung von Avataren sowie ihrer Interaktionen, Transaktionen, Meetings und Events ist mit großem Energiebedarf, hoher Rechenleistung sowie großen Speicherkapazitäten verbunden. Eine stabile Echtzeitverbindung ist für ein Leben und Arbeiten im Metaverse von zentraler Bedeutung, ebenso wie hohe Bandbreiten und minimale Latenzzeiten (Klose & Kreutzer 2023; Sangeeta et al. 2023; Peters et al. 2022). Zudem generiert das Metaversum eine große Menge dezentralisierter Daten, die in der Cloud gespeichert werden müssen. Dies erfordert zusätzliche Rechenzentren, um diesen wachsenden Anforderungen gerecht zu werden, was wiederum zu einem erhöhten Stromverbrauch führt (Sangeeta et al. 2023). Die Zusammenführung verschiedener Technologien wie Künstliche Intelligenz, Virtual Reality und Blockchain könnte insgesamt zu einem erhöhten Energieverbrauch führen (Peters et al. 2022; Klose & Kreutzer 2023). Mit einer umfangreichen technischen Ausstattung mit immer neuen Geräten und den erhöhten Energieverbrauch insgesamt sind materielle Rebound-Effekte zu erwarten.

Grundsätzlich könnte das Metaversum die Tertiärisierung der Wirtschaft vorantreiben, indem es einen stärkeren Übergang vom Konsum physischer Güter zum Konsum von digitalen Dienstleistungen und Produkten führen könnte. Die Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit des privaten Konsums bleiben jedoch noch unklar (Peters et al. 2022), jedoch könnten Komfort- und Zeit-Rebound-Effekte auftreten. Einkaufserlebnisse von Privatpersonen in der virtuellen Welt könnten zu Produkterlebnissen und Services in der realen Welt führen, so dass sich neue Möglichkeiten für Kauf und Verkauf eröffnen. Hierbei besteht die Gelegenheit, Produkte oder Services zunächst virtuell zu erkunden und zu kaufen, um sie dann in der realen Welt in Anspruch zu nehmen. Unternehmen könnten vielfältigere Kommunikationsmöglichkeiten nutzen, um mit Kund*innen zu interagieren und Produkte und Dienstleistungen auf neue Weise zu vermarkten. Verkaufspersonal könnte im Metaverse entweder in Echtzeit oder mit Hilfe von vorproduzierten Inhalten Interessierte beraten und zum Kauf motivieren, und so ein hoch personalisiertes Einkaufserlebnis anbieten (Klose & Kreutzer 2023). „Gleichzeitig können Kleidungsstücke in der virtuellen Umgebung effektiver anprobiert und infolgedessen zum Tragen in der realen Umgebung bestellt werden, aber auch Anbieter großer, komplexer Maschinen können ihre Produkte virtuell Kund*innen vorführen“ (Büchel & Klös 2022, S.7).

Ausmaß eines möglichen Rebound-Effektes: Wie groß ist der Rebound-Effekt

Die Höhe des Rebound-Effektes bleibt noch unklar und wurde bislang noch nicht quantitativ ermittelt.

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Das Auftreten und die Intensität von Rebound-Effekten variieren abhängig von einer Vielzahl von Einflussfaktoren. Dazu zählen technologische Faktoren wie die Anzahl und Leistungsfähigkeit der vernetzten Geräte (VR-Brille, VR-Controller, VR-Handschuhe, VR-Ganzkörperanzug), der Strombedarf der Geräte und der Netzinfrastuktur sowie die Nutzungsdauer der Geräte, die Produktion und Entsorgung von Technologien. Als soziale Faktoren sollten persönliche Nutzungsverhalten und Umstände (Aufenthaltszeiten, Technikaffinität und Nutzungsverständnis) ebenfalls berücksichtigt werden. Ebenso kann die Höhe der Rebound-Effekte unterschiedlich ausfallen je nach Bereich (Arbeiten, Konsum, Reisen, Gaming, etc.).

Datenlage

Das Metaversum befindet sich noch in den frühen Entwicklungsphasen und können daher nur Vermutungen über seine gesellschaftliche und ökologische Potenziale und Risiken aufgestellt werden. Seine Auswirkungen wurden bislang noch nicht konkret untersucht und abgeschätzt

(Peters et al. 2022; Sangeeta et al. 2023; Stoll et al. 2022). Somit bleibt das Metaverse ein Phänomen, welches in den kommenden Jahren weiterentwickelt und erforscht wird.

A.3 Technologie

A.3.1 Mobilfunknetze 5G/6G

Definition

Der 5G-Mobilfunkstandard, auch als "5G" abgekürzt, ist die fünfte Generation der drahtlosen Kommunikationstechnologie für Mobilfunknetze. 6G ist ein Mobilfunkstandard der sechsten Generation, der noch in der Entwicklung ist. In einem weiteren Verständnis ist 5G/6G ein Sammelbegriff für ein Bündel technologischer Innovationen mit einem breiten Spektrum an Anwendungsbereichen.

Ziele und Einsatzbereiche

Mobilfunktechnologien basierend auf dem 5G- und 6G-Standard gehören zu potenziell zukunftsprägenden digitalen Schlüsseltechnologien. 5G bietet im Vergleich zu seinem Vorgänger, dem 4G-Standard, Vorteile in Bezug auf Geschwindigkeit, Kapazität, Latenz und Zuverlässigkeit. Er ermöglicht höhere Datenübertragungsraten, geringere Verzögerungen und die Unterstützung einer breiten Palette von Anwendungen: (1.) erweitertes mobiles Breitband, d. h. eine verbesserte mobile Breitbandverbindung, um Mobilgeräte mit möglichst hohen Datenraten zu versorgen, (2.) massive „Machine-type Communications“ für das Internet der Dinge (IoT), d. h. die Kommunikation einer großen Anzahl von Geräten untereinander, und (3.) „Ultra-Reliable and Low Latency Communications“, d. h. Kommunikation mit hoher Verlässlichkeit und geringer Latenz, die etwa bei dem Management von Stromnetzen oder hochautomatisierten und vernetzten Fahrzeugen benötigt werden (ITU 2015; Grünwald & Caviezel 2022). 6G wird voraussichtlich noch höhere Datenraten, extrem niedrige Latenz, verbesserte Energieeffizienz und erweiterte Anwendungen wie holographische Kommunikation und neuronale Schnittstellen bieten. Es soll voraussichtlich in den 2030er Jahren eingeführt werden.

Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Die durch 5G erwarteten Umweltentlastungspotenziale werden auf zwei Ebenen diskutiert. Zum einen die Netzebene, hier geht es um die im Vergleich zu bisherigen Netzen höhere Energieeffizienz und um die Frage, wie sich zukünftig die Datenmenge verändern wird. Die International Telecommunication Union (ITU), die Sonderorganisation der Vereinten Nationen für Informations- und Kommunikationstechnologien, betont dass, „5G und die nächsten Generationen von Mobilfunknetzen die Verwirklichung aller 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDGs) beschleunigen [werden]“ (ITU, 2022). Was die Netzebene anbetrifft, wird generell konstatiert, dass die 5G-Technologie energieeffizienter ist als vorhergehende Mobilfunktechnologien wie 4G. Dabei variieren die Zahlen. Laut Vodafone (2019) benötigt 5G nur gut ein Drittel der Energie pro übertragenem Datenvolumen. Eine von Nokia gemeinsam mit Telefónica durchgeführte Studie (2020) zeigt, dass 5G-Netze bis zu 90 % effizienter sein könnten als vergleichbare 4G-Netze. Gemäß der Studie von Stobbe et al. (2023) soll sich die Energieeffizienz, verglichen mit dem aktuellen Mobilfunkstandard 4G, bei 5G um den Faktor 10 bis 100 verbessern können. Dies liegt an technologischen Verbesserungen, darunter effizientere Signalverarbeitung und die Fähigkeit, den Energieverbrauch von Endgeräten besser zu steuern. Das realisierbare Effizienzpotenzial hängt insbesondere von Verbesserungen bei der

Signalverarbeitung, der Netzwerkauslastung und der Energieverwaltung ab, die es ermöglicht, die Energieverbrauchsmuster der Netze besser zu steuern. Allerdings wird nicht erwartet, dass der Energieverbrauch absolut zurückgeht, da mit der 5G-Technologie neue Anwendungsfelder erschlossen werden sollen, die tendenziell die Datenmenge erhöhen und so einen zusätzlichen Energiebedarf erzeugen. So erkennt eine Studie des 5G-Ausrüstungsherstellers Ericsson (2020), dass „der Energieverbrauch durch die Einführung von 5G ansteigen wird, wenn die neue Technik in derselben Weise eingesetzt wird wie die bestehende 3G- und 4G-Technik. Gleichzeitig ist Ericsson aber optimistisch, dass auch eine Vervielfachung der Datenströme nicht zu einer analogen Zunahme des Energieverbrauchs führen muss, wenn verschiedene Optimierungsstrategien umgesetzt werden“ (Kroll 2020, S. 16). Maßnahmen zielen auf die Optimierung der Netz- und Standortplanung, der Geräte- und Anlagenmodernisierung, sowie eines aktiven Last- und Energiemanagements (Stobbe et al. 2023). Noch wenig erforscht ist die zu erwartende Größe der Potenziale von 5G/6G-Anwendungen. Studien, wie die von Analysys Mason und Huawei (zit. nach Bledow, 2023), zeigen Potenziale auf. So werden für Anwendungsfälle in den Bereichen Gesundheit, Energie und Industrie Reduktionen von THG-Emissionen je nach Bereich zwischen 39 % und 99 % eingeschätzt. Allerdings ist die Berechnungsbasis nicht nachvollziehbar.

Mögliche Rebound-Effekte

Rebound-Effekte werden dadurch erwartet, dass der Ausbau von 5G zu einem erheblichen Anstieg des Datenaufkommens führen wird, da die Nutzung von Anwendungen und Diensten durch Unternehmen und Verbraucher*innen tendenziell zunimmt (Höfer et al. 2019). Prognosen für die Entwicklung des mobilen Datenvolumens zeigen „einen substantiellen Anstieg des kundenbezogenen Datenvolumens von 2019 bis 2030 um etwa einen Faktor 45. Die Ursache hierfür ist vor allem die erwartete Nutzung von mobilem Videostreaming durch eine steigende Zahl von Netzteilnehmer*innen“ (Stobbe 2023, S. 25). Und selbst bei Effizienzgewinnen ist beim Film- und Videostreaming mit hohen Rebound-Effekten zu rechnen, da die Kostensenkung, die schnelle Geschwindigkeit sowie die verbesserte Energiebilanz des HD-Streamings die Häufigkeit und Intensität der Nutzung erhöhen könnten (Bledow 2023). In einem Basisszenario rechnen Stobbe et al. (2023) damit, dass der elektrische Energiebedarf der gesamten Mobilfunknetze in Deutschland von 2,31 TWh im Jahr 2019 auf 7,51 TWh im Jahr 2030 ansteigen wird (ca. 1,3 % des bundesweiten Strombedarfs 2030). Der Anstieg des jährlichen Energiebedarfs um 225 % ist „substantiell. Dieser Wert spiegelt auch die gestiegene relative Energieeffizienz wider, da sich die Netzkapazität mit dieser Verdreifachung des Energiebedarfs theoretisch um einen Faktor 45 vervielfacht hat“. (Stobbe et al. 2023, S. 26-27). Szenariobasierte Modellberechnungen von Bieser et al. (2020) beleuchten über Mobilfunknetze hinaus verschiedene Anwendungen im Kontext von 5G, die das Potenzial haben, die Treibhausgasemissionen zu verringern. Es handelt sich bei den Anwendungsfällen um flexibles Arbeiten, Smart Grid, automatisiertes Fahren und Präzisionslandwirtschaft. Die Berechnungen zeigen, dass sich in der Schweiz im Jahr 2030 durch die genannten Anwendungen mit 5G-Unterstützung in einem optimistischen Szenario bis zu 2,1 Mt CO₂e pro Jahr einsparen ließen. Im erwarteten Szenario ergeben sich Einsparungen von 0,6 Mt CO₂e pro Jahr und in einem pessimistischen Szenario noch immer 0,1 Mt CO₂e pro Jahr. Zwei Risiken wirken der potenziellen Verringerung von Treibhausgasemissionen entgegen. „Erstens können Rebound-Effekte die erwarteten Treibhausgaseinsparungen kompensieren. Damit ist gemeint, dass die höhere Treibhausgaseffizienz auch zu einer höheren Nachfrage nach bestimmten Dienstleistungen und damit zu zusätzlichen Emissionen führen kann. Zweitens ist für die betreffenden Anwendungen zusätzliche (nicht 5G-spezifische) IKT erforderlich (z. B. Laptops für flexibles Arbeiten; Sensoren, Drohnen oder Roboter für die Präzisionslandwirtschaft), deren Herstellung und Betrieb zusätzliche Treibhausgasemissionen verursacht“. So werden „diese zusätzlichen Emissionen über alle vier Anwendungsfälle hinweg

auf bis zu 0,16 Mt CO₂e pro Jahr im Jahr 2030 [eingeschätzt]. Dieser Wert liegt somit deutlich über den gesamten durch die 5G-Infrastruktur verursachten Treibhausgasemissionen“ (Bieser et al. 2020, S. 10).

Wirkmechanismen

Die Einführung des 5G-Mobilfunkstandards kann durch den Ausbau der Netzinfrastrukturen, durch neue Anwendungen und eine höhere Nutzungsintensität von Anwendungen zu Rebound-Effekten führen, die den Energieverbrauch und Ressourcenverbrauch erhöhen. Für eine flächendeckende 5G-Versorgung sind umfangreiche Investitionen in den Netzausbau unerlässlich und dieser Ausbau erfordert den Einsatz von Energie und Ressourcen. Die 5G Technik, die mit den heutigen Übertragungsfrequenzen betrieben werden kann, ist energieeffizienter als 4G. 5G kann aber auch im Millimeter-Wellenbereich senden. In diesem Fall kann größeres Datenvolumen übertragen werden, aber die Reichweite ist geringer. Es werden insgesamt mehr Sendestationen und Antennen erforderlich, was den Einspareffekt konterkariert (Höfer et al. 2019). Die Einführung von 5G und 6G zielt nicht nur darauf ab, die Effizienz bestehender Anwendungen und deren Energiebilanz zu verbessern, sondern viel mehr „neue Möglichkeiten zur Mobilfunknutzung zu erschließen und Anwendungen in ganz neuen Bereichen zu ermöglichen“ (Bledow, 2023, S. 10). So bietet 5G/6G neue Anwendungsmöglichkeiten in diversen Sektoren in der Mobilität (z. B. Autonomes Fahren), der Industrie (z. B. Digitaler Zwilling), der Bildung (z. B. Augmented/Virtual Reality), in den Medien und Unterhaltung (z. B. Streaming) oder der Gesundheit (Telemedizin). Dies führt zu einer erhöhten Nutzung von Datendiensten und anschließend zu einem höheren Energiebedarf (Kroll et al. 2020; Bledow, 2023). 5G erleichtert zudem den Zugriff auf Cloud-Ressourcen von überall aus, so dass Unternehmen und Nutzer*innen vermehrt Cloud-Dienste nutzen, was den Energiebedarf der Rechenzentren erhöht. Außerdem ermöglicht 5G die nahtlose Integration einer großen Anzahl von IoT-Geräten, und für die Kommunikation und Datenübertragung verbrauchen diese vernetzten Geräte Energie und Ressourcen.

Die Wirkmechanismen sind typisch für materielle Rebound-Effekte. Sie sind darauf zurückzuführen, dass eine Mehrnachfrage durch neue Produkte und Infrastrukturen ausgelöst wird. Sie weisen aber auch Merkmale von anderen Typen auf. So ermöglicht 5G den mobilen Konsum von Videostreaming in HD-Qualität oder erleichtert den mobilen Zugriff auf Cloud-Ressourcen, was wiederum Zeitvorteile mit sich bringen kann. Schließlich ist auch ein Preis-Rebound zu konstatieren, insofern durch 5G kostengünstige Datendienste angeboten werden können.

Ausmaß möglicher Rebound-Effekte

Das Ausmaß der möglichen Rebound-Effekte, die mit der Einführung und Verbreitung von 5G einhergehen, lässt sich nicht genau bemessen, da die Referenzgröße, also das erwartete Einsparpotenzial, nicht klar bestimmt ist. Konstatiert werden kann nur, dass der jährliche Energiebedarf für die Mobilfunkinfrastruktur substanziell, in einem Trendszenario um 225 % bis 2030 in Deutschland, ansteigen könnte. Was Anwendungen anbetrifft, variieren die Auswirkungen von 5G stark je nach Anwendungsbereich und hängen von der Art der Anwendung, den Nutzungs- und Rahmenbedingungen ab. Hier sind spezifische Betrachtungen notwendig, die in korrespondierenden Fallbeispielen angestellt werden sollten (Mobiles Arbeiten, Smart Grids, Autonomes Fahren, Präzisionslandwirtschaft, etc.).

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Mögliche Rebound-Effekte im Zusammenhang mit 5G/6G hängen von einer Vielzahl von Faktoren ab und können je nach Umständen variieren: Die Art und Weise, „wie die Netzkomponenten genutzt, ausgelastet, gesteuert oder an- und abgeschaltet werden, kann einen

erheblichen Einfluss auf den Energiebedarf im Betrieb eines Mobilfunknetzes haben“. (Stobbe et al. 2023, S. 49). Wie 5G von Endnutzer*innen, Unternehmen und Branchen eingesetzt wird, also das Nutzungsmuster, beeinflusst das Ausmaß des Rebound-Effektes. Eine intensive Nutzung, z. B. durch vermehrtes Streaming von hochauflösenden Videos, kann zu höherem Energieverbrauch führen. Ein bewusstes Nutzerverhalten könnte grundsätzlich dazu beitragen, den Rebound-Effekt zu minimieren. Allerdings ist vielen Nutzer*innen kaum klar, welche Datenmengen sie mit welcher Anwendung übertragen. Die Anwendungen sind dahingehend nicht transparent. Zunehmend gibt es mehr und mehr Mobiltarife mit Datenflat oder sehr großem Volumen. Für die Anwender gibt es daher keinen Anreiz über das Datenvolumen nachzudenken. Die Effizienz der verwendeten 5G-Endgeräte spielt ebenfalls eine Rolle, aber in ambivalenter Weise. Die Energieeffizienz dürfte in der Regel hoch sein. Effiziente Geräte können aber wiederum einen Rebound-Effekt auslösen, wenn sie beispielsweise eine höhere Grafikauflösung haben (können) und damit höher aufgelöstes Streaming hervorrufen. Auch die Art der Anwendungen, die auf 5G laufen, muss berücksichtigt werden, z. B. kann mobiles Arbeiten, das 5G nutzt, unter bestimmten Voraussetzungen (z. B. im Fall der Substitution von Pendlerverkehr) die Energieeffizienz fördern, während datenintensive Anwendungen (wie z. B. Videostreaming) mehr Energie verbrauchen können. Die Einhaltung von Umweltauflagen und die Entwicklung von Energieeffizienzstandards können den Rebound-Effekt reduzieren.

Datenlage

Es gibt kaum Daten zur Abschätzung von Rebound-Effekten durch die Einführung des 5G-Mobilfunkstandards, da erst wenige Studien vorliegen, die sich mit den ökologischen Auswirkungen beschäftigen. Da 5G in eine umfassende Technologieumgebung eingebettet ist und ein Enabler für eine breite Palette von Anwendungen ist, ist auch die Zuordnung möglicher Auswirkungen schwierig. Entsprechend ist die bis dato dokumentierte Evidenzlage zu den Wirkungen von 5G noch immer äußerst dürftig.

A.3.2 Rechenzentren

Definition

Rechenzentren sind „die technischen Schalt- und Speicherstellen“ (BSI 2024a) der Digitalisierung. Es handelt sich um Gebäude bzw. Räumlichkeiten, in denen die zentrale Rechentechnik (Server, aber auch die zum Betrieb notwendige Infrastruktur) einer oder mehrerer Firmen oder Organisationen untergebracht sind. Rechenzentren umfassen verschiedene technische und elektrische Komponenten, die bezüglich Energieverbrauch und Energieeffizienz von Bedeutung sind. Die wichtigsten Komponenten eines Rechenzentrums sind Server, Speicher und Netzwerksausrüstung. Für deren sicheren und verlässlichen Betrieb sind darüber hinaus noch andere energieverbrauchende Komponenten wie die unterbrechungsfreie Stromversorgung, die Stromverteilung sowie die Klimatisierung und Kühlung notwendig (Fichter 2007).

Ziele und Einsatzbereiche

Energieeffizienz von Rechenzentren ist ein Entwicklungsgegenstand der Hersteller und Betreiber von Rechenzentren und im Fokus politischer Aktivitäten. Das unterstreicht unter anderem der Climate Neutral Data Centre Pact, der das Ziel der Klimaneutralität von Rechenzentren bis spätestens 2030 verfolgt. Die Bundesregierung hat am 17. November 2023 das Energieeffizienzgesetz (EnEfG) verabschiedet und veröffentlicht, das weitreichende Anforderungen für den energieeffizienten Rechenzentrumsbetrieb definiert. Der Stromverbrauch von Rechenzentren muss bilanziell ab dem Januar 2024 zu 50 % und ab dem

Januar 2027 zu 100 % durch Strom aus erneuerbaren Energien gedeckt werden. Betreiber von Rechenzentren müssen zudem bis Juli 2025 ein Energie- oder Umweltmanagementsystem einrichten.

Erwartete Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Rechenzentren haben im Jahr 2020 in Deutschland insgesamt 16 Milliarden Kilowattstunden Strom verbraucht. Das sind rund 3 % des gesamten Stromverbrauchs in Deutschland, mit stark steigender Tendenz (etwa 6 % jährlich) (UBA 2023). Um den Betrieb von Rechenzentren energieeffizienter und klimafreundlicher zu machen, existiert eine Vielzahl von neuen Technologien. Im Rahmen von mehreren Untersuchungen hat Borderstep Institut mehr als 70 solcher Technologien identifiziert (Hintemann et al. 2020). Ansatzpunkte für eine Verringerung des Energieverbrauchs und der damit verbundenen Treibhausgasemissionen aus Rechenzentren liegen vor allem in den Bereichen IT-Hardware und -Management, in der Klimatisierung und in der klimafreundlichen Stromversorgung. So kann beispielsweise durch das intelligente IT-Management und die Nutzung von Cloud-Technologien die Effizienz deutlich erhöht werden. Der verstärkten Berücksichtigung von Energieeffizienzaspekten bei der Softwareentwicklung werden ebenfalls hohe Potenziale zugesprochen (Hilty et al. 2015; Hintemann et al. 2020). Die Heißwasserkühlung von Serversystemen stellt eine weitere aussichtsreiche Technologie dar (Hintemann et al. 2020). Außerdem existiert die Möglichkeit, die Abwärme aus Rechenzentren zu nutzen. In deutschen Rechenzentren werden pro Jahr „rund 15 TWh Strom in Abwärme umgewandelt, die bisher weitgehend ungenutzt weggekühlt wird“. Würde man diese Wärmemenge zur Gebäudeheizung einsetzen, könnten jährlich mehrere Mio. t CO₂ eingespart werden (Grünwald & Cavieze 2022). Vorhandene Effizienz- und Einsparpotenziale müssten dazu konsequent erschlossen werden, damit der gegenwärtige Verbrauchszuwachs gebremst werden kann. Eine entscheidende Frage für den zukünftigen Energiebedarf der Rechenzentren ist auch, welche weitere Entwicklung die Energieeffizienz, mit der Rechenleistungen erbracht werden, nehmen wird. Gemäß Koomeys Gesetz hat sich die Anzahl der Rechenschritte pro verbrauchter kWh alle 1,57 Jahre verdoppelt (Koomey et al. 2011). Viele Expert*innen erwarten, dass sich diese Leistungssteigerungen in Zukunft nicht mehr fortsetzen lassen werden, da die Möglichkeiten zur Miniaturisierung von Bauelementen an physikalische Grenzen stoßen (Grünwald & Cavieze 2022).

Mögliche Rebound-Effekte

Wirkmechanismen

Während Rechenzentren energieeffizienter werden, steigt zugleich der Bedarf an Rechenleistung. Dabei spielen Rebound-Effekte eine Rolle. Als wichtige Faktoren für den Anstieg der Nachfrage nach Rechenleistungen gelten die zunehmende Vernetzung der Endgeräte und generell die stärkere Nutzung von Internetdiensten. Die Folge davon ist, dass die Rechenzentren einen immer größeren Anteil am Energieverbrauch der privaten Internet- und digitalen Mediennutzung haben. Lag dieser im Jahr 2010 noch bei 27 %, belief er sich 2018 bereits auf 41,4 %. Setzt sich dieser Trend fort, so ist künftig von einer Erhöhung des Gesamtenergieverbrauchs durch die private Internet- und digitale Mediennutzung auszugehen (Grünwald & Cavieze 2022). Ein Treiber für den kontinuierlichen Ausbau der Rechenzentrenkapazitäten ist der Trend zu mehr Cloud Computing. Eng verbunden mit der Nutzung von Clouddiensten ist die Entwicklung von sehr großen und damit auch oft sehr effizient zu betreibenden Hyperscale-Cloudrechenzentren. Parallel dazu werden immer mehr kleinere, dezentrale lokal näher an Nutzer*innen liegende Edge-Rechenzentren aufgebaut. Die Nachfrage nach Rechenleistung wird auch durch die Entwicklungen im Bereich Künstlicher Intelligenz und Maschinellem Lernen vergrößert, da die hier notwendige Verarbeitung großer

Datenmengen große Rechenkapazitäten erfordert. Industrie 4.0-Technologien und die zunehmende Vernetzung im Internet of Things tragen ebenso zur weiteren Auslastung der Dateninfrastruktur bei und führen zu einem Anstieg der Energiebedarfe in Rechenzentren. Aber auch die private Nutzung treibt den Energiebedarf der Rechenzentren weiter in die Höhe. Hier findet eine Verlagerung des Energiebedarfs von den immer kleineren und effizienteren Endgeräten auf den Energiebedarf in den Netzen und Rechenzentren statt. Beschleunigt wird dieser Prozess dadurch, dass immer mehr Endgeräte internetfähig werden (Grünwald & Cavieze 2022).

Zwei Typen lassen sich identifizieren: der Preis-Rebound-Effekt (Verringerung der relativen Kosten für Rechenleistungen) und der Materielle Rebound-Effekt (neue datenintensive Produkte und Leistungen).

Ausmaß eines möglicher Rebound-Effektes: Wie groß ist der Rebound-Effekt

Die kausale Einordnung der genannten Wirkmechanismen als Rebound-Effekt ist schwierig, insbesondere was die Abgrenzung von generellen Nachfrage- und Wachstumseffekten anbetrifft (Wolff et al. 2023). Trotz dieser Abgrenzungsprobleme bleibt der Befund, dass energieeffizientere und leistungsfähigere Rechenzentren datenintensivere digitale Produkte und Leistungen und neue Anwendungsbereiche ermöglichen bzw. umgekehrt, datenintensivere Produkte und Leistungen und neue Anwendungsbereiche energieeffizientere und leistungsfähigere Rechenzentren voraussetzen. Diese Prozesse entwickeln sich nicht monokausal, indem einseitig das eine durch das andere bestimmt wird, sondern koevolutiv in wechselseitiger Beeinflussung. Die Effizienzgewinne wurden so in der Vergangenheit immer ausgeglichen. Der Ressourcenbedarf ist sogar angestiegen (Hintemann 2017).

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Der Rebound-Effekt wird durch die Erschließung datenintensiver neuer Produkte, Leistungen und Anwendungsbereiche verstärkt. Rebound-vermindernd wirken sich Geschäftsmodelle und Praktiken aus, die den Anstieg des Datenvolumens tendenziell bremsen. Dabei spielt der Aspekt eine Rolle, inwieweit das Thema „Datensuffizienz“ praktisch wirksam wird (Köhn et al. 2020).

Datenlage

Es liegen umfangreiche Studien zur Energieeffizienz von Rechenzentren vor, aber kaum Daten zu möglichen Rebound-Effekten.

A.3.3 Software

Definition

Der Begriff Software bezeichnet die auf einem Computer, Computernetzwerk oder mobilen Gerät ausführbaren Programme und die dazugehörigen Daten (Gröger et al. 2018). Die Software (in Form von Programmen und Anwendungen) macht den Computer für den Nutzer einsatzfähig. Im Gegensatz zur Hardware ist sie nicht physisch greifbar.

Ziele und Einsatzbereiche

Zur Software gehört als Basiskomponente das Betriebssystem (z. B. Windows, macOS, Linux), das wiederum durch Programme ergänzt wird, die eine bestimmte Aufgabe übernehmen (z. B. Textverarbeitung, Internet-Suche, Abspielen von Musik, etc.) (IT-Lexikon 2024). Bei mobilen Geräten (Smartphone, Tablet) spricht man von Apps. Die Software übernimmt zentrale Funktionen bei digitalen Prozessen: die Steuerung der Hardware und die Speicherung von Informationen in Form von digitalen Daten. Software kommt zunehmend auch in Geräten zum

Einsatz, die nicht unmittelbar als Computer erkennbar sind: in Haushaltsgeräten, Smart Homes, Fahrzeugen, Internet of Things, etc.

Erwartete Umweltpotenziale effizienter Software und von wem sie erwartet werden

Auch wenn die Software immateriell ist, so hat sie doch erhebliche Auswirkungen auf die Umwelteffekte der IKT. „Die Nutzung von Software [kann] erhebliche Stoff- und Energieströme auslösen. Eigenschaften der Software entscheiden, welche Hardwarekapazitäten vorgehalten werden und wieviel elektrische Energie in Endgeräten, Netzwerken und Rechenzentren verbraucht wird“ (Hilty et al. 2015, S. 7). Es besteht somit ein Zusammenhang zwischen Softwareeigenschaften und dem Bedarf an natürlichen Ressourcen, der durch Herstellung und Betrieb von IKT-Systemen verursacht wird.

Bei der Ausführung eines Softwareprogramms auf dem Computer wird Strom verbraucht. Dabei gibt es bei verschiedenen Programmen, die dem gleichen Zweck dienen, bei gleichem Nutzungsszenario erhebliche Unterschiede in Bezug auf den Energieverbrauch. Eine Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (Gröger et al. 2018) hat verschiedene Programme miteinander verglichen. In den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass sich beispielsweise bei Textverarbeitungsprogrammen bei gleicher Funktionalität der Stromverbrauch um den Faktor vier unterscheiden kann. Ein weiterer Bereich, der für die Umweltwirkungen von Software relevant ist, ist die Hardware-Effizienz der Programme (Prozessorauslastung, Arbeitsspeicher, Permanentenspeicher, Bandbreite für Netzzugang). Auch hier gibt es deutliche Unterschiede zwischen Programmen mit der gleichen Funktionalität. Dies ist v. a. deshalb von Bedeutung, da ineffiziente Hardwareprozesse mit langen Programmausführungen Nutzer dazu verleiten können, sich leistungsfähigere Hardware anzuschaffen, so dass Computer und andere Geräte vorzeitig ausgemustert werden. Besonders offensichtlich wird dies, wenn bestimmte Programme auf bestehenden Geräten gar nicht mehr eingesetzt werden können, weil deren Leistungsfähigkeit nicht ausreichend ist (Gröger et al. 2018). Bei diesen Beispielfällen führt die Software dazu, dass Geräte – obwohl aus technischer Sicht weiterhin funktionsfähig – vorzeitig durch neue Geräte ausgetauscht werden müssen, was mit erheblichem Ressourcenverbrauch für die Neuproduktion verbunden ist. Man spricht hierbei von softwarebedingter Obsoleszenz. „Immer häufiger entscheidet [...] die Qualität der Software über die Nutzungsdauer, Funktionalität und Zuverlässigkeit von Geräten. Über die Software können zum einen die Nutzungsdauer und der Nutzungskomfort von Geräten definiert oder verändert werden. Zum anderen bleiben die Sicherheit der Nutzung und der Fortbestand der Kompatibilität zwischen Hardware und Software sowie zwischen miteinander vernetzten Geräten eine konstante Herausforderung. Bei langlebigen Produkten kann softwarebedingte Obsoleszenz zu einem bedeutenden Problem für die Haltbarkeit und Zuverlässigkeit der Geräte werden“ (Jaeger-Erben et al. 2023, S.12).

Ein dritter Bereich, in dem es große Unterschiede zwischen den verschiedenen Programmen gibt, ist der Bereich der Nutzungsautonomie. Hier geht es um die Frage, ob Nutzer*innen die Möglichkeit haben bestimmte Einstellungen des Programms (im Hinblick auf geringere Hardwarekapazitäten oder geringeren Energieverbrauch) selbst vorzunehmen. Hierbei spielen Transparenz und Interoperabilität, Deinstallierbarkeit, Wartungsfunktionen, Unabhängigkeit von Fremdressourcen und Qualität der Produktinformation eine Rolle (Gröger et al. 2018).

Grüne Software

Bei der Entwicklung von grüner Software geht es darum, die oben beschriebenen Umweltauswirkungen von Software zu verringern und eine möglichst hohe Ressourcen- und Energieeffizienz zu erreichen. Eine besondere Herausforderung für Programmierer ist es dabei, Funktionalität, IT-Sicherheit und Nutzungs-Convenience mit Nachhaltigkeitsanforderungen zu

verbinden. „Es gibt eine Vielfalt von Ansätzen, um Software nachhaltiger zu machen. Die Effizienz von IT-Systemen lässt sich durch qualitativ hochwertige Programmierung, effizientere Hardware und Innovationen in der Hardwareproduktion verbessern. Dabei ist auch die Softwarearchitektur ausschlaggebend: Besonders bei Cloud-Desktop-Lösungen lässt sich durch sinnvolle Arbeitsverteilung Energie sparen. Außerdem liegt viel Potenzial in der effizienten Abstimmung von Hard- und Software. Durch die Berücksichtigung längerer Lebenszyklen für Softwareprodukte und eine bewusste Gestaltung der Entwicklungsprozesse lassen sich auch im Bereich der Softwareentwicklung Nachhaltigkeitsziele erreichen. Die Messbarkeit dieser Maßnahmen sind bspw. in den Vergabekriterien des Umweltzeichens „Blauer Engel“ für Ressourcen- und energieeffiziente Softwareprodukte reflektiert“ (www.oeffentliche-it.de/-/grune-software). Das Umweltzeichen (Blauer Engel) Ressourcen- und energieeffiziente Softwareprodukte (DE-UZ 215) kennzeichnet Software, die besonders energiesparend und effizient im Hinblick auf die Nutzung von Hardwarekomponenten ist. Des Weiteren bieten die mit dem Umweltkennzeichen ausgewiesenen Produkte den Nutzer*innen einen hohen Grad an Transparenz und Autonomie beim Einsatz der Software. Softwareentwickler können sich an den Kriterien orientieren, um Defizite in ihrer Programmierung ausfindig zu machen und zu beheben (www.blauer-engel.de).

Auf Strategien zur Vermeidung softwarebedingter Obsoleszenz geht die Studie Jaeger-Erben et al. (2023) ein. Es wurden Ansätze in drei Bereichen identifiziert: 1. Mindestanforderungen für den Marktzugang (z. B. Bereitstellung von sicherheitsrelevanten Software-Updates über einen Mindestzeitraum von 10 Jahren), 2. Transparenzmaßnahmen zur Förderung des Wettbewerbs (z. B. verpflichtende Angabe des garantierten Supportzeitraums und daraus resultierende Rechtsansprüche) und 3. Förderung von Öko-Innovationen (z. B. Förderung und Lehre nachhaltiger Softwareentwicklung).

Mögliche Rebound-Effekte

Wirkmechanismen

Effizientere Software kann jedoch möglicherweise auch zu Rebound-Effekten führen. Energieeffizientere Software braucht für die gleiche Rechenoperation weniger Energie. Dadurch kann die Software mehr bzw. zusätzliche Funktionen ausführen. Ein Beispiel ist MS Word: während die Funktion des Programms zunächst rein bei der Textverarbeitung lag, enthält es inzwischen u. a. auch Bildbearbeitungsfunktionen. Auf diese Weise könnte energieeffiziente Software zu einer steigenden Nutzung digitaler Anwendungen führen, da zusätzliche Funktionen zur Verfügung stehen (Komfort-Rebound-Effekte, Preis-Rebound-Effekte). Empirische Untersuchungen zu möglichen Rebound-Effekten energieeffizienter Software liegen allerdings nicht vor.

Bezogen auf *grüne Software* im oben beschriebenen Sinne, kann vermutet werden, dass Rebound-Effekte zwar theoretisch denkbar sind, vor dem Hintergrund der allgemeinen technologischen Entwicklung aber praktisch kaum ins Gewicht fallen. Sie werden von der allgemeinen Entwicklung im Bereich der Software überlagert, die auf Wachstum, Netzwerkeffekte und die Erschließung neuer Anwendungsbereiche (z. B. Entwicklung immer neuer Funktionen sowie zunehmende Integration von digitalen Geräten in Alltagsgegenstände) zielt. Im Zuge dessen wird die Nutzung digitaler Geräte insgesamt stark ausgeweitet. Die Effekte dieser allgemeinen Entwicklungen dürften um Größenordnungen höher ausfallen, als mögliche Rebound-Effekte grüner Software. Zudem gibt es derzeit nur sehr wenige Softwareprodukte, die den Kriterien der energiesparenden Programmierung entsprechen (bislang gibt es nur zwei Produkte, die nach den Kriterien des Blauen Engels zertifiziert wurden, siehe <https://www.blauer-engel.de/de/produktwelt/software>).

Ein Aspekt im Kontext der allgemeinen technologischen Entwicklung ist von besonderer Bedeutung: Das Mooresche Gesetz hat die technologische Entwicklung in den letzten Jahrzehnten maßgeblich geprägt. Die stetige Zunahme an Rechenleistung hat dazu geführt, dass Softwareentwickler weniger darauf achten mussten, ihre Programme effizient zu gestalten. Effizienz, die früher eine entscheidende Rolle spielte, um die begrenzten Ressourcen optimal zu nutzen, ist zunehmend in den Hintergrund gerückt. Stattdessen wird Software oft ressourcenintensiver gestaltet, als es notwendig wäre. Mit der Einführung von Cloud Computing hat sich dieser Trend noch verstärkt. Die Cloud bietet eine nahezu unbegrenzte Skalierbarkeit. Dies bedeutet, dass Unternehmen und Entwickler je nach Bedarf mehr Rechenleistung hinzubuchen können, wenn ihre Anwendungen diese erfordern. Auch dies verstärkt die vorherrschende Praxis, wonach bei der Programmierung nicht auf Effizienz geachtet wird. Anstatt einen sorgfältig optimierten Code zu entwickeln, greifen viele Programmierer auf umfangreiche Bibliotheken zurück, die nicht immer optimal auf die spezifischen Anforderungen zugeschnitten sind. Dadurch entsteht ein zusätzlicher Ressourcenverbrauch, der eigentlich vermeidbar wäre.

Ausmaß möglicher Rebound-Effekte

Aussagen zum Ausmaß möglicher Rebound-Effekte werden in den untersuchten Studien nicht getroffen.

Einflussfaktoren

Treiber für die Mehrnachfrage nach digitalen Leistungen und Produkten dürfte die generelle technologische Entwicklung sein, welche auf Effizienzverbesserungen abzielt und die Integration von digitalen Elementen inklusive Software in immer mehr Geräte und Objekte des Alltags sowie im Bereich der Produktion vorantreibt. Neue Versionen und auch Updates kommen sehr häufig mit neuen Funktionen auf den Markt. Dabei haben Nutzer*innen meist nicht die Möglichkeit zwischen Funktions- und Sicherheitsupdate zu wählen.

Um Rebound-Effekte zu vermeiden, sollte ein Bewusstsein dafür geschaffen werden, dass digitale Anwendungen trotz ihrer Immaterialität Ressourcen und Energie verbrauchen und CO₂-Emissionen verursachen. „Das Ziel sollte sein, diese [Anwendungen] möglichst emissionsarm bereitzustellen, und Praktiken zu vermeiden, welche deren Konsum und das Datenvolumen unnötig erhöhen“ (Bieser et al. 2022, S. 15).

Datenlage

Obwohl die Software einen erheblichen Einfluss auf Energie- und Ressourcenverbrauch der Digitalisierung hat, steht die Forschung zu den Umweltauswirkungen von Software noch am Anfang. In der Studie von Gröger et al. (2018) wird Forschungsbedarf u. a. „bei der Bewertung des Nutzens und der Funktionalität von Software gesehen. Der Betrachtungsrahmen der Untersuchungen sollte hin zum Prozess der Softwareentwicklung inklusive der sozialverträglichen Herstellung ausgedehnt werden. Vor dem Hintergrund der Relevanz von Datenübertragung über Netzwerke sollte der Energie- und Ressourcenverbrauch innerhalb von Netzwerken weitergehend erforscht und quantifiziert werden“ (Gröger et al. 2018, S. 21). Studien, die Rebound-Effekte effizienter Software separat betrachten und deren Anteil an der Mehrnutzung von digitalen Anwendungen quantifizieren, sind nicht vorhanden.

A.3.4 Cloud Computing

Definition

Unter Cloud Computing versteht man ein Konzept, bei dem Nutzer*innen von verschiedenen Endgeräten aus über ein Netz (in der Regel das Internet) auf die auf einem externen Server zur Verfügung gestellten IT-Ressourcen (z. B. Speichersysteme, Netze, Server, Anwendungen und Dienste) zugreifen können. Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik hat folgende Definition festgelegt: „Cloud Computing bezeichnet das dynamisch an den Bedarf angepasste Anbieten, Nutzen und Abrechnen von IT-Dienstleistungen über ein Netz. Angebot und Nutzung dieser Dienstleistungen erfolgen dabei ausschließlich über definierte technische Schnittstellen und Protokolle. Die Spannweite der im Rahmen von Cloud Computing angebotenen Dienstleistungen umfasst das komplette Spektrum der Informationstechnik und beinhaltet unter anderem Infrastruktur (z. B. Rechenleistung, Speicherplatz), Plattformen und Software.“ (BSI 2024b)

Darüber hinaus kann beim Cloud Computing zwischen drei Servicemodellen unterschieden werden: Software as a Service, Platform as a Service und Infrastructure as a Service.

Ziele und Einsatzbereiche

Cloud Computing hat sich in den letzten Jahren stark verbreitet, so dass es bereits in vielen Bereichen zum Standard geworden ist. Als zentraler Vorteil von Cloud Computing wird vielfach hervorgehoben, dass es zu einer Erhöhung der Flexibilität bei gleichzeitiger Reduzierung von Kosten und Aufwand führt (Marston et al. 2011). Unternehmen und Institutionen können durch das Auslagern von IT-Ressourcen (z. B. Virtuelle Desktop Infrastruktur, Online Storage, Videokonferenzen) aus der eigenen Organisation die Kosten für Hardware, IT-Betreuung und Wartung reduzieren und gleichzeitig ihren Mitarbeitern eine Vielzahl von Programmen und Diensten anbieten. Des Weiteren können durch das Cloud Computing Skalierungseffekte genutzt und IT-Dienstleistungen professionalisiert werden. Auch im Bereich der privaten Nutzung haben sich Cloud Modelle in vielen Bereichen durchgesetzt, beispielsweise beim Video-/ Musikstreaming oder bei Home-Office-Anwendungen (Gröger et al. 2021).

Cloud Computing hat in den letzten Jahren erheblich zugenommen. In Deutschland stieg der Anteil der Unternehmen, die Cloud-Dienste nutzen, von 22 % im Jahr 2018 auf 33 % im Jahr 2020 an (Clausen et al. 2022). Eine Studie im Auftrag der Europäischen Kommission ermittelte, dass im Jahr 2018 die Cloud-Dienste für 35 % des Energiebedarfs der Rechenzentren in Europa verantwortlich waren (Montevecchi et al. 2020). Bis zum Jahr 2025 soll der Anteil der Cloud-Anwendungen auf etwa 60 % ansteigen.

Erwartete Umweltpotenziale und von wem sie erwartet werden

Von Seiten der Industrie sowie von Seiten der Wissenschaft wird erwartet, dass Cloud Computing das Potenzial hat, den Energie- und Ressourcenverbrauch von IT-Anwendungen zu reduzieren, da Cloud-Rechenzentren IT-Dienste deutlich effizienter anbieten können, als dies im Fall von zentralen Lösungen in einzelnen Unternehmen möglich ist.

Eine US-amerikanische Studie verglich den Energiebedarf lokaler IT-Anwendungen in Unternehmen mit Cloud-basierten Lösungen und errechnete ein theoretisches Einsparpotenzial von 87 % (Masanet 2013). In der Studie Gröger et al. (2021) im Auftrag des Umweltbundesamtes wurde der CO₂-Fußabdruck virtueller Desktop Infrastruktur (VDI) berechnet und mit einem klassischen Desktop-Arbeitsplatz verglichen. Bei VDI wird am Arbeitsplatz lediglich ein Thin Client benötigt, Software und Datenspeicher werden über ein Cloud-Rechenzentrum zur Verfügung gestellt. Die Studie zeigt, dass eine VDI-Lösung gegenüber dem klassischen Desktop-PC einen um 39 Kilogramm geringeren CO₂-Fußabdruck aufweist.

Berücksichtigt wurde bei den Berechnungen der Herstellungsaufwand der Hardware sowie der Energieverbrauch im Rechenzentrum bzw. am lokalen Arbeitsplatz. Damit sind die jährlichen CO₂-Emissionen der VDI-Lösung um etwa 30 % geringer als beim Desktop-PC. „Das Beispiel VDI zeigt, wie hoch der zusätzliche Energie- und Ressourcenbedarf im Rechenzentrum pro Nutzer*in ist. In diesem Beispiel reduzieren sich jedoch auch die Treibhausgasemissionen bei der lokalen Informationstechnik, weil als Endgeräte statt Desktop-Computern energiesparende Thin Clients eingesetzt werden können. In der Gesamtbilanz der Arbeitsplätze reduzieren sich dadurch Ressourcen- und Energiebedarf. Da es sich hierbei nur um ein einzelnes untersuchtes Fallbeispiel handelt, ist dieses Ergebnis nicht grundsätzlich auf alle Cloud-Dienstleistungen übertragbar. Die effiziente Betriebsführung im Rechenzentrum trägt wesentlich zur Gesamtbilanz der VDI-Lösung bei.“ (Gröger et al. 2021, S. 140) Zu ähnlichen Ergebnissen kommt das Borderstep Institut, das das Energieeinsparpotenzial berechnet hat, wenn Unternehmen von Desktop-Arbeitsplätzen auf Cloud-Arbeitsplätze umsteigen. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass durch die Umstellung auf die Cloud-Lösung der Stromverbrauch pro Arbeitsplatz und Jahr um 42 % gesenkt werden konnte. Der Ausstoß von THG-Emissionen (inklusive Herstellung, Transport und Entsorgung der Hardware) konnte um 35 % verringert werden (Clausen et al. 2022).

Auch von Seiten der Industrie werden Umweltpotenziale durch Cloud Computing erwartet. Laut einer Umfrage von Bitkom (2023) besteht ein wichtiges Motiv von Unternehmen bei der Einführung von Cloud Computing darin, Kosten zu reduzieren (64 %) und CO₂-Emissionen zu sparen (63 %). Gleichzeitig befürchten viele der Befragten (76 %) aber auch, dass die einfache Skalierbarkeit von Cloud-Lösungen dazu führen kann, dass Software immer ressourcenintensiver programmiert wird. (Zum Aspekt ressourcenintensiver Software-Programmierung siehe oben Kapitel A.3.3 Grüne Software.)

Mögliche Rebound-Effekte

Wirkmechanismen

Die effiziente Bereitstellung von IT-Anwendungen und Diensten über Cloud Computing führt allerdings zu Rebound-Effekten. Die Nutzung von immer mehr datenintensiven Anwendungen und nimmt zu. Die vorhandene Literatur zu Rebound-Effekten von Cloud Computing beschäftigt sich hauptsächlich mit den Energie- und Ressourceneinsparpotenzialen. Eine Studie von Walnum und Andrae (2016) schätzt, dass durch die Effizienzvorteile die Nachfrage nach Cloud Computing steigt, so dass Energieeinsparungen möglicherweise durch eine Erhöhung des Datenverkehrs ausgeglichen werden. Ein Grund für die Mehrnachfrage ist, dass Cloud Computing dazu beiträgt, Rechenleistung auch für zusätzliche Anwendungen wie Videodienste, Künstliche Intelligenz und weitere Anwendungen flexibel bereitzustellen (Hintemann 2020; 2021). Die steigende Nachfrage nach Cloud-Diensten führt dazu, dass immer mehr Cloud-Rechenzentren aufgebaut werden. Tatsächlich ist die Zahl der Server ebenso wie deren Energieverbrauch sowohl in Deutschland als auch weltweit erheblich angestiegen. „Im Jahr 2020 gab es in Deutschland gemäß der im Vorhaben CliDitrans durchgeführten Modellrechnungen mit 2,4 Mio. Servern trotz massivem Einsatz von Virtualisierung 35 % mehr Server als im Jahr 2010. Der Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland stieg im gleichen Zeitraum ebenfalls um fast 60 % auf 16 Mrd. kWh im Jahr“ (Hintemann 2021).

Wie oben dargelegt, konnten verschiedene Studien (Gröger et al. 2021, Clausen et al. 2022) auf der Ebene von einzelnen Unternehmen eine deutliche Reduzierung des Energiebedarfs und der THG-Emissionen durch Umstellung auf Cloud-Lösungen feststellen. Clausen et al. (2022) gehen jedoch davon aus, dass die Energie-Einsparungen durch die Mehrnachfrage nach Cloud-Diensten und den damit verbundenen Bedarf nach Cloud-Rechenzentren überkompensiert werden

könnten. In dem untersuchten Fallbeispiel wurde festgestellt, dass zwar der Energieverbrauch pro Arbeitsplatz durch die Umsetzung auf Thin Clients gesenkt werden konnte, die Zahl der Computer-Arbeitsplätze im betrachteten Zeitraum aber gestiegen ist. Bezogen auf die THG-Emissionen nehmen die Autoren an, dass in Zukunft durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energien die Summe der THG-Emissionen der IKT voraussichtlich weitgehend konstant bleiben wird (Clausen et al. 2022; Hintemann et al. 2021). Allerdings fällt es schwer, die Zunahme von IT-Anwendungen und die gestiegene Zahl von Cloud-Rechenzentren konkret auf Rebound-Effekte des Cloud Computing zurückzuführen. Denn eine große Rolle spielt die allgemeine gesellschaftliche und technologische Entwicklung und der damit verbundene zunehmende Einsatz von zusätzlichen IT-Anwendungen. So hat bspw. die Zahl der Videokonferenzen seit der Corona-Pandemie stark zugenommen.

Neben dem Einsatz in Unternehmen sind auch die privaten Cloud Computing Anwendungen in Bezug auf Rebound-Effekte relevant. Die Rebound-Effekte von Musik-/Videostreaming und Home-Office sind in den Fallbeispielen 5 und 16 beschrieben.

Folgende Rebound-Effekte treten auf: Finanzielle Rebound-Effekte (Ressourcenpooling führt zu Kosten-Einsparungen bei Geräten, IT-Betreuung und Wartung); Zeit-Rebound-Effekte (On-Demand-Self-Service führt zu Zeiteinsparungen bei der Bereitstellung von Rechenkapazitäten); Komfort-Rebound-Effekte (breiter Netzwerkzugriff führt zu Unabhängigkeit bei der Nutzung von Cloud-Diensten über heterogene Client-Plattformen) (Adelmeyer et al. 2017).

Ausmaß möglicher Rebound-Effekte

Auf der Makroebene führt die Ausweitung von Cloud-Anwendungen künftig voraussichtlich zu einer Erhöhung des Energiebedarfs der IKT in Deutschland. Bei den THG-Emissionen der IKT wird vermutet, dass sie sich aufgrund des zunehmenden Anteils erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung zukünftig voraussichtlich auf konstantem Niveau bewegen (Clausen et al. 2022).

Einflussfaktoren

Rebound-Effekte werden durch den Einsatz von datenintensiven neuen IT-Anwendungen, Leistungen und Produkte verstärkt. Rebound-Effekte können vermindert werden, indem unnötiger Datenverkehr reduziert wird und Fehlanreize, die zu einer Erhöhung des Datenvolumens führen (z. B. Flatrates), vermieden werden. Ein weiterer Ansatz sind Anreize zur Datensparsamkeit und Ressourcenschutz bei Verbraucher*innen (Köhn et al. 2020).

Datenlage

Es liegen einige Studien zu Energie- und Ressourceneinsparpotenzialen von Cloud Computing auf der Ebene konkreter Fallbeispiele vor. Einschätzungen zu möglichen Rebound-Effekten sind nur vereinzelt vorhanden.

A.3.5 Künstliche Intelligenz

Definition

Künstliche Intelligenz (KI) definiert sich als „Computersysteme, die in der Lage sind, Muster in komplexen Datenmengen zu erkennen, und die anhand von Daten darauf trainiert werden, Probleme (auch in unbekanntem, veränderlichen Situationen) selbstständig zu lösen und Strategien anzupassen, d. h. zu „lernen“ (Wurm et al. 2021, S. 11). KI kann als „maschinelle Nachbildung von kognitiven menschlichen Fähigkeiten“ (Rohde et al. 2021, S.11) verstanden werden. Es wird zwischen starker und schwacher KI unterschieden, abhängig von ihrem

Leistungsumfang und ihrer Problemlösungsfähigkeit. Starke KI-Systeme, die bisher nur in theoretischen Überlegungen existiert, stellen eine umfassende Nachbildung menschlicher Intelligenz dar, während schwache KI-Systeme auf einer konkreten Aufgabe wie Sprach-, Bild und Texterkennung oder Prognostizierung spezialisiert sind (Rohde et al. 2021).

Ziele und Einsatzbereiche

In den letzten Jahren gab es eine rasante und dynamische Entwicklung, zunächst „mit der symbolischen, wissens-basierten KI und [...] auf Basis von Algorithmen des (tiefen) maschinellen Lernens, großer Datenmengen und nicht zuletzt immer performanterer Rechenarchitekturen“ (Zielinski & Lübben 2022, S. 99). Aufgrund ihrer Rolle als General Purpose-Technologie findet die Künstliche Intelligenz in verschiedenen Bereichen breite Anwendung, da sie überall dort eingesetzt werden kann, wo Daten zur Ableitung von Schlüssen oder Gewinnung von Erkenntnissen genutzt werden. Ihre Einsatzfelder reichen von Finanzwirtschaft, Gesundheitswesen, Handel und Logistik, Industrie, Bildung, Marketing und Soziale Medien, sowie Recht, Sicherheit, Energie, Mobilität und Umwelt. Die Verbreitung von KI-Systemen variiert dabei je nach Branche, wobei Telekommunikations- und Technologieunternehmen, Finanzinstitutionen sowie Automobilbranche zu den Vorreitern zählen (Rohde et al. 2021).

Erwartete Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

„KI-Systeme bilden vergangene und aktuelle Vorgänge ab (z. B. Verkehrsnutzungsmuster, Kundenverhalten, Artenvielfalt), prognostizieren bzw. modellieren künftige Entwicklungen/Vorgänge (z. B. Wetter, Marktnachfrage, Verkehrsnutzung), geben Empfehlungen basierend auf Monitoring-/Vorhersagedaten (z. B. Maschinennutzung, Kundenangebote, öffentliche Infrastrukturangebote) und assistieren automatisiert bei Entscheidungen (z. B. Logistik, Preisentwicklung, Anlagenwartung, Produktion, intelligente Verkehrssysteme, Stromnetz)“ (Ammicht Quinn et al. 2022, S.18). Durch diese vielseitigen Fähigkeiten hebt die Plattform Lernende Systeme, die von der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech) gegründet wurde, das Potenzial von KI-Systemen zur Lösung ökologischen Herausforderungen hervor. Gleichzeitig setzt die hohen Erwartungen an ihren Beitrag zur Erreichung der Ziele der nachhaltigen Entwicklungen. KI eröffnet vielfältige Einsatzmöglichkeiten, u. a. in der Präzisionslandwirtschaft, der Verteilung der Energienetze, der Kreislaufwirtschaft, der Umweltüberwachung bzw. Präzisionsüberwachung von Ökosystemen. Zudem kann KI zur Vorhersage von Lebensräumen, Migrationsmustern und Überwachung von Habitatverlusten eingesetzt werden. Dazu gehört auch die Vorhersage und Verfolgung von Schadstoffausbreitung, die Überwachung von Meeresströmungen, die Vorhersage von Unwettern und Dürren, Echtzeit-Überwachung bzw. Management der Wasserversorgung oder die Modellierung von Extremwetterereignissen (Ammicht Quinn et al. 2022). Eine Studie des Umweltbundesamtes (Jetzke et al. 2019) beleuchtet ähnliche Potenziale von KI in konkreten Anwendungsbereichen. Im Bereich Mobilität kann KI durch den Einsatz von autonomen Fahrzeugen einen flüssigeren Verkehrsablauf ermöglichen. Im Energiesektor kann KI zur Dezentralisierung von Netzen und Steuerungsmechanismen sowie zur Analyse von Echtzeitdaten über Stromangebot und -bedarf beitragen. Darüber hinaus ermöglicht KI im Gebäudesektor die optimale Steuerung von Heizung und Kühlung moderner Gebäude, indem Energiepreis- und Wetterdaten miteinander verknüpft werden. Auch in der Landwirtschaft werden mithilfe satellitengestützter Erdbeobachtungssystemen und lokaler Sensoren umfangreiche Daten über den Zustand landwirtschaftlicher Flächen erfasst. Datenanalysen können zu verbesserten Entscheidungs- und Prognosemodellen führen, die eine Beratung und Ertragssteuerung auch bei kleinskaligen Anbaumethoden verbessern.

Mögliche Rebound-Effekte

Wirkmechanismen

Der Energie- und Ressourcenverbrauch von KI-Systemen und die damit verbundenen ökologischen Risiken stehen zunehmend im Fokus (Strubell et al. 2019; Schwartz et al. 2020; Kaack et al. 2020; Rohde et al. 2021; Zielinski & Lübben 2022). Mit der wachsenden Verbreitung und dem Trend zu immer größeren Modellen steigen auch die ökologischen Belastungen. Zwar sorgt das Mooresche Gesetz für Verbesserungen in der Computer Hardware, wodurch Berechnungen energieeffizienter ausgeführt werden können, doch wird der exponentielle Rückgang des Energieverbrauchs pro Recheneinheit durch den wachsenden Trend zu größeren Modellen ausgeglichen. Zwischen 2012 bis 2018 stieg Rechenleistungsbedarf für das Training von KI-Systeme um das 300.000-fache - vor allem aufgrund der verstärkten Nutzung paralleler Algorithmen (Rohde et al. 2021).

Der direkte Energieverbrauch von KI-Modellen erstreckt sich über verschiedene Phasen: Entwicklung, Training und Anwendung (einschließlich Inferenz und Datenmanagement). Besonders energieintensiv ist die Entwicklungsphase, in der durch aufwendige Experimente neue Modellarchitekturen entworfen werden. Dabei finden oft zahlreiche Trainingsläufe mit unterschiedlichen Konfigurationen statt (Rohde et al 2019). Vor allem bei sehr großen Modellen entstehen erhebliche Mengen an CO₂-Emissionen. Strubell et al. (2019) stellen fest, dass das Entwickeln und Optimieren eines einzigen Modells Emissionen verursachen können, die vergleichbar mit denen eines Personenkraftwagens über dessen gesamten Lebensdauer sind. So führt die Entwicklung großer Sprachmodelle und die Verarbeitung umfangreicher Datensätze zu mehr als 280.000 kg CO₂e. Das entspricht dem CO₂ Ausstoß von fünf Autos über deren gesamten Lebensdauer. Betont wird jedoch (Rohde et al. 2019), dass solche rechenintensiven Entwicklungsprozesse nur selten und von wenigen Akteuren durchgeführt werden. Während der Energieverbrauch in den Trainings- und Inferenzphase zwar geringer ist, werden diese Prozessen deutlich häufiger durchgeführt.

Die Entwicklung und der Einsatz von KI-Systemen erfordern den umfangreichen Aufbau von Infrastruktur. Zusätzlich zum Energiebedarf der Hardware entstehen während des Betriebs der Rechenzentren weitere Energieaufwände, etwa durch Leistungsverluste, Kühlung, Beleuchtung. Zur Verbesserung der Energieeffizienz von Rechenzentren werden vermehrt wasserintensive Kühlmethode eingesetzt, was in Regionen mit Wasserknappheit problematisch sein kann (Rohde et al. 2021). So setzen Tech-Konzerne zunehmend auf Atomstrom (durch den Betrieb alter Kernkraftwerke oder Entwicklung neuer Reaktortechnologien), um diesen hohen Energiebedarf von KI-Modellen und Anwendungen zu decken. Denn eine Durchführung einer Google-Suche mit KI verbraucht dabei zehnmal so viel Energie (Holtermann et al. 2024, 16 Oktober; Hintemann et al. 2024, 10 Oktober).

Zudem führt der verstärkte Einsatz von KI und der entsprechenden Hardware zu einem Anstieg des Elektronikabfalls, da diese Technologien sich kontinuierlich weiterentwickeln und die Hardware in regelmäßigen Abständen erneuert werden muss. Trotz der hohen Recyclingfähigkeit von 70 bis 90 % des Gewichts elektronischer Produkte erfolgt nur eine geringfügige Wiederverwertung. So werden in der Regel z. B. die meisten Seltenen Erden aufgrund ihrer geringen Menge in jedem Produkt nicht recycelt, sondern enden auf Mülldeponien²⁸ (Rohde et al. 2021).

²⁸ Diese niedrigen Recyclingquoten sind auf diverse Faktoren zurückzuführen: die komplexe Materialzusammensetzung, das Fehlen einer Infrastruktur von Recyclinganlagen, unzureichende Anreize für Unternehmen zur Optimierung der Langlebigkeit und Recyclingfähigkeit ihrer Produkte sowie das Fehlen von Systemen zur Rückgewinnung und zum Recycling von Elektronikabfällen (Rohde et al. 2021).

Mögliche Auswirkungen von KI auf Produktions- und Konsummuster sollten auch erwähnt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Nutzung von KI im Marketing zur Erstellung personalisierter Werbeanzeigen, die auf individuelle Kundenprofilen basieren. Dies könnte folglich eine erhöhte Konsumnachfrage erzeugen, was wiederum zu einem Anstieg der damit verbundenen Emissionen und Ressourcenverbräuche führen könnte. Gleichzeitig kann KI im Bereich des Marketings jedoch auch als Werkzeug dienen, um Nachhaltigkeitsbemühungen auf der Nachfrageseite zu fördern und ein nachhaltiges Konsumverhalten zu unterstützen (Rohde et al. 2021). Neben dem Konsum erweist sich die Produktion als vielversprechendes Anwendungsfeld der KI, um Prozesse entlang der Wertschöpfungskette zu optimieren und so bei der Steigerung der Ressourceneffizienz zu helfen. Dazu zählen die Optimierung von Lieferketten, die Verbesserung der Produktionsqualität, die Vorhersagen von Maschinenausfällen sowie die Optimierung von Heiz- und Kühlsysteme, etc. (Rohde et al. 2021). Jedoch könnten diese Effizienzsteigerungen durch KI zu einer erhöhten Produktion bestehender Güter oder zur Entwicklung neuer Produkte führen (Rohde et al. 2021; Zimmermann & Frank 2019). Laut einer Umfrage von Deloitte (2017) erhoffen sich Führungskräfte marketingrelevante Vorteile und erwarten Verbesserungen von Produkten sowie die Entwicklung neuer Produkte und die Erschließung neuer Märkte. Zudem zeigt eine Analyse eines Datensatzes von 74 Ländern und Regionen weltweit für den Zeitraum 1993 bis 2019 (Luan et al. 2022), dass der Einsatz von Automatisierungstechnologien und Künstlicher Intelligenz in der Industrie zwar die Energieeffizienz und Produktivität steigert, jedoch auch Anreize für eine Produktionssteigerung schafft. Dies wiederum führt zu einem Anstieg des Gesamtenergieverbrauchs und letztlich zu einer Verschlechterung der Luftqualität.

Es sind insgesamt materielle und finanzielle Rebound-Effekte festzustellen.

Ausmaß eines möglichen Rebound-Effektes: Wie groß ist der Rebound-Effekt

Es gibt keine vorhandenen Studien, die die Größe des Rebound-Effektes der Künstliche Intelligenz empirisch untersucht haben.

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Die Größe der Rebound-Effekte hängt von technologischen Einflussfaktoren, nämlich von der Größe der Modelle.

Datenlage

Analysen der Nachhaltigkeitseffekte entlang des Lebenszyklus – vom Datenmodell und Systemdesign, über die Modellentwicklung und -nutzung bis hin zur Entsorgung der Hardware wurden nur begrenzt durchgeführt (Rohde et al. 2021; Henderson et al. 2020; Vinuesa et al. 2020; Strubell et al. 2019; Wurm et al. 2021). Eine Metastudie von Stede et al. (2024) stellt fest, dass trotz zahlreicher Studien, die sich mit Umwelteffekten der Digitalisierung auseinandersetzen, der Wissensstand über das Ausmaß der Potenziale in vielen Bereichen lückenhaft bleibt. Während eine beträchtliche Anzahl von Veröffentlichungen den Bereich KI abdecken, sind nur wenige quantitative Analysen vorhanden und es fehlen teilweise Bilanzierungen.

A.3.6 Augmented and Virtual Reality

Definition

Die Erweiterte Realität (Augmented Reality (AR)) beschreibt die Überlagerung und Erweiterung der Realitätswahrnehmung durch computergestützte erstellte Einblendungen von Inhalten und Informationen direkt im Sichtfeld der Nutzer*innen. Dies entsteht durch das Zusammenspiel von

Hardwarekomponenten, darunter Eingabesysteme wie Kameras, Sensoren und Touchscreens, Ausgabesysteme wie Datenbrillen, Monitore und Kontaktlinsen mit Display, sowie Softwarekomponenten für die Datenverarbeitung. Diese Erweiterung der Realitätswahrnehmung eröffnet Nutzer*innen die Möglichkeit, auf relevante Daten, Informationen und Bilder zuzugreifen. Die virtuelle Realität (Virtual Reality (VR)) geht noch einen Schritt weiter, indem sie die physische Realität vollständig ausblendet und stattdessen eine virtuelle und dreidimensionale Welt durch Computer und Programme simuliert, mit der Nutzer*innen interagieren können. Neben Datenbrillen können auch Datenhandschuhe, Ganzkörperanzüge, Interaktions- und Navigationsgeräte sowie Geräte zur Erfassung von Gesten oder Haptik zum Einsatz kommen (Vihl et al. 2021).

Ziele und Einsatzbereiche

Das Ziel dieser Technologien besteht darin, die wahrgenommene, physische Umgebung vom Nutzer durch virtuelle Elemente zu ergänzen bzw. sogar zu ersetzen. AR und VR bieten aufgrund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Während AR hauptsächlich als Alltagsassistent dient und als Ergänzung des Smartphones fungiert, schafft VR eine immersive Umgebung oft für Freizeit- oder Bildungsbereich. Beide Technologien eröffnen ein breites Spektrum an Anwendungsbereichen wie Handel und Konsum, Ausbildung und Arbeitswelt, Gesundheitssektor mit neuen Therapie- und Pflegeansätzen, Tourismus, Freizeit und Unterhaltung sowie an Schaffung neuer oder verbesserten Dienstleistungen, wie virtuelle Besuche historischer Schauplätze, Urlaubsorte oder Filmwelten und neue Infrastrukturen wie virtuellen Einkaufszentren (Kahlenborn et al. 2018; Jetzke et al. 2020).

Als wesentlicher Treiber der Entwicklung sind einflussreiche IT-Unternehmen, wie *Microsoft*, *Facebook* und *Google*, die selbst aktiv in AR, MR und VR investieren oder sogar eigene Geräte entwickeln. *Microsoft*, als Hersteller von *HoloLens*, nutzt seine unternehmenseigenen Sparten *Windows* und *YouTube*, um die Verbreitung dieser Technologie zu fördern. Auch *Facebook*, Eigentümer von *Oculus*, einem führenden Hersteller von Software und Hardware zur Nutzung von VR, unterstützt bereits die Einbettung von 360°-Videos. *Google* hat ebenso ein starkes Interesse an der Durchsetzung von AR und VR und hat bedeutende Möglichkeiten, diese Entwicklung voranzutreiben. Obwohl es eine Vielzahl von Markteinschätzungen gibt, wird allgemein ein bedeutendes Wachstumspotenzial für AR und VR erwartet. Virtual-Reality-Brillen für Smartphones und Tablets bieten einen kostengünstigen und einfachen Einstieg und beschleunigen so die Verbreitung und die Marktdurchdringung (Kahlenborn et al., 2018; Jetzke et al. 2020).

Erwartete Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Eine UBA-Studie (Kahlenborn et al. 2018) sieht in die VR und AR die Möglichkeit, die Informiertheit über Nachhaltigkeitsaspekte zu fördern. AR kann dazu beitragen zusätzliche und umweltrelevante Informationen zu ihrer Umgebung einzublenden und als Orientierungshilfe zu dienen. Beispielsweise können Nutzer*innen Informationen zu nachhaltigeren Verkehrsmöglichkeiten bei der Reiseplanung erhalten oder sich über umweltschonende Lebensmittel informieren. Zukünftig besteht das Potenzial, diese Präsentation von Produkten nicht nur im Onlinehandel, sondern auch am Point of Sale personalisiert anzupassen, wodurch digitale Grüne Berater effektiver in den Einkaufsprozess integriert werden könnten. Zudem kann VR konkrete alternative Alltagspraktiken und Verhaltensweise veranschaulichen und so Szenarien direkt erfahrbar machen. Durch diese direkte Konfrontation mit verschiedenen Realitäten, in die der Nutzer vollständig eintaucht, werden die Auswirkungen des eigenen Handelns sichtbar gemacht und könnte zu einer bewussteren und nachhaltigeren Konsumhaltung führen.

Außerdem sehen Forscher*innen der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin Potenzial in der Nutzung von Augmented-Reality-basierter Visualisierung auf mobilen Endgeräten im Rahmen von Planungen von Erneuerbaren-Energie-Anlagen. Diese ermöglicht es, geplante Veränderungen im Landschaftsbild, die durch Projekte wie Windkraft-, Photovoltaikanlagen oder den Ausbau von Stromnetzen entstehen, realitätsnah in der jeweiligen räumlichen Situation darzustellen. Auf diese Weise könnte die Akzeptanz solcher Vorhaben in der Bevölkerung gestärkt werden (Burkhard et al. 2022a; 2022b). Auch das Bundesamt für Naturschutz erkennt in Augmented-Reality Potenzial, um Naturbildung und –bewusstsein zu fördern, indem sie interaktiv in Bildungs- und Erlebnispfade sowie für Outdoor-Spiele integriert wird. So wird eine App erwähnt, die Besucher von einem virtuellen Guide durch den Wald führen lässt, wo sie an verschiedenen Stationen die Funktionen, Leistungen und Bedrohungen des Ökosystems Wald kennenlernen. Möglich ist es auch, die Grundlagen nachhaltiger Forstwirtschaft von einem Hologramm von Expert*innen erläutern zu lassen oder den Wachstumsprozess eines Baumes in einer dreidimensionalen Zeitraffer-Animation zuzusehen (Schneider et al. 2023; Bengel 2023). Gleichzeitig soll sichergestellt werden, dass die Technik nicht nur als attraktives Feature dient, sondern einen klaren didaktischen Mehrwert bietet – und zwar „im Naturraum neue Perspektiven eröffne[n], verborgene Prozesse veranschaulich[en] und komplexe Inhalte auf eine Art näher[zubringen], wie es ohne diese Hilfsmittel nicht möglich wäre“ (Bengel 2023, S.49).

Mögliche Rebound-Effekte

Wirkmechanismen

Als direkte Umweltauswirkung verursachen dreidimensionale 360°-Videos ein erheblich höheres Datenvolumen im Vergleich zu herkömmlichen Videos, das bis zu 20-mal größer sein kann. Moderne Komprimierungsalgorithmen können allerdings diesen erhöhten Bedarf an Speicherplatz und Übertragungsraten teilweise oder sogar deutlich zu reduzieren. Trotzdem ist eine Steigerung des Datenvolumens um mindestens zweistellige Prozentsätze erforderlich, um eine attraktive und ansprechende Bildqualität für den Konsument sicherzustellen (Kahlenborn et al. 2018; Lange & Santarius 2018). Die technische Ausstattung von VR umfasst nicht nur von High-Tech Brillen, sondern auch Controller, externe Sensoren, möglicherweise in Zukunft sogar VR-Anzüge. Diese Vielfalt an Geräten könnte aufgrund des starken Bedürfnisses nach immersiven Erfahrungen zu kurzen Produktzyklen führen. Konsument*innen greifen regelmäßig auf die neueste verfügbare Technologie zurück, da sich die Technik kontinuierlich weiterentwickelt und funktionstüchtige Geräte regelmäßig durch leistungsstärkere Versionen ersetzt werden (Kahlenborn et al. 2018; Vihl et al. 2021).

In virtuellen Einkaufszentren können positive Konsumerfahrungen geschaffen und somit die Zahlungsbereitschaft erhöht werden. Dies könnte zu einem Ausbau entsprechender Angebote führen. Beispielsweise könnte VR-Technologien in der Modebranche dazu führen, dass Kund*innen in der virtuellen Realität vermessen und Kleidungsstücke virtuell anprobiert werden, was die Attraktivität des E-Commerce steigern könnte. Perspektivisch könnte sich eine ähnliche Dynamik auch auf Produkte, die durch MR in die Umgebung eingeblendet werden. Durch die authentische Darstellung in MR und VR könnten Konsument*innen eher für Produkte wählen, die ihren individuellen Vorstellungen und Bedürfnissen entsprechen, was Rücksendungen reduzieren könnte. Gleichzeitig könnte ein erhöhtes Konsumniveau entstehen, besonders wenn Verbraucher*innen von persönlichen digitalen Assistenten mit künstlicher Intelligenz beraten werden. Diese werden von Unternehmen bereitgestellt, die durch Kooperationen mit Händlern und Herstellern den Konsum ankurbeln möchten (Kahlenborn et al. 2018). Laut Vermutungen von Lange & Santarius (2018) könnte „auch virtuelle Einkaufszentren sowie mittels Augmented Reality im stationären Einzelhandel eingesetzte

Konsumanimationen – von der Hervorhebung von Sonderangeboten bis hin zu suggestiven Kaufmanipulationen – [...] das bestehende Konsumniveau noch weiter steigern“ (S.56). Mit AR und VR könnte der Bereich des Marketings ein neues Medium erhalten, um neue Marken- und Produkterlebnisse zu schaffen, anstelle sich ausschließlich auf traditionelle Werbemethoden zu verlassen. Insbesondere durch den Einsatz von Virtual Reality und ein gezieltes Storytelling können Marken Emotionen auslösen und ihre Botschaften wirkungsvoll vermitteln. Mit der zusätzlichen Dimension der Immersion können Konsument*innen aktiv am Erlebnis teilnehmen und auf neuartige Weise mit Marken und Produkte interagieren (Illenberger 2020). „Die bisweilen recht abstrakte Produktpräsentation aus Bildern und Beschreibungen im Online-Handel könnte zukünftig einem virtuellen Erleben von Produkten mit ihren Eigenschaften weichen und ein stärkeres Produkterlebnis hervorrufen. Der stationäre Handel kann wiederum mit AR-basierter Werbung neue Kund*innen anlocken und Produkte in technisch aufwändigen AR- oder gar VR-Erlebniswelten virtuell präsentieren“ (Jetzke et al. 2020, S. 26)

Unternehmen können auch AR und VR zu Marketingzwecken nutzen und somit die Konsumintentionen vor allem im Bereich des Tourismus steigern. So werden Reiseangebote bereits im Voraus inzenziert, wodurch potenzielle Kund*innen detaillierte visuelle Einblicke in die Destination, Unterkünfte und Attraktionen erhalten, noch bevor sie ihre Reise antreten. Auf einigen touristischen Plattformen haben Unternehmen bereits Funktionen integriert, die es Kund*innen ermöglichen, beispielsweise Ferienunterkünfte oder Flugsitzplätze vor der Reise virtuell zu erkunden. Es besteht das Risiko, dass touristische Destinationen aufgrund dieser attraktiven Darstellungen verstärkt besucht werden (Jetzke et al. 2020). Im Tourismusmarkt werden bereits VR-Brillen zunehmend als Mittel zur Präsentation von virtuellen Vorschauen auf potenzielle Reiseziele eingesetzt, um der Kundschaft einen Einblick zu geben, was sie bei ihrer Ankunft erwartet. Thomas Cook hat 880 Reisebüros mit VR-Brillen ausgestattet, um Kund*innen durch eine 360°-Ansicht detaillierte Einblicke in ihre potenziellen Urlaubsziele zu ermöglichen, was im Vergleich zu konventionellen Katalogfotos zu einer deutlichen Steigerung der Reiselust führt. Die Technologie erlaubt es Kund*innen, das Reiseziel sowie die Unterkunft und den Ausblick vom Balkon virtuell zu erkunden und zu bewerten (Illenberger 2020). Empirische Ergebnisse von Moura & Carnicelli-Fihlo (2017)²⁹ stellen VR als Instrument zur Steigerung von Besuchsabsichten im Vergleich von Websites und Broschüren dar. Diese Erkenntnis wird durch weitere empirischen (Wei et al. 2019)³⁰ gestützt, welche zeigen, dass die Vorführung von 360-Grad-Videos in verschiedenen Kontexten wie Freizeitparks und Achterbahnerfahrungen, Museen (Jung et al. 2016)³¹ sowie anderen Sehenswürdigkeiten und kulturellen Stätten (Marasco 2020; Ouerghemmi et al. 2023) die Bereitschaft zu einem realen Besuch erhöht. Faktoren wie die ästhetische Qualität virtueller Welten sowie die Attraktivität von VR-Erlebnissen spielen dabei eine bedeutende Rolle.

Es können Materielle-Rebound-Effekte und Komfort-Rebound-Effekte auftreten.

Ausmaß eines möglichen Rebound-Effektes: Wie groß ist der Rebound-Effekt

Zum Ausmaß möglicher Rebound-Effekte liegen bislang keine Informationen vor.

29 Die Studie vergleicht den Einfluss verschiedener Kommunikationsmedien (Virtual Reality, Websites und Broschüren) auf die Wahrnehmungen deutscher älterer Reisender bezüglich eines 4-Sterne-Hotels während ihres Entscheidungsprozesses. Die Stichprobe bestand aus 26 Personen.

30 Die Stichprobe bestand aus 396 Personen.

31 Es wurde ein Experiment mit einer Stichprobe von 163 Personen durchgeführt. Der Untersuchungsobjekt war das Geevor Tin Mine Museum, ein ehemaliges Zinnbergwerk und UNESCO-Weltkulturerbe in Cornwall, Großbritannien.

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Mögliche Rebound-Effekte werden durch den Einsatz von datenintensiven neuen IT-Anwendungen, Leistungen und Produkte verstärkt. Rebound-Effekte können vermindert werden, indem unnötiger Datenverkehr reduziert wird und Fehlanreize, die zu einer Erhöhung des Datenvolumens führen, vermieden werden.

Datenlage

Es liegen zum Tourismus Bereich empirisch erhobene Daten vor, die Effekte von VR untersuchen in der Entscheidungsfindung von Reisezielen und die Bereitschaft diese vor Ort zu besuchen (Wei et al. 2019; Jung et al. 2016; Marasco 2020; Ouerghemmi et al. 2023). Doch die Datenlage zu Umweltbelastungen von AR und VR-Technologie ist insgesamt sehr begrenzt und lückenhaft und es liegen stattdessen Einschätzungen und Vermutungen vor.

A.3.7 Quantencomputing

Definition

Quantencomputing ist eine Technologie bei der die Prozessoren, die Gesetze der Quantenmechanik nutzen, um Berechnungen auszuführen. „Im Unterschied zu den Bits von Digitalrechnern sind die kleinsten Recheneinheiten der Quantencomputer, die „Quantum Bits“ (Qubits), in der Lage, sich untereinander nach speziellen Gesetzmäßigkeiten der Quantenmechanik zu verbinden und damit einen wesentlich komplexeren Gesamtzustand anzunehmen“ (BMBF 2022). Dadurch ist es möglich, Rechenschritte parallel statt – wie bei herkömmlichen Computern- nacheinander durchzuführen.

Ziele und Einsatzbereiche

Quantencomputing ist eine Zukunftstechnologie. Noch steckt die Technologie in den „Kinderschuhen“ (BMBF 2022). Grundsätzlich sollen Quantencomputer in Zukunft dazu beitragen, komplexe Probleme zu lösen, wozu konventionelle Computer nicht oder nur mit sehr hohem Rechen- und Zeitaufwand in der Lage sind. Quantencomputer und ihre Hardware-Plattformen und Software-Anwendungen werden gegenwärtig ausschließlich zur Lösung spezifischer Probleme entwickelt. Die Optimierung ist ein Entwicklungsschwerpunkt für den Einsatz von Quantencomputern. Ein Beispiel ist die Autoindustrie, die auf die Optimierung von Verkehrsflüssen und zur Verhinderung von Staus abzielt. Ein weiteres Anwendungsfeld ist die Simulation. In der Luftfahrt sollen Quantencomputer helfen, durch Simulation (z. B. des Luftstroms an Tragflächen) die Zeitspanne für Änderung am Flugzeugdesign zu verkürzen (Fasnacht, Straube 2024). Ein Anwendungsfeld ist die Simulation von Molekülen (spezifisch Proteine und deren Bindungen an andere Moleküle) und ihrem chemischen Verhalten, was eine schnellere und präzisere Medikamentenentwicklung ermöglichen könnte (Roche 2022). Ein weiterer Einsatzbereich für Quantencomputing ist das Training von KI-Modellen. Sie könnten mit Hilfe von Quantenalgorithmien „exponentiell beschleunigt werden“ was breite Anwendungsmöglichkeiten in vielen Gebieten, in denen KI-Modelle eingesetzt werden, eröffnen könnte (Fasnacht, Straube 2024). In den verschiedenen Bereichen hat Quantencomputing das Potenzial, die Prozesse zur Optimierung, Simulation oder wie im Fall des KI-Trainings exponentiell zu beschleunigen.

Erwartete Umwelteffizienzpotenziale und von wem sie erwartet werden

Quantencomputer bieten Möglichkeiten die Ressourcenschonung und den Umwelt- und Klimaschutz zu unterstützen. Anwendungen finden sich unter anderem im Bereich der Materialforschung, der Steigerung von Energie- und Ressourceneffizienz und der Optimierung

von Prozessen in der Industrie oder im Verkehrsbereich. Auch zur Optimierung von Klimamodellen werden Quantencomputer zur Steuerung komplexer Netze genutzt.

Mögliche Rebound-Effekte

Ob die jeweiligen Ansätze tatsächlich zu öko-effizienten oder umweltentlastenden Lösungen führen (können), ist im Einzelfall genau zu prüfen. Dabei sind die direkten Umweltwirkungen, mit der Herstellung und dem Betrieb von Quantencomputern verbunden sind, zu berücksichtigen. Beispielsweise haben Quantencomputer einen hohen Energiebedarf, da einige Hardware-Plattformen stark gekühlt werden müssen. Dem stehen indirekte Umweltwirkungen gegenüber, die in den unterschiedlichen Anwendungsfeldern durch die Nutzung von Quantencomputern entstehen.

Wirkmechanismen

Dabei können auch Rebound-Effekte auftreten. So könnten beispielsweise mit Hilfe von Quantencomputern spezifische Lösungen dafür entwickelt werden, wie Fahrzeugflotten besser gesteuert werden können, womit der Verkehrsfluss verbessert oder Parkraumbedarf besser bewirtschaftet werden kann, oder im Flugverkehr zur Optimierung von Flugrouten, Fluggeschwindigkeit und Treibstoffmengen eingesetzt werden. Verbesserte Effizienz kann jedoch möglicherweise zu Rebound-Effekten führen, was die Umweltentlastungseffekte durch Quantencomputing nivellieren könnte (UBA 2013).

Möglich sind Preis-Rebound-Effekte und materielle Rebound-Effekte (infolge von Energie- und Stoffstromverlagerungen in andere Bereiche, z. B. mit Blick auf den Modal split im Verkehrsbereich).

Ausmaß eines möglicher Rebound-Effektes: Wie groß ist der Rebound-Effekt

Das Ausmaß möglicher Rebound-Effekte lässt sich bis dato nicht abschätzen.

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Welche Faktoren, mögliche Rebound-Effekte, die Quantencomputing hervorgerufen werden, verstärken oder vermindern, lässt sich nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand nicht sagen. Generell hängt dies sehr stark von den spezifischen Nutzungs- und Rahmenbedingungen, unter denen die Technologie eingesetzt wird, ab.

Datenlage

Bei Quantencomputing handelt es sich um eine Zukunftstechnologie, die unter dem Gesichtspunkt von möglichen Rebound-Risiken bis dato nicht untersucht wurde.

A.3.8 Digitaler Zwilling

Definition

Ein Digitaler Zwilling ist eine virtuelle Repräsentation und eine exakte digitale Abbildung eines realen und physischen Produkts, Prozesses oder Systems, die regelmäßig und mit hoher Präzision synchronisiert wird. Digitale Zwillinge können eigenständig als Repräsentationen existieren, werden aber häufig in größere Systeme zur Überwachung, Analyse und Steuerung integriert. Sie erfassen Echtzeitdaten von physischen Assets und übertragen diese in die Modelle Digitaler Zwillinge und aktualisieren sie dementsprechend. Sie führen Analysen, Simulationen, Optimierungen oder andere Berechnungen durch und bieten Steuerungs- und Verbesserungsmöglichkeiten der physischen Assets oder Prozesse an (Fraunhofer IOSB o.J.).

Ziele und Einsatzbereiche

Der Digitale Zwilling kann für unterschiedliche Zwecke entwickelt werden und in zahlreiche Bereiche eingesetzt werden: in der Landwirtschaft, Wasserwirtschaft, Verkehr und Logistik, Grundstoffe, Chemie, Pharma sowie Bau und Immobilien, Produktion, Elektrotechnik und Maschinenbau (Schmidt 2023). Der Digitale Zwilling der Produktion bildet den Einsatz von Maschinen und Anlagensteuerungen bis hin zu ganzen Fertigungsstraßen in der virtuellen Umgebung ab. Diese virtuelle Simulation ermöglicht die frühzeitige Identifikation und Vermeidung von Fehler- oder Störquellen vor dem Betriebsstart, wodurch Zeit und Ressourcen eingespart werden. Auch hochkomplexe Fertigungsprozesse können in kürzester Zeit aufwandsarm berechnet, getestet und programmiert werden. Während der Entwicklungsphase lässt die entwickelte Softwarelösung einen digitalen Zwilling eines Produktes entstehen, der in digitaler Umgebung simuliert und getestet werden kann. Dadurch wird auf neue physische und kostspielige Prototypen zur Identifizierung von Problemen und zur Durchführung von Anpassungen verzichtet (Biedermann & Topic 2020).

Erwartete Umweltpotenziale und von wem sie erwartet werden

Laut dem Nachhaltigkeitsbericht der Österreichischen Mineralölverwaltung Aktiengesellschaft (OMV 2021), einem österreichischen Erdöl- und Erdgaskonzern, konnte durch die Entwicklung eines Digitalen Zwillings die Vorwärmkette in einer ihrer Rohödestillationsanlage optimiert werden. Genauer gesagt werden mithilfe von Prozesssimulation die Wahl der Reinigungszyklen sowie die Strömungsverhältnisse in den eingesetzten Wärmetauschern optimiert. Dadurch konnte die Energieeffizienz erhöht und der jährliche CO₂-Ausstoß um bis zu 18.000 t CO₂ reduziert werden.

Seitens der Politik auf der europäischen Ebene hat der Europäischen Kommission eine Initiative „Destination Earth (DestinE)“ gestartet, mit dem Ziel einen Digitalen Zwilling der Erde zu entwickeln. Durch diesen Digitalen Zwilling sollen ökologische Veränderungen und menschliche Aktivitäten überwacht, simuliert und prognostiziert werden, um eine nachhaltige Entwicklung zu unterstützen. Im Fokus stehen zunächst die Auswirkungen des Klimawandels und extremer Wetterereignissen sowie deren sozioökonomischen Auswirkungen und möglichen Anpassungs- und Minderungsstrategien (Europäische Kommission 2023). Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie hat ebenfalls einen Digitalen Zwilling für Deutschland entwickelt - ein neues Produkt, das dabei hilft „nachhaltige Entscheidungen bei allen Raum- und Geo-bezogenen Aufgaben der Bundesverwaltung zu unterstützen“. „Die Basis des Digitalen Zwillings Deutschland wird ein intelligentes, räumliches, digitales Abbild Deutschlands sein, mit dem sich Zukunftsszenarien durchspielen lassen. Dieser Zwilling soll dabei eine bisher unerreichte Genauigkeit aufweisen und alle grundlegenden Geo-Objekte enthalten, vom Hochhaus über die Verkehrsampel bis zum Baumbewuchs.“ (BKG o.J.). Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz sieht ebenfalls das Potenzial in Digitalen Zwillingen als fortschrittliche Industrie 4.0-Technologien einen Beitrag „zu einer klimafreundlichen und ressourcenschonenden Industrie in Deutschland und Europa“ zu leisten (BMUW o.J.). Auch für die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften gilt der Digitaler Zwilling als einer der zentralen digitalen Lösungsansätze für ökologische Nachhaltigkeit in der deutschen Wirtschaft und wesentlich für die bevorstehenden Veränderungen im Zuge der Umsetzung von Industrie 4.0 (Schmidt 2023). So betonen auch Institut für ökologische Wirtschaftsforschung und Technopolis Group, dass durch Simulationen mit digitalen Zwillingen in der industriellen Fertigung die Entwicklung von Produktdesigns ermöglichen, welche den Ressourcenaufwand in der Herstellung reduzieren, gleichzeitig die Lebensdauer verlängern und die Recyclingfähigkeit verbessern können (Stede et al. 2024). Besonders hilfreich ist Digitale Zwilling laut dem Fraunhofer-Institut im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung und in der Unterstützung bei der nachhaltigen Optimierung von

Produkten, indem es die Sammlung und Verknüpfung produktspezifischer Daten über den gesamten Lebenszyklus hinweg ermöglicht, was sowohl für Echtzeitauswertungen als auch für Rückschlüsse auf die Produktentwicklung genutzt werden kann (Fraunhofer IPK o.J.).

Mögliche Rebound-Effekte

Wirkmechanismen

Im Rahmen der Industrie 4.0, in der der Digitale Zwilling als einer der Schlüsseltechnologien gilt, führt die zunehmende Digitalisierung von Produktionsprozessen zu einem erhöhten Energiebedarf, was zu materiellen Rebound-Effekte führen kann. Dieser entsteht hauptsächlich durch die Erzeugung und Bereitstellung verschiedener Datenmengen – von Produktionsplanungs- und -steuerungsdaten, Umwelt- und Umgebungsdaten bis hin zu Personalisierungs- und Konfigurationsdaten, für die entsprechende Datenverarbeitungsgeräte benötigt werden, von einzelnen PCs bis hin zu komplexen Großrechenanlagen. Wenn diese Energie aus fossilen Quellen stammt, führt der erhöhte Verbrauch zu einer zusätzlichen Emission von Treibhausgasen. „Durch die verstärkte Digitalisierung von Produktionszweigen kommt es [...] eher zu einer Verschiebung der Umweltbelastung: Weg von übermäßiger Rohstoffverschwendung, aber unter Inkaufnahme von stark gesteigertem Energieverbrauch und Emissionsniveau“ (Schulze-Quester 2021, S. 12).

Zudem ergab eine Umfrage mit 170 Unternehmen aus zehn Branchen³², dass 75 % der Befragten die Chance im Digitalen Zwilling sehen, neue Produkte zu entwickeln und damit verbundene Marktchancen zu nutzen (Weber & Grosser 2019). In diesem Zusammenhang könnten auch wieder materielle Rebound-Effekte auftreten. Die Optimierung von Produktionsprozessen durch digitale Zwillinge könnte zu einer Steigerung der Produktion führen (Stede et al. 2024).

Digitale Zwillinge ermöglichen „die Nachbildung und Optimierung der Realität im digitalen Raum und entkoppeln dabei die digitale Welt oftmals von den realen Gegebenheiten. Auf diesem Weg bewirkt die Digitalisierung zudem konkrete ökologische Externalitäten, zum Beispiel in Form steigender Energiebedarfe für die Erstellung und Nutzung digitaler Anwendungen oder durch den Rohstoffbedarf sowie das steigende Abfallaufkommen aufgrund der notwendigen Hardware“ (Schmidt et al. 2023, S.5).

Ausmaß eines möglichen Rebound-Effektes: Wie groß ist der Rebound-Effekt

Die Höhe des Rebound-Effektes ist noch unbekannt und wurde bislang noch nicht quantitativ erforscht.

Einflussfaktoren: Faktoren, die mögliche Rebound-Effekte verstärken oder vermindern

Das Auftreten und Intensität von Rebound-Effekten variieren abhängig von einer Vielzahl von Einflussfaktoren, darunter die Größe des Modells und die dafür gebrauchten Datenmenge (Digitaler Zwilling von einem bestimmten Produkt oder von Deutschland bzw. der Planet Erde)

Datenlage

Eine Metastudie von Stede et al. 2024 zur Quantifizierung von Umweltwirkungen zeigt, dass die Anzahl der Studien begrenzt, insgesamt etwa gleich viele mit faktischen (empirische) und potenziellen Nachhaltigkeitseffekten. Die Mehrheit der Studien deutet auf positive Nachhaltigkeitseffekte. Simulationsergebnisse zeigen zwar Einsparpotenziale auf, aber oft bleibt unberücksichtigt, ob diese Potenziale auch in der Praxis zu realisieren sind (Stede et al. 2024). Bislang wurde keine ökologische Analyse des Zusammenhangs von Digitaler Zwilling und

32 u.a. Telekommunikation, Automobil, Reise/Transport/Logistik, Pharmazie/Gesundheitswesen und der öffentliche Sektor

Rebound-Effekten durchgeführt. Es werden eher Rebound-Effekte vermutet (Schulze-Quester 2021).

B Anhang zur Systemanalyse

Aus systemischer Sicht sind Rebound-Effekte wie auch schon in Kapitel 1 beschrieben vor allem dadurch gekennzeichnet, dass sie auf Rückkopplungen, zeitlichen Verzögerungen und nicht-linearen Beziehungen in komplexen Systemen beruhen (Guzzo et al. 2023). Die komplexen Systeme sind das Zusammenspiel von Technologie, Wirtschaft, Psychologie, Soziologie und auch Politik. Die Auswirkungen beziehen sich zudem auf die Umwelt, wobei die Effekte, wie in Kapitel 1.2 beschrieben, schon gar nicht mehr als Rebound-Effekt zu beschreiben sind, wenn sie einer allgemeineren wirtschaftlichen oder technologischen Weiterentwicklung zuzuschreiben sind.

Ein Beispiel für Rebound-Effekte bietet das Verkehrssektor-Modell von Achachlouei & Hilty (2016): Dort zeigt sich, dass effizientere Antriebe zwar kurzfristig den Energiebedarf pro Kilometer senken. Allerdings kann es aufgrund gesunkener Betriebskosten (direkter Preis-Rebound), verkürzter Fahrzeiten (Zeit-Rebound) oder zusätzlicher Konsumimpulse schnell zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen kommen, sodass der anfängliche Effizienzgewinn später teilweise oder gänzlich wieder aufgehoben wird. Ein ähnlicher Mechanismus lässt sich auch bei anderen Produkten erkennen: Steigt etwa durch technische Neuerungen die Attraktivität eines Geräts, kann eine größere Nachfrage entstehen, die den Energie- und Ressourcenverbrauch insgesamt erhöht (Achachlouei & Hilty 2016, S. 5–6; Guzzo et al. 2023, S. 3).

Zudem betonen Guzzo et al. (2023), dass sich Rebound-Effekte in „verschachtelten“ Systemebenen (in Mikro-, Meso- und Makroebene) äußern können. Beispiele auf Mikroebene sind energiesparende Haushaltsgeräte, die Verbraucher zu höheren Nutzungszeiten verleiten (z. B. Wäschetrockner). Auf Mesoebene kann etwa die Einführung von Carsharing zu zusätzlichen Fahrleistungen führen, da freigewordenes Geld für andere Mobilitätsformen oder Konsumzwecke eingesetzt wird. Auf Makroebene zeigen sich Rebound-Effekte in sektorübergreifenden oder volkswirtschaftlichen Zusammenhängen, etwa wenn Effizienzgewinne in einer Industrie preiswirksamer werden und zu grundlegend höheren Nachfrage- und Produktionsniveaus beitragen. Dabei gilt: „Systems leading to rebound-effect are nested and interrelated“ (Guzzo et al. 2023, S. 6), das heißt, Interaktionen zwischen unterschiedlichen Systemebenen und Akteuren (Politik, Wirtschaft, Nutzer*innen) verstärken oder dämpfen sich gegenseitig. Hier kann es sinnvoll sein, auch den Mehrebenenansatz aus der Transformationsforschung heranzuziehen.

Rebound-Effekte treten oft mit Verzögerung auf, sodass sie in klassischen, linearen Wirkungsanalysen unter Umständen gar nicht sichtbar werden (Achachlouei & Hilty 2016, S. 10; Guzzo et al. 2023, S. 10). Kurze Zeiträume lassen eventuell annehmen, dass Effizienzmaßnahmen „funktionieren“. Erst eine Langzeitanalyse deckt auf, dass sich Gewohnheiten, Märkte oder technologische Folgezwecke ändern, wodurch die zunächst erhofften Einsparungen im Laufe der Zeit zu einem Teil wieder verloren gehen. Hinzu kommen nicht-lineare Beziehungen: Ist beispielsweise ein Preis für bestimmte Güter nur gemäßigt gesunken, bleiben die Nachfrageeffekte verhalten, doch fällt der Preis – etwa dank starker Produktivitätszuwächse – sehr stark, so kann es zu sprunghaften Nachfragesprüngen kommen (Guzzo et al. 2023, S. 8). Dadurch zeigen sich unterschiedliche Rebound-Magnituden („Teil-Rebound“, „Voller Rebound“ oder gar „Backfire“). „Welche Stärke der Rebound schließlich annimmt, hängt von sozialen, ökonomischen und technologischen Faktoren ab“ (Achachlouei & Hilty 2016, S. 1–2).

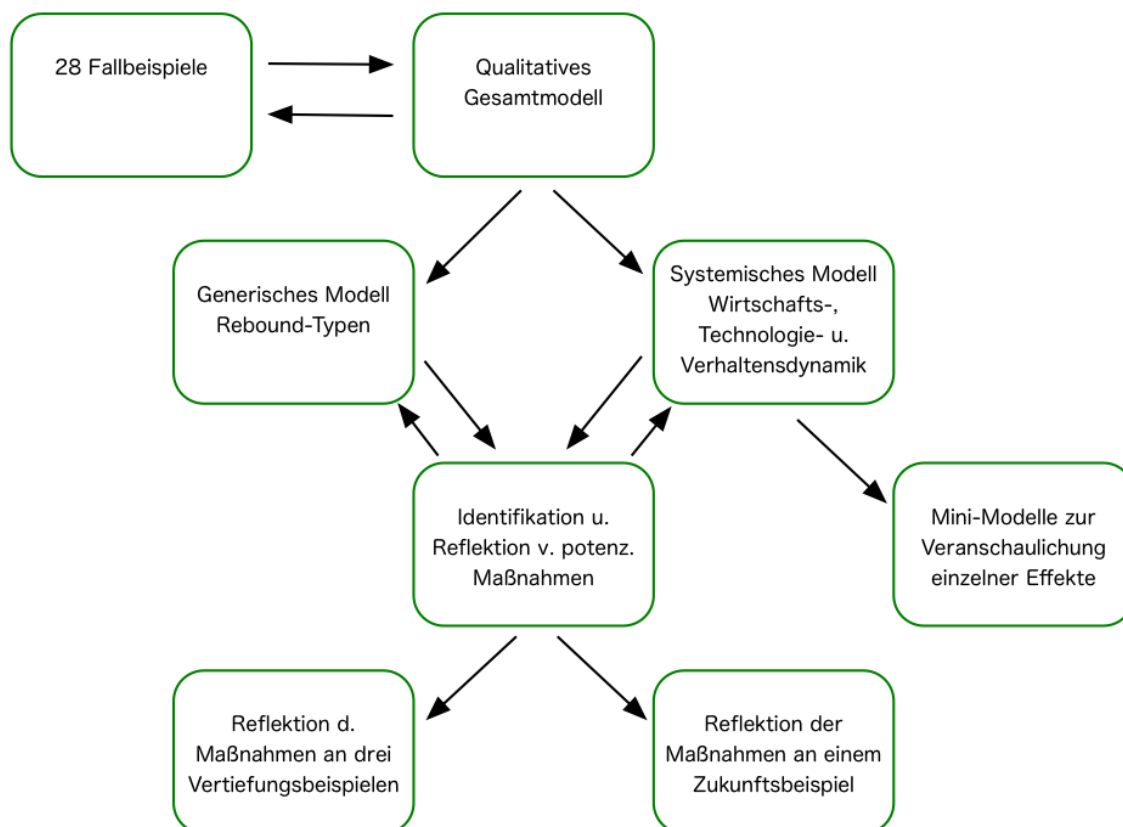
Wesentlich für das Verständnis aus systemischer Perspektive ist ferner, dass Entscheidungen von Individuen und Unternehmen nur begrenzt rational sind und stark durch soziale Normen, Informationsdefizite oder Gewohnheiten geprägt sein können (Guzzo et al. 2023, S. 11). System-Dynamics-Studien legen daher den Fokus auf Rückkopplungsschleifen zwischen Technik, Angebot, Nachfrage, Preisen und gesellschaftlichem Verhalten. Diese Rückkopplungsschleifen

machen Rebound-Effekte häufig „policy-resistant“ (Guzzo et al. 2023, S. 4), weil offensichtliche, technisch orientierte Gegenmaßnahmen ein Systemverhalten nur scheinbar stabilisieren, in Wirklichkeit aber anderweitige Kompensationsmechanismen anstoßen.

B.1 Vorgehensweise bei der systemischen Modellierung

Die Ergebnisse aus AP 1 (Erfassung von Fallbeispielen mittels Literaturanalyse) wurden in einem qualitativen Ursache-Wirkungsmodell (Neumann; Grimm 2022) direkt in Ursache-Wirkungsaussagen übersetzt. Zuerst wurden alle Fallbeispiele in dem gleichen Ursache-Wirkungsmodell (Abbildung 9) abgebildet. Von diesem umfangreichen Modell wurden zwei generalisierte Modelle (Abbildung 11 und Abbildung 12) abgeleitet, in denen die Wirkmechanismen aller Digitalisierungsbeispiele überschaubarer dargestellt sind, um daraufhin Wechselwirkungen und Gemeinsamkeiten zu identifizieren, die dann durch Maßnahmen und Instrumente im Kapitel 3 adressiert werden können. Zudem zeigen kleine Mini-Modelle ausgewählte Effekte. Abbildung 8 zeigt die Vorgehensweise.

Abbildung 8: Vorgehensweise bei der systemischen Modellierung



Quelle: Eigene Darstellung, Consideo

In Kapitel 3 wurden diese Maßnahmen und Instrumente dann in ihrer konkreten, potenziellen Wirkung auf drei Vertiefungsbeispiele reflektiert. Schließlich wird die Anwendung der Maßnahmen und Instrumente auch bezogen auf ein Zukunftsbeispiel der Digitalisierung exploriert.

Zum systemischen Verständnis wurden sowohl die Treiber von Wirtschaft als auch die von Technologie und von Konsum in ihren Wirkmechanismen abgebildet (Kapitel 2) und darin die Digitalisierungsbeispiele verortet. Diese Vorgehensweise erlaubt Rebound-Effekte zu erkennen oder zu relativieren und die Wirksamkeit oder auch Nicht-Wirksamkeit von Maßnahmen zu bewerten. Die Treiber wurden nicht deskriptiv vorweg angelegt, sondern durch exploratives Erfragen (KNOW-WHY-Methode (Neumann 2013)) von Einflussfaktoren auf die vorgegebenen Zielfaktoren bei entsprechend weit gezogenen Systemgrenzen aufgedeckt.

Methodisch basiert die Analyse von Ursache-Wirkungsmodellen auf der abduktiven Logik. Unter der Annahme, dass die einzelnen Wirkungsbeziehungen richtig und die entscheidenden Faktoren berücksichtigt sind, sind die Schlussfolgerungen logisch richtig. Damit sind die Schlussfolgerungen so lange richtig, wie keine Wirkungsbeziehung nachweislich falsch ist oder ein entscheidender Faktor fehlt. Ursache-Wirkungsmodelle, die in die Zukunft schauen, sind somit nicht zu verifizieren, sondern nur zu falsifizieren. Mit dem Blick in die Zukunft sind sie zugleich aber auch alternativlos.

Die Bandbreite der Digitalisierungsbeispiele bzw. der Anwendung von Digitalisierung macht eine systemische Betrachtung schwierig, da zumindest bei den aggregierten, kleineren Modellen, die Verbindungen sich jeweils auf Teile der Digitalisierung beziehen, für die eine solche Wirkungsbeziehung gilt, weshalb sie aber noch nicht für alle Bereiche der Digitalisierung gilt.

Die Erkenntnisse aus dem AP 2 und deren Anwendung in AP 3 wurden in einem Online-Experten-Workshop reflektiert. Die Expertenriege reichte vom Verband Bitkom über Wissenschaftler*innen zu bekannten Studien zum Thema Digitalisierung bis hin zu Prof. Lorenz Hilty, der in einer kritischen Reflexion des Themas die Vorgehensweise und ersten Ergebnisse unterstützt hat.

Hinweis: die größeren Modelle können im Rahmen dieses Projektes nicht vollständig dokumentiert werden. Sie sind das Ergebnis der Übertragung der Einzelbeispiele aus AP 1. Lediglich die Ableitungen aus diesen Modellen in das systemische Modell werden in diesem Bericht detailliert beschrieben. So zeigen die jeweils als Screenshot bezeichneten Abbildungen nur zur Veranschaulichung des Umfangs die jeweiligen Modelle, die über einen Link darunter direkt im Browser aufgerufen und genutzt werden können. Alle Modelle werden dem Umweltbundesamt parallel zu diesem Bericht übergeben.

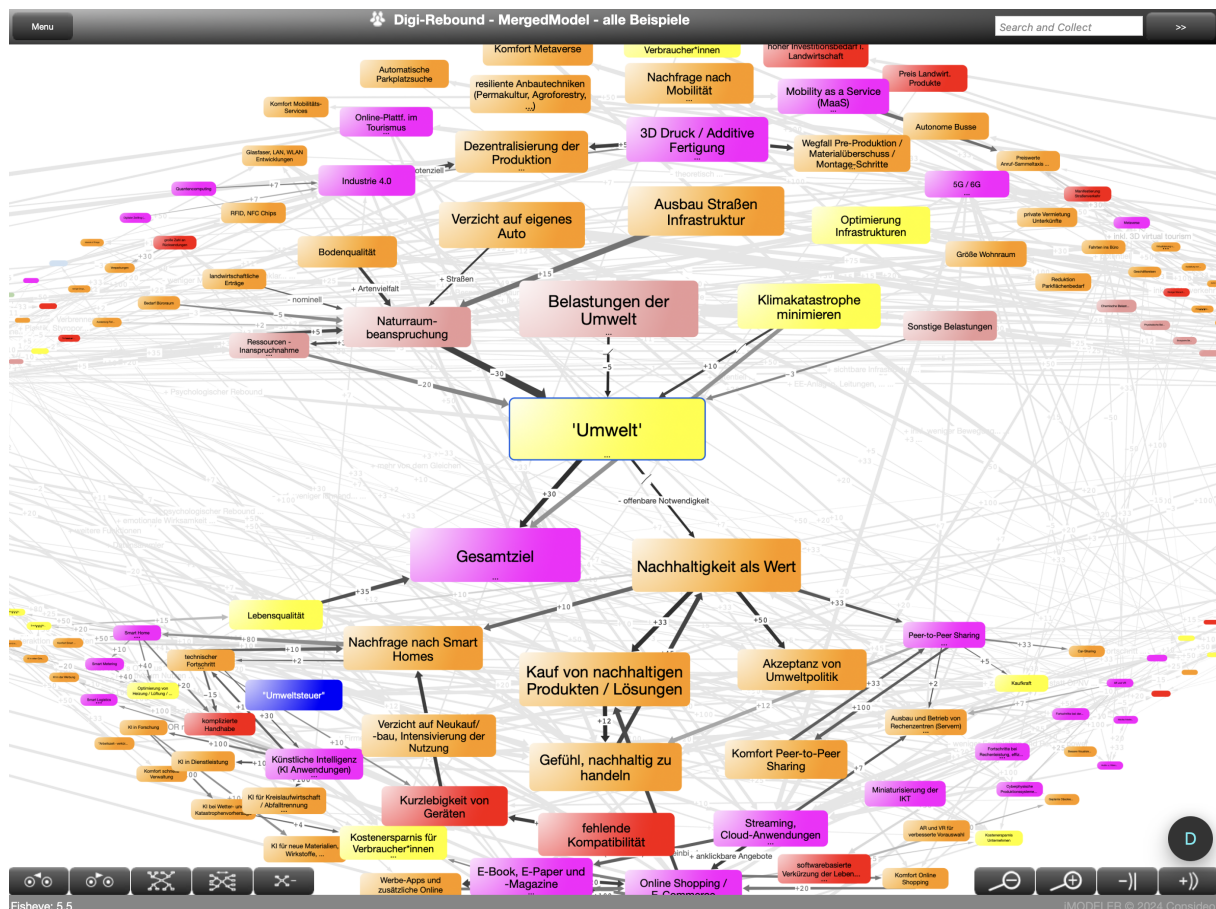
B.2 Qualitatives Gesamtmodell über alle Fallbeispiele

Rebound-Effekte beziehen sich zwar auf angenommene und dann zu relativierende positive Effekte auf die Umwelt, aber um etwaig auch weitere, die positiven Wirkungen von Digitalisierung einschränkende Wirkungen identifizieren zu können, wurden neben der Umwelt auch noch die Lebensqualität und die Minimierung der Klimakatastrophe als Zielfaktoren definiert. Die Umwelt wirkt sich dabei genauso wie die Klimakatastrophe auf die Gesundheit aus, aber die Klimakatastrophe hat neben diverser Einflüsse auf die Umwelt auch soziale Folgen. Auf die Lebensqualität kann sich Digitalisierung über Komfortgewinne positiv und über die Gesundheit auch wieder negativ auswirken. Aus dieser erweiterten Zielsetzung wurden im Weiteren aber noch keine Schlüsse gezogen, sondern die Auswirkungen auf die Umwelt fokussiert.

Auch die Auswirkungen auf den Faktor Umwelt wurden weiter differenziert, indem die VERUM Umweltwirkungskategorien (Berger et al. 2017), wie chemische Belastungen (THG, Luftschadstoffe, Stoffbelastungen, Abwasser, diffuse Stoffeinträge), physikalische Belastungen

(Lärm, Strahlung, Mechanisches), biologische Belastungen integriert wurden. Das Modell lässt zwar keine quantitativen Aussagen zu, aber es ermöglicht, die entsprechenden Verlagerungseffekte anzuschauen und aus den grundsätzlichen Verbindungen Interventionslogiken abzuleiten. Beispiel sind positive Wirkungen über eingesparte Energie gegenüber negativen Wirkungen über eingesetzte Rohstoffe, oder positive Wirkungen auf die Gewässer (im Falle von Precision Farming) mit negativen auf die Rohstoffe. Eine abschließende Bewertung ob der Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Umwelteinflüsse hat dieses Projekt nicht vorgenommen – das müsste auf Basis der Einzelbeispiele mit jeweiligen Lebenszyklus-Analysen erfolgen.

Abbildung 9: Screenshot der Software iMODELER mit Blick auf das detaillierte Gesamtmodell



Das Modell ist über einen Read-Only-Link hier zu sehen und zu nutzen:

<http://www.imodeler.info/ro?key=Ct2DnUGG6edNWnKzAbtBjUg>

Quelle: Eigene Darstellung, Consideo

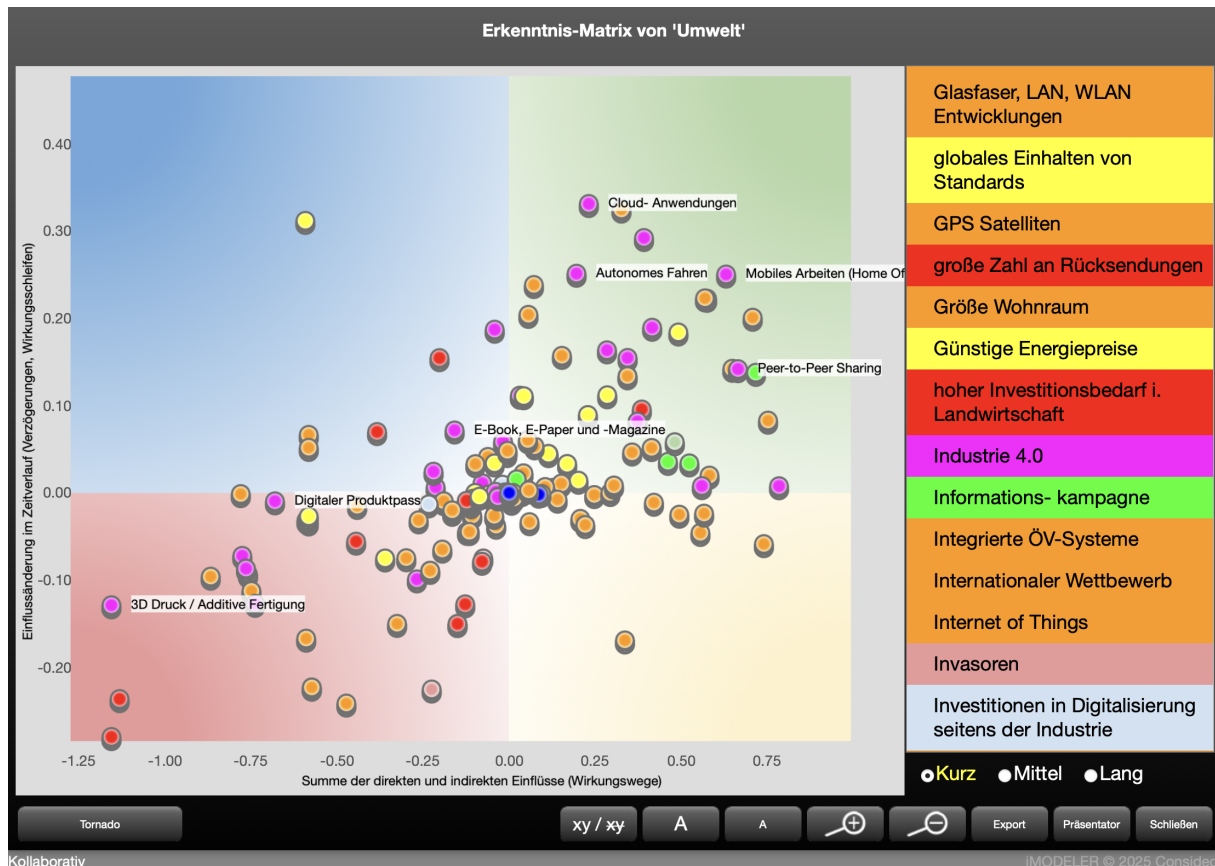
Faktoren wie „Kostensparnis für Unternehmen“, „Energiebedarf“, „Kaufkraft“ oder „Rucksack von Computern“ etc. hängen in dem Modell dann mit mehreren oder sogar allen Fallbeispielen zusammen. Auf diese Weise werden auch gegenseitige Abhängigkeiten zwischen den Beispielen deutlich.

Bei allen Faktoren wurde aber auch explorativ weitergefragt, was diese positiv oder negativ beeinflusst, weshalb der Wettbewerbsdruck für Unternehmen oder die Konsummotive oder die gegenseitige Befruchtung von technologischen Entwicklungen ebenfalls im Modell enthalten sind. Aus diesem Grund ist das Modell (Abbildung 9) sehr umfangreich geworden. In den Zusammenhängen lassen sich durch Analysen von Wirkungswegen und Wirkungsschleifen zahlreiche Effekte erkennen, die dann in den zwei kleineren Modellen in den nächsten

Unterkapiteln destilliert dargestellt sind. Das große Modell enthält mehr als 10 Mio. Wirkungsschleifen. Vom Faktor „5G/6G“ zum Faktor „Umwelt“ führen beispielsweise weit mehr als 1000 Wirkungspfade über viele andere Fallbeispiele aus dem Modell hinweg.

Um bezogen auf einzelne Fallbeispiele im großen Modell Wirkungsaussagen treffen zu können, müssten sämtliche 664 direkten Verbindungen zwischen den 238 Faktoren in dem Modell mindestens grob gewichtet werden, wobei die Gewichtung dann beispielsweise den anteiligen Energieverbrauch und die anteilige Zeitersparnis etc. beschreibt.

Abbildung 10: Screenshot einer Erkenntnis-Matrix aus dem detaillierten Gesamtmodell



Quelle: Eigene Darstellung, Consider

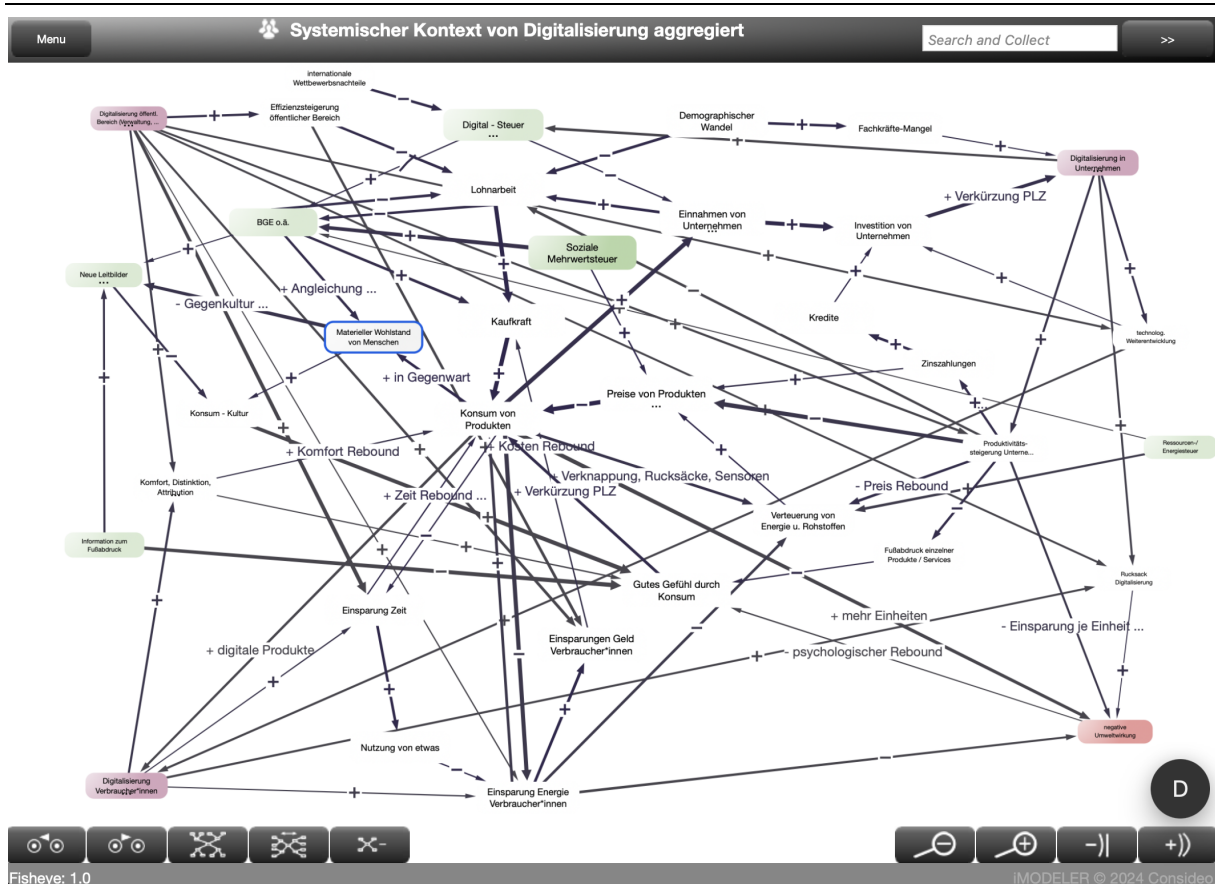
Mit diesem Projekt wurde eine solche Gewichtung nicht vorgenommen, aber dennoch die so genannten Erkenntnis-Matrizen (Neumann & Grimm 2022) aufgerufen und nach Auffälligkeiten geschaut, die dann durch eine nähere Betrachtung der Wirkungswege nachvollzogen werden konnten. Über diesen Weg konnten die wichtigsten Dynamiken des Modells identifiziert, und diese in die beiden kleineren Modelle übertragen werden.

In der Erkenntnis-Matrix in Abbildung 10 sind die Fallbeispiele auf der x-Achse in ihrer Wirkung auf den Faktor Umwelt verortet. Auf der y-Achse wird angezeigt, inwieweit die Wirkung im Zeitverlauf zu- oder abnimmt. In einem zweiten Schritt haben wir dann für die Faktoren jeweils geschaut, welche Wirkungsschleifen und -pfade diese Position maßgeblich begründen. Auch wenn die Aussagen der Erkenntnis-Matrix ohne eine vollständige Gewichtung der Wirkungsbeziehungen hinsichtlich einer kurz-, mittel- und langfristig letztlich positiven oder negativen Wirkung auf den Faktor Umwelt nicht trennscharf sind, können wir hierüber dennoch die Dynamiken, die Ambivalenzen und die selbstverstärkenden Wirkungsschleifen interpretieren.

B.3 Generisches Modell über die Rebound-Typen

In dem Versuch ein auf einer Seite darstellbares Modell zu erstellen, wurden die Digitalisierungsbeispiele in Digitalisierung in privaten Haushalten, in Unternehmen und im öffentlichen Bereich aggregiert. Zudem haben wir die bekannten Rebound-Effekte wie den materiellen Rebound, den Preis-Rebound, den Zeit-Rebound, den Komfort-Rebound oder den Psychologischen Rebound explizit in dem Modell hervorgehoben. Am Ende wurden wir aber unserem Anspruch, das Thema auf einer Seite oder Folie darstellbar zu machen, nicht gerecht. Das Modell (Abbildung 11) zeigt aber dennoch die Dynamiken, die wir schlussendlich in dem Systemischen Modell im nächsten Kapitel beschreiben.

Abbildung 11: Screenshot der Software iMODELER mit Blick auf das generische Modell



Das Modell ist über einen Read-Only-Link hier zu sehen und zu nutzen:

<http://www.imodeler.info/ro?key=Cf1M3z4PzKVIrT6yu9wnhZw>

Quelle: Eigene Darstellung, Consideo

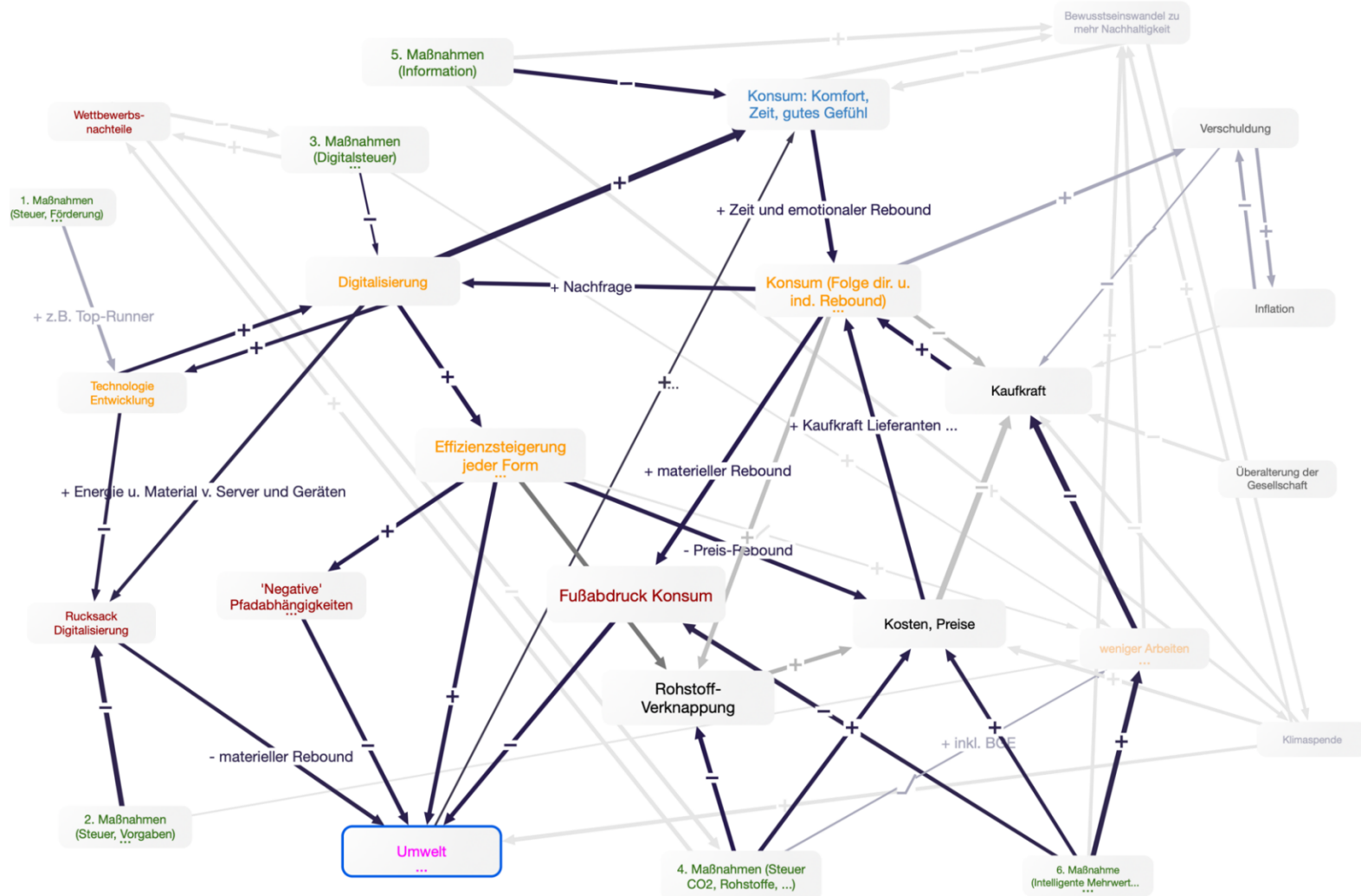
B.4 Systemisches Modell über die zentralen Dynamiken

Um die zentralen Dynamiken rund um die Digitalisierung besser darstellen zu können, wurde der Zusammenhang noch weiter abstrahiert und ein Modell (Abbildung 12) erstellt, in dem es nur noch um die „Digitalisierung“ und eine „Effizienzsteigerung jeder Form“ geht. Die unmittelbaren Auswirkungen sind sinkende Kosten, gesparte Zeit und gute Gefühle, welches alles letztlich selbstverstärkend zu mehr Konsum führt.

In dem Modell ist zentral der Faktor „Umwelt“. Auf diesen wirkt die erst einmal neutrale (orange) Digitalisierung mit ihrer Technologieentwicklung, Effizienzsteigerung und dem

Konsum teilweise über die negativ konnotierten (rot) Faktoren wie den Rucksack der Digitalisierung, etwaige Pfadabhängigkeiten und dem Fußabdruck von Konsum, sowie über die Rebound-Effekte auch Komfort, Zeitgewinn und gute Gefühle (blau). Kosten, Kaufkraft und Rohstoffverknappung sind marktbeschreibende Faktoren inklusive der ebenfalls negativen (rot) Wettbewerbsnachteile. Grau sind Faktoren, die eine Erweiterung der Systemgrenzen um Faktoren rund um Inflation, demographischen Wandel oder gesellschaftliche Transformation beschreiben. Die gewählten Farben haben keine analytische Bedeutung und sollen nur die Lesbarkeit des Modells erhöhen.

Abbildung 12: Systemisches Ursache-Wirkungsmodell über die zentralen Dynamiken



Das Modell ist über einen Read-Only-Link hier zu sehen und zu nutzen: <http://www.imodeler.info/ro?key=CRv4tGiW1Hnkr9mYvETH8dw>

Quelle: Eigene Darstellung, Consideo

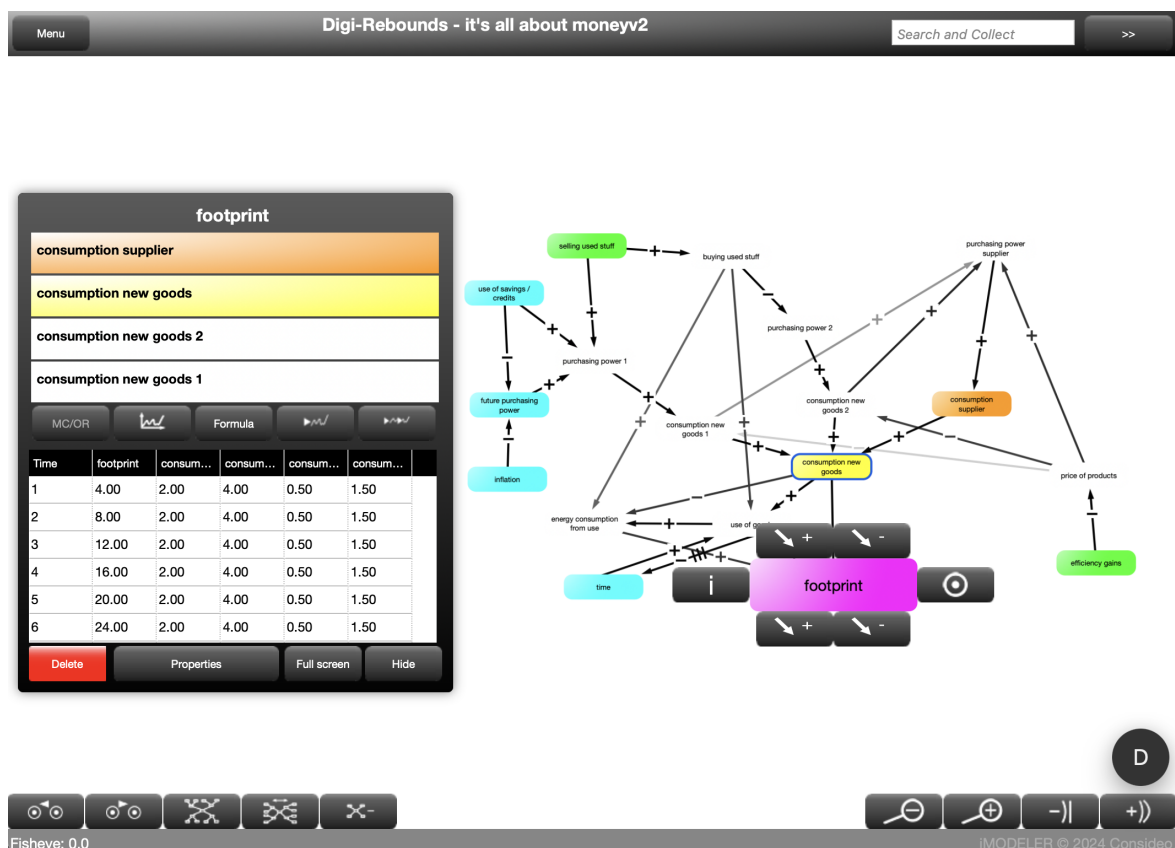
Gebremst wird der Mehrkonsum nur durch die limitierende Kaufkraft, geschürt selbstverstärkend durch die Technologieentwicklung. Die direkten Auswirkungen sind positiv weniger Rohstoffverknappung, weniger Energiebedarf und weniger negativer Einfluss auf die Umwelt. Die negativen, direkten Auswirkungen sind der Rucksack der Digitalisierung, der Mehrkonsum mit seinem Fußabdruck und negative Pfadabhängigkeiten.

Im Kapitel 2 werden die Dynamiken noch weiter beschrieben, etwa die Treiber hinter unserem Konsum, die Wettbewerbssituation von Unternehmen, die Entwicklung von Technologien oder auch die externen Entwicklungen bezogen auf die Kaufkraft. In Kapitel 3 werden die möglichen politischen Maßnahmen und Instrumente, die im Modell bereits eingefügt sind, aufgegriffen.

B.5 Mini-Modelle zur Veranschaulichung von Plattform-Logiken

Alle drei bisher vorgestellten Modelle zeigen als ausgleichende Wirkungsschleifen eine limitierende Wirkung durch den Faktor Kaufkraft. Die These daraus ist, dass der Mehrkonsum durch Digitalisierung, etwa durch digitale Medien oder Online-Käufe, letztlich bedeutet, dass für anderen Konsum weniger Geld zur Verfügung steht. Insbesondere zu den Plattform-Dynamiken wurde diskutiert, inwieweit diese zu mehr Konsum führen oder der Mehrkonsum an einer Stelle weniger Konsum bedeutet und vielleicht Teil eines größeren Wandels ist, bei dem anderer Konsum mit anderem Umwelteinfluss reduziert wird.

Abbildung 13: Screenshot der Software iMODELER mit Blick auf das quantitative Mini-Modell



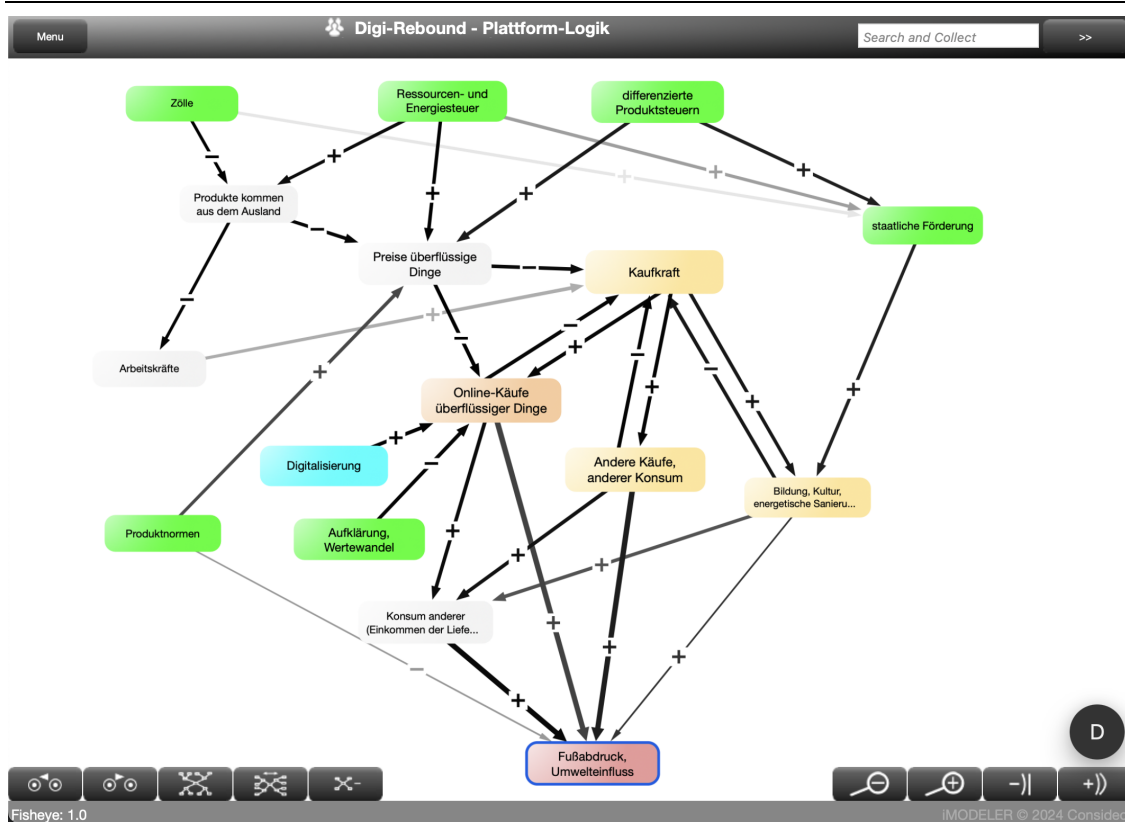
Das Modell ist über einen Read-Only-Link hier zu sehen und zu nutzen:

<http://www.imodeler.info/ro?key=CHJat2tulo1HPyaD3eVr1Sg>

Quelle: Eigene Darstellung, Considero

Um die potenzielle Logik dahinter zu explorieren, wurde zuerst ein kleines, quantitatives Modell (Abbildung 14) erstellt. Es beschreibt zwei Konsument*innen und einen konsumierenden Produzenten. Es schaut auf eine konstante Geldmenge. Im ersten Szenario kaufen alle mit ihrer Kaufkraft etwas Neues. Im zweiten Szenario verkauft eine Person etwas Gebrauchtes an eine andere. In dem Maße, wie sich die erste Person daraufhin mehr Neues kaufen kann, kann sich die zweite Person weniger kaufen. Der Produzent verkauft die gleiche Menge an Neuem. Auch der Fußabdruck des Gesamtkonsums bleibt gleich, wenn die potenziell vermehrte Nutzung durch möglicherweise mehr Produkte im Umlauf vernachlässigt wird. In einem dritten Szenario wurden Effizienzsteigerungen bei der Produktion angenommen. Interessanterweise verdient der Produzent nicht mehr, aber die Konsument*innen erhalten für ihr Geld mehr und der Fußabdruck erhöht sich. Hier schält sich die These heraus, dass Effizienzsteigerungen über das mehr zur Verfügung stehende Geld immer auch zu mehr Konsum führen.

Abbildung 14: Screenshot der Software iMODELER mit Blick auf das qualitative Mini-Modell



Das Modell ist über einen Read-Only-Link hier zu sehen und zu nutzen:

<http://www.imodeler.info/ro?key=CDgrEq1rg3G51qhVI6KyCww>

Quelle: Eigene Darstellung, Consideo

Naheliegenderes Gegenargument gegen die Thesen ist, dass es auf die Qualität des Konsums ankommt. Hierfür wurde ebenfalls ein kleines, in diesem Fall rein qualitatives Modell (Abbildung 7) erstellt. Darin wird unterschieden, ob wir dank Digitalisierung (Online-Shops, personalisierte Werbung, preiswerte Transporte, usw.) einfach nur mehr konsumieren zu Lasten von anderem Konsum mit ähnlichem ökologischen Fußabdruck, oder ob der Mehrkonsum zu Lasten von Bildung, Kultur, energetischer Sanierung, teureren Bioprodukten und ähnlichem geht. Das systemische Modell, Abbildung 5, berücksichtigt auch eine geringere Sparquote zu Lasten der Kaufkraft im Alter. Eine interessante These ist zudem, dass selbst der Konsum von Kultur, Dienstleistung oder Bioprodukten zu Geldflüssen führt, über die deren Anbieter möglicherweise doch wieder anderen Konsum mit hohem Fußabdruck tätigen. Dann

wäre letztlich der Warenkorb der Gesellschaft in seinem Umwelteinfluss entscheidend – mehr dazu in Kapitel 3.3.

Ebenfalls in dem Modell bereits aufgenommen wurden denkbare Maßnahmen wie die Formen der Besteuerung, Förderung, Normierung oder Information, die in AP 3 weiter ausgeführt werden.

Literaturverzeichnis

- Abdullah, Md., Adhikary, S., Bhattacharya, S., Hazra, S., Ganguly, A., Nanda, S. & Rajak, P. (2024). E-Waste in the Environment: Unveiling the Sources, Carcinogenic Links, and Sustainable Management Strategies. *Toxicology*, 509. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2024.153981>
- Achachlouei, M., & Hilty, L. M. (2016). Using Systems Thinking and System Dynamics Modeling to Understand Rebound Effects. In J. M. Gomez, M. Sonnenschein, U. Vogel, A. Winter, B. Rapp & N. Giesen (Hrsg.), *Advances and New Trends in Environmental and Energy Informatics* (S. 237–55). Springer.
- Achachlouei, M., & Moberg, Å. (2015b). Life Cycle Assessment of a Magazine, Part II: A Comparison of Print and Tablet Editions. *Journal of Industrial Ecology*, 19(4), 590–606. <https://doi.org/10.1111/jiec.12229>
- Achachlouei, M., Moberg, Å., & Hochschorner, E. (2015a). Life Cycle Assessment of a Magazine, Part I: Tablet Edition in Emerging and Mature States. *Journal of Industrial Ecology*, 19(4), 575–589. <https://doi.org/10.1111/jiec.12227>
- ADAC. (2019). *Pilotprojekt Platooning: Lkw fahren in Kolonne*. Abgerufen am 2. Mai 2024 von <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/autonomes-fahren/technik-vernetzung/platooning-lkw-automatisiert/>
- Adelmeyer, M., Walterbusch, M., Biermanski, P., Seifert, K., & Teuteberg, F. (2017). Rebound-Effekte im Cloud Computing. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, 54, 389–402. <https://doi.org/10.1365/s40702-017-0317-2>
- Airbnb. (2017). *Airbnb: Helping travel grow greener*. <https://www.airbnbcitizen.com/wp-content/uploads/2017/03/AirbnbSustainableTravel2017.pdf>
- Albrecht, T., Kühne, B., & Verse, B. (2023). *Digitalisierung und Automatisierung im Verkehr. Ein regulativer Rahmen für eine nachhaltige Entwicklung*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/digitalisierung-automatisierung-im-verkehr>
- Alipour, J.-V., Falck, O., & Schüller, S. (2020). Home-Office während der Pandemie und die Implikationen für eine Zeit nach der Krise. *Coronakrise: Analyse und ifo-Vorschläge zur Überwindung der Krise*. ifo-Schnelldienst, 73, 30–36. <https://www.ifo.de/DocDL/sd-2020-07-alipour-falck-schueller-homeoffice.pdf>
- Al-kfairy, M., & Alfandi, O. (2024). The Ethical Dilemma of Educational Metaverse. *Recent Advances in Evolution of Education and Outreach*, 1(1), 6–16. <https://doi.org/10.17352/raeeo.000002>
- Alt, S., Schorr, V., Kamanev, N., & Werth, D. (2023). Digitaler Prozesspass - Auftragsneue Ermittlung des Ressourcenverbrauchs. *Informatik Spektrum*, 46(3), 155–162. <https://doi.org/10.1007/s00287-023-01540-0>
- Ammicht Quinn, R., Apachlte, C., Boll, S., Decker, M., Deml, B., Dowling, M., Felix, R., Heesen, J., Heine, K., Kara, G., Loh, W., Mordvinova, O., Morik, K., Müller, N., Sauer, M., Schlunder, P., Schnell, M., Stich, A., Terzidis, O., & Velth, E. (2022). *Mit KI den nachhaltigen Wandel gestalten. Zur strategischen Verknüpfung von Künstlicher Intelligenz und Nachhaltigkeitszielen*. Lernende Systeme - Die Plattform für Künstliche Intelligenz. https://www.plattform-lernende-systeme.de/files/Downloads/Publikationen/PLS_Booklet_Mit_KI_den_nachhaltigen_Wandel_gestalten.pdf
- Aretz, A., Lenk, C., Ouanes, N., Grothmann, T., Mohaupt, F., Brischke, L.-A., & Stange, H. (2023). *Erfassung und Bewertung des Energiesparpotenzials von digitalen Anwendungen im Strom- und Wärmebereich. Abschlussbericht zum Projekt DETECTIVE – Energieeinsparung durch Digitalisierung*. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung. <https://www.ifeu.de/publikation/erfassung-und-bewertung-des-energiesparpotenzials-von-digitalen-anwendungen-im-strom-und-waermebereich>
- Arushanyan, Y., Moberg, Å., Nors, M., Hohenthal, C., & Pihkola, H. (2014). Environmental Assessment of E-media Solutions Challenges Experienced in Case Studies of Alma Media Newspapers. *Advances in Computer Science Research*. <https://doi.org/10.2991/ict4s-14.2014.2>
- Asdecker, B., & Sucky, E. (2019). Der Weg aus der Retourenfalle. *BIP Best in Procurement*, 10(6), 46–48.
- Asgari, H., Jin, X., & Rojas, M. B. (2019). Time geography of daily activities: A closer look into telecommute impacts. *Travel Behaviour and Society*, 16(1), 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2019.04.009>
- Axenbeck, J., Bähne, R., Hendzlik, M., Köhn, M., & Schicketanz, J. (2024). *Stellungnahme zur Bitkom-Studie „Klimaeffekte der Digitalisierung 2.0“*. Wissenschaftliche Einordnung. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/stellungnahme-zur-bitkom-studie-klimaeffekte-der>

- Azarova, V., Cohen, J., Kollmann, A., & Reichl, J. (2020). Reducing household electricity consumption during evening peak demand times: Evidence from a field experiment. *Energy Policy*, 144(9). <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111657>
- Baltic, T., Cappy, A., Hensley, R., & Pfaff, N. (2019). *How sharing the road is likely to transform American mobility*. McKinsey. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/how-sharing-the-road-is-likely-to-transform-american-mobility>
- BDZV – Bundesverband Digitalpublisher und Zeitungsverleger. (2024). *Reichweiten der Zeitungen*. Bundesverband Digitalpublisher und Zeitungsverleger. Abgerufen am 27. Februar 2027 von <https://www.bdzv.de/alle-themen/marktdaten/zeitungszahlen-reichweite-und-auflagengroessen>
- Becher, G., Gerres, S., Altenburg, S., Gründel, T., Nagel, I., Grawenhoff, S., Vierkötter, M., & Ensthaler J. (2017). *Automatisiert. Vernetzt. Elektrisch. Potenziale innovativer Mobilitätslösungen für Baden-Württemberg*. Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie, Prognos, Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme, TÜV Rheinland Consulting, Technische Universität Berlin. https://www.prognos.com/sites/default/files/2021-01/151030_prognos_studie-fahrzeugvernetzung_rz_webpdf.pdf
- Bechtold, U., Berger, M., Frey, H., Groschopf, W., Kallsperger, T., Kohla, B., Kulmer, V., Pfaffenbichler, P., Schmied, R., Seebauer, S., Soteropoulos, A., & Wilfing, H. (2018). *Rebound- und Seiten-Effekte im Verkehrssystem*. VCO - Mobilität mit Zukunft. <https://vcoe.at/files/vcoe/uploads/Archiv%20Downloadbereich/2018-02%20VCO%CC%88-Publikation%20Rebound-%20und%20Seiten-Effekte%20im%20Verkehrssystem.pdf>
- Behrendt, S. & Gegner, K. (2022a). *Beschleunigte Digitalisierung der Landwirtschaft: Wozu und welche politischen Rahmenbedingungen sind wirksam bzw. erforderlich? Innovationsreport 8, Experimentierfeld Agro-Nordwest*. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. <https://www.izt.de/media/2022/05/innovationsreport-politische-rahmenbedingungen.pdf>
- Behrendt, S. (2010). *Elektronische Medien sind nur manchmal ökologisch vorteilhaft. Vergleich Druckmedien und elektronische Medien unter ökologischen Aspekten. Studien im Auftrag des Fachverbandes Druck- und Papiertechnik*. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. https://www.researchgate.net/publication/277180940_Elektronische_Medien_sind_nur_manchmal_ökologisch_vorteilhaft_-_Vergleich_Druckmedien_und_elektronische_Medien_unter_ökologischen_Aspunkten
- Behrendt, S., & Henseling, C. (2019). Digitale Kultur des Teilens – Sozial-ökologische Transformationspotenziale? In J. Sommer, A. Brunnengraber, M. Göpel, P. Ibsich, H. Leitschuh, R. Loske, M. Müller & E. U. von Weizsäcker (Hrsg.), *Jahrbuch Ökologie 2019/2020 – Die Ökologie der digitalen Gesellschaft* (S. 149-160). Hirzel-Verlag.
- Behrendt, S., Blättel-Mink, B., & Clausen, J. (2011a). *Wiederverkaufskultur im Internet. Chancen für nachhaltigen Konsum am Beispiel von Ebay*. Springer.
- Behrendt, S., Erdmann, L., Scheumann, R., Stobbe, L., & Proske, M. (2011b). *Ressourcenschonung im Aktionsfeld Informations- und Kommunikationstechnik (unveröffentlicher Abschlussbericht)*. Umweltbundesamt.
- Behrendt, S., Henseling, C., & Scholl, G. (2019). Mit Sharing nachhaltiger Wirtschaften?! In S. Behrendt, C. Henseling & G. Scholl (Hrsg.), *Digitale Kultur des Teilens. Mit Sharing nachhaltiger Wirtschaften* (S.213–217) Springer Gabler.
- Behrendt, S., Zwiers, J., Henseling, C., & Hirschnitz-Garbers, M. (2021). *Circular City Berlin – Kreislaufwirtschaft der zweiten Generation. Konzeptionelle Übersicht eines neuen Innovationsökosystems*. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. https://www.ecornet.eu/fileadmin/ecornet/user_upload/Ecornet_Berlin/EcornetBerlin_Report2_CiBER_Innovationsoekosystem.pdf
- Beier, G., Kiefer, J., & Knopf, J. (2020). Potentials of big data for corporate environmental management: A case study from the German automotive industry. *Journal of Industrial Ecology*, 26(1), 336–349. <https://doi.org/10.1111/jiec.13062>
- Beitz, B. (2023). *Mit dem digitalen Produktpass die Welt retten? Nutzen und Akzeptanz aus der Perspektive von Verbrauchern. Impulse zur zirkulären Wertschöpfung*. Prosperkolleg e.V. https://prosperkolleg.ruhr/wp-content/uploads/2023/12/rethink_23-01_produktpass.pdf
- Bendel, O. (2024). Definition: Was ist "E-Book"? In *Gabler Wirtschaftslexikon*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/e-book-53607>

- Bengel, P. (2023). Augmented Reality in der Naturschutzbildung am Beispiel von ARAction. In M. Davis & L.-K. Peter (Hrsg.), *NaturschutzDigital 2023 – Innovative Digitalformate in der Naturschutzbildung. Tagungsdokumentation*. <https://doi.org/10.19217/skr677>
- Berg, H., & Ramesohl, S. (2019). *Nachhaltigkeit und digitale Transformation. Bericht zum Forschungsmodul B1 im Forschungsprojekt „Umsetzungserfahrungen mit Landesnachhaltigkeitsstrategien – Fallstudie Nachhaltigkeitsstrategie NRW“*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. https://wupperinst.org/fileadmin/redaktion/downloads/projects/FS_NHS_NRW_FM_B1_Digitale_Transformation.pdf
- Berg, J., & Henriksson, M. (2020). In search of the ‘good life’: Understanding online grocery shopping and everyday mobility as social practices. *Journal of Transport Geography*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102633>
- Berger, M., Finkbeiner, M., Markard, C., Kirschbaum, B., Angrick, M., Busse, L., Langner, M., Müschen, K., Baumgarten, C., Fabris, C., Fendler, R., Gromke, U., Heidemeier, J., Jering, A., Kosmol, J., Lüdecke, A., Mohaupt, V., Moriske, H.-J., Müller, F., Myck, T., Penn-Bressel, G., Reichart, A., Schütze, G., Strogies, M., Szewzyk, R., Utermann, J., & Jung, T. (2017). *Vereinfachte Umweltbewertung des Umweltbundesamtes (VERUM 2.0)*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/vereinfachte-umweltbewertungen-des>
- Bernard, S. (2020, Juli 5). *CO₂-Fussabdruck im Internet. Surfe ich das Klima kaputt?*. Schweizer Radio und Fernsehen. <https://www.srf.ch/kultur/gesellschaft-religion/co2-fussabdruck-im-internet-surfe-ich-das-klima-kaputt>
- Berner, A., Lange, S., & Silbersdorff, A. (2022). Firm-level energy rebound effects and relative efficiency in the German manufacturing sector. *Energy Economics*, 109. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105903>
- Biedermann, H., & Topic, M. (2020). Digitalisierung im Kontext von Nachhaltigkeit und Klimawandel – Chancen und Herausforderungen für produzierende Unternehmen. In A. Sihn-Weber & F. Fischler (Hrsg.), *CSR und Klimawandel. Unternehmenspotenziale und Chancen einer nachhaltigen und klimaschonenden Wirtschaftstransformation*. Springer Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59748-4_4
- Bienge, K., Kiefer, S., & Pott, M. (2017): *Wohnen und Reisen. Ressourceneffizienzpotenzialanalyse von Nutzen statt Besitzen Angeboten*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. https://wupperinst.org/fileadmin/redaktion/downloads/projects/NsBRess_Wohnen_Reisen.pdf
- Bierdel, M., Pfaff, A., Kilchert, S., Köhler, A. R., Baron, Y., & Bulach, W. (2019). *Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands - Additive Fertigungsverfahren in der industriellen Produktion*. VDI Zentrum Ressourceneffizienz. <https://www.ressource-deutschland.de/service/publikationen/detailseite/studie-additive-fertigungsverfahren/>
- Bieser, J., & Hilty, L. M. (2018). Indirect Effects of the Digital Transformation on Environmental Sustainability: Methodological Challenges in Assessing the Greenhouse Gas Abatement Potential of ICT. *ICT for Sustainability*, 52, 68–81. <https://doi.org/10.29007/lx7q>
- Bieser, J., Kalte, D., & Hilty, L. M. (2022). *Auswirkungen digitaler Produkte auf den Klimaschutz*. Universität Zürich. https://www.swico.ch/media/filer_public/73/61/736186ee-a384-4c31-978e-572bb7d09aff/auswirkungen_digitaler_produkte_auf_den_klimaschutz_082022.pdf
- Bieser, J., Saliari, B., Hirschier, R., & Hilty, L. M. (2020). *Next generation mobile networks: Problem or opportunity for climate protection?*. University of Zurich. https://www.researchgate.net/publication/344948545_Next_generation_mobile_networks_Problem_or_opportunity_for_climate_protection
- Binswanger, M. (2001). Technological Progress and Sustainable Development: What about the Rebound Effect?. *Ecological Economics*, 36(1), 119–132. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(00\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00214-7)
- Bitkom. (2021). *Klimaeffekte der Digitalisierung. Studie zur Abschätzung des Beitrags digitaler Technologien zum Klimaschutz*. https://www.bitkom.org/sites/main/files/2021-10/20211010_bitkom_studie_klimaeffekte_der_digitalisierung.pdf
- Bitkom. (2022). *37 % der Deutschen lesen E-Books*. Abgerufen am 27. Februar 2025 von <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/37-Prozent-lesen-E-Books>
- Bitkom. (2023). *Cloud-Nutzung wird rasant zunehmen*. Abgerufen am 27. Februar 2025 von www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Cloud-Report-2023-Nutzung-rasant-zunehmen

- Bitkom. (2024). *Klimaeffekte der Digitalisierung 2.0. Studie zur Abschätzung des Beitrags digitaler Technologien zum Klimaschutz in Deutschland*. <https://www.bitkom.org/sites/main/files/2024-02/bitkom-studie-klimaeffekte-der-digitalisierung-2.pdf>
- BKG – Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. (o.J.). *Digitaler Zwilling Deutschland*. Abgerufen am 27. Februar 2025 von https://www.bkg.bund.de/DE/Forschung/Projekte/Digitaler-Zwilling/Digitaler-Zwilling_cont.html
- Bledow, N. (2023). *Nachhaltigkeit im Gigabit-Mobilfunk: Infrastruktur und Anwendungen zusammen gedacht. CO:DINA-Forschungslinie Transformative Resilienz*. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. https://codina-transformation.de/wp-content/uploads/5G6G_Impulspapier.pdf
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung. (2022). *Quantencomputing am Zentrum Jülich. Ein neues Computer-Zeitalter*. Abgerufen am 27. Februar 2025 von <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/forschung/quantencomputer-juelich-1998514>
- BMDV – Bundesministerium für Digitales und Verkehr. (2023a). *Verkehr in Zahlen 2023/2024*. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/verkehr-in-zahlen23-24-pdf.pdf?__blob=publicationFile
- BMDV – Bundesministerium für Digitales und Verkehr. (2023b). *Digitalstrategie Gemeinsam digitale Werte schöpfen*. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/presse/063-digitalstrategie.pdf?__blob=publicationFile
- BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2020). *Umweltpolitische Digitalagenda*. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Digitalisierung/digitalagenda_bf.pdf
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. (2016). *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen*. https://www.ressourcenwende.net/wp-content/uploads/2019/09/progress_ii_broschuere_bf.pdf
- BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2019). *Energiesparen mit Einsparzählern. Förderung von Innovationen und digitalen Dienstleistungen 2019-2022*. Abgerufen am 27. Februar 2025 von https://www.atum-e.de/fremde.html?file=files/atum/pdf/Fremde%20Materialien/deutschland%20machts%20effizient/energiesparen-mit-einsparzaehlern_2020.pdf&cid=299
- BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klima. (2023). *Intelligente Strommessgeräte. Neustart für die digitale Energiewende*. Abgerufen am 27. Februar 2025 von <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/digitale-energiewende-2157184>
- Borkmann, V., Dienes, K., Gaulinger, R., Eberhardt, A. K., & Ruess, P. (2024). *Tourismus und Stadtentwicklung. Auswirkungen von Airbnb auf deutsche Wohnungsmärkte*. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation. https://news.airbnb.com/wp-content/uploads/sites/4/2024/10/1357-Tourismus-und-Stadtentwicklung_st-final-2.pdf
- Breithut, J. (2022, 17 Juli). *Wann ein Smarthome wirklich beim Energiesparen hilft*. Spiegel. <https://www.spiegel.de/netzwelt/gadgets/strom-und-heizung-wann-ein-smart-home-wirklich-beim-energiesparen-hilft-a-ffb4b710-0cec-40e4-a2c4-6c5d4a3feb92>
- Brollo F., Dabla-Norris, E., de Mooij, R., Garcia-Macia, D., Hanappi, T., Liu, L., & Nguyen, A. D. M. (2024). Broadening the Gains from Generative AI: The Role of Fiscal Policies. Staff Discussion, (2). <https://doi.org/10.5089/9798400277177.006>
- Brookes, L. (1990). The greenhouse effect: the fallacies in the energy efficient solution. *Energy Policy*, 18(1), 199–201. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(90\)90145-T](https://doi.org/10.1016/0301-4215(90)90145-T)
- BSI – Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2024a): *Definition eines Rechenzentrums*. Abgerufen am 27. Februar 2025 von https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Informationen-und-Empfehlungen/Empfehlungen-nach-Angriffszielen/Hochverfuegbarkeit/Rechenzentren/Rechenzentren_node.html
- BSI - Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2024b). *Grundlegende Informationen zu Cloud Computing. Was ist Cloud Computing?*. Abgerufen am 27. Februar 2025 von https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Informationen-und-Empfehlungen/Empfehlungen-nach-Angriffszielen/Cloud-Computing/Grundlagen/grundlagen_node.html
- Büchel, J., & Klös, H.-P. (2022). *Metaverse: Hype oder “next big thing”? Potenziale und Erfolgsbedingungen*. Institut der Deutschen Wirtschaft. <https://www.iwkoeln.de/studien/jan-buechel-hans-peter-kloes-hype-oder-next-big-thing.html>

- Buchholz, W., & Rübhelke D. (2019). A Comparison of Environmental Policy Instruments. *Foundations of Environmental Economics*, 67–132. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16268-9_4
- Buhl, J., Erdmann, L., Gerold, S., Geiger, S., von Jorck, G., & Schrader, U. (2021). Time use rebound effects from adopting time efficient practices in Germany: a zero-inflated negative binomial approach. TU Berlin, Fachgebiet Arbeitslehre/Ökonomie und Nachhaltiger Konsum. <https://doi.org/10.24406/publica-fhg-416770>
- Bundesverband Musikindustrie. (2024). *Absatz von physischen Tonträgern und digitalen Musikprodukten*. Abgerufen am 15 Dezember 2024 von <https://miz.org/de/statistiken/absatz-von-physischen-tontraegern-und-digitalen-musikprodukten>
- Burkard, S., Fuchs-Kittowski, F., Deharde, M., Poppel, M., & Schreiber, S. (2022b). Eine mobile Augmented Reality Anwendung für die Darstellung von geplanten Windenergieanlagen. Realitätsnahe Visualisierungen für Planungsprozesse und die öffentliche Akzeptanz. In F. Fuchs-Kittowski, A. Abecker & F. Hosenfeld (Hrsg.), *Umweltinformationssysteme – Wie trägt die Digitalisierung zur Nachhaltigkeit bei?* (S.21-41). Springer Fachmedien.
- Burkhard, S., Fuchs-Kittowski, F., Deharde, M., & Poppel, M. (2022a). Mobile Anwendung zur Visualisierung von geplanten Freiflächen-PV-Anlagen mit mobiler Erweiterter Realität. In F. Fuchs-Kittowski, A. Abecker, F. Hosenfeld, H. Ortleb & M. Klafft (Hrsg.), *Umweltinformationssysteme – Vielfalt, Offenheit, Komplexität*. Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-658-39796-8_5
- Büttner, L., & Breitzkreuz, A. (2020). *Arbeiten nach Corona. Warum Home-Office gut fürs Klima ist*. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. <https://www.greenpeace.de/publikationen/Warum%20Homeoffice%20gut%20f%C3%BCrs%20Klima%20ist.pdf>
- BVL – Bundesvereinigung Logistik. (2017). *Logistik als Wissenschaft – zentrale Forschungsfragen in Zeiten der vierten industriellen Revolution. Positionspapier des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesvereinigung Logistik*. Abgerufen am 27. Februar 2025 von <https://www.bvl.de/positionspapier-logistik40>
- Carrero, I., Valor, C., & Redondo, R. (2020). Do All Dimensions of Sustainable Consumption Lead to Psychological Well-Being? Empirical Evidence from Young Consumers. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 33, 145–170. <https://doi.org/10.1007/s10806-019-09818-8>
- Carroll, P., Caulfield, B., & Ahern, A. (2019). Measuring the potential emission reductions from a shift towards public transport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 73, 338–351. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.07.010>
- Castiglione, M., Comi, A., De Vincentis, R., Dumitru, A., & Nigro, M. (2022). Delivering in Urban Areas: A Probabilistic-Behavioral Approach for Forecasting the Use of Electric Micromobility. *Sustainability*, 14(15), <https://doi.org/10.3390/su14159075>
- Chen, K.-J., Li, Z., Lu, T.-P., Rau, P.-L. P., & Huang, D. (2018). Influence of Rebound Effect on Energy Saving in Smart-Homes. In P.-L. P. Rau (Hrsg.), *Cross-Cultural Design Applications in Cultural Heritage, Creativity and Social Development*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92252-2_21
- Cheng, M., Chen, G., Wiedmann, T., Hadjikakou, M., Xu, L., & Wang, Y. (2020). The Sharing economy and sustainability - Assessing Airbnb's direct, indirect and induced carbon footprint in Sydney. *Journal of Sustainable Tourism*, 28(8), 1083-1099. <https://doi.org/10.1080/09669582.2020.1720698>
- Clausen, J., & Schramm, S. (2021). *Klimaschutzpotenziale der Nutzung von Videokonferenzen und Homeoffice. Ergebnisse einer repräsentativen Befragung von Geschäftsreisenden*. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. <https://www.borderstep.de/publikation/clausen-j-schramm-s-2021-klimaschutzpotenziale-der-nutzung-von-videokonferenzen-und-homeoffice-ergebnisse-einer-repraesentativen-befragung-von-geschaeftsreisenden-cliditrans-werkstattbericht/>
- Clausen, J., & Uhr, L. (2016). *Wohnen und Reisen. Diffusionsanalyse. Nutzen statt Besitzen*. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. <https://www.borderstep.de/publikation/clausen-j-uhr-l-2016-materialband-wohnen-und-reisen-diffusionsanalyse-nutzen-statt-besitzen-berlin-borderstep-institut/>
- Clausen, J., Niebel, T., Hintemann, R., Schramm, S., Axenbeck, J., & Iffländer, S. (2022). *Klimaschutz durch digitale Transformation: Realistische Perspektive oder Mythos?*. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. <https://www.borderstep.de/publikation/clausen-j-niebel-t-schramm-s-axenbeck-j-hintemann-r-ifflaender-s-2022-klimaschutz-durch-digitale-transformation-realistische-perspektive-oder-mythos-cliditrans-endbericht-berli/>

- Cockerton, T., Zhu, Y., & Dhimi, M. K. (2024). On Conducting Ethically Sound Psychological Science in the Metaverse. *American Psychologist*, 79(1), 92–108. <https://doi.org/10.1037/amp0001211>
- Crow, D., & Millot, E. (2020). *Working from home can save energy and reduce emissions. But how much?*. International Energy Agency. Abgerufen am 27. Februar 2025 von <https://www.iea.org/commentaries/working-from-home-can-save-energy-and-reduce-emissions-but-how-much>
- Darby, S. J. (2018). Smart technology in the home: time for more clarity. *Building Research & Information*, 46(1), 140–147. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1301707>
- Darby, S., Liddell, C., Hills, D., & Drabble, D. (2015). *Smart Metering Early Learning Project: Synthesis report*. Department of Energy & Climate Change. https://pure.ulster.ac.uk/ws/portalfiles/portal/11471764/Smart_Synthesis_report.pdf
- de Haan, P., Peters, A., Semmling, E., Marth, H., & Kahlenborn, W. (2015). *Rebound Effekte: Ihre Bedeutung für die Umweltpolitik*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/rebound-effekte-ihre-bedeutung-fuer-die>
- Degen, K., Efferson, C., Frei, F., Goette, L., & Lalive, R. (2013). *Smart-Metering, Beratung oder Sozialer Vergleich: Was beeinflusst den Elektrizitätsverbrauch?*. Abgerufen am 27 März 2025 von <https://www.meinverbrauch.ch/smart-metering>
- Deges, F. (2020). Re-Commerce. In *Gabler Wirtschaftslexikon*. Abgerufen am 27. Februar 2025 von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/re-commerce-121806>
- Delgado, A. C., Soares, R. R., & Proença, J. F. (2023). Motivations for Peer-to-Peer Accommodation: Exploring Sustainable Choices in Collaborative Consumption. *Sustainability*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/su151310276>
- Deloitte. (2017). *Bullish on the business value of cognitive. Leaders in cognitive and AI weigh in on what's working and what's next. The 2017 Deloitte State of Cognitive Survey*. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/deloitte-analytics/us-da-2017-deloitte-state-of-cognitive-survey.pdf>
- Denegri-Knott, J. (2011). "Have It Now!": Ebay and the Acceleration of Consumer Desire. *European Advances in Consumer Research*, 9, 373-379. https://www.academia.edu/74639895/_Have_It_Now_Ebay_and_the_Acceleration_of_Consumer_Desire
- Denter, L., Graf, J., & Welsch, F. (2023). *Der Digitale Produktpass. Wie wird er zum Wegbereiter für eine Kreislaufwirtschaft?*. Germanwatch. https://www.germanwatch.org/sites/default/files/germanwatch_der_digitale_produktpass_2023.pdf
- Destatis. (2020). *6,5 Millionen Menschen kaufen E-Books*. Abgerufen am 27. Februar 2025, von https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2020/PD20_42_p002.html
- Doll, C., Krauß, K., Luchmann, I., Niemeier, E., Quante, N., Ritschy, J., Scherf, C., Schuler, J., & Schürmann, R. (2019). *Verlagerungswirkungen und Umwelteffekte veränderter Mobilitätskonzepte im Personenverkehr*. PTV Transport Consult. <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/27b3627e-3352-4806-9ce3-492e7868ee37>
- Dromacque, C., & Grigoriou, R. (2018). *The Role of Data for Consumer Centric Energy Markets and Solutions*. European Smart-Metering Industry Group. <https://www.esmig.eu/esmig-publications/report-the-role-of-data-for-consumer-centric-energy-markets-and-solutions-2/>
- Du Plessis, M., Gerber, R., Goedhals-Gerber, L., & Van Eeden, J. (2025). Shaping the Future of Freight Logistics: Use Cases of Artificial Intelligence. *Sustainability*, 17(8). <https://doi.org/10.3390/su17041355>
- EFI - Expertenkommission Forschung und Innovation. (2024). *Gutachten zu Forschung, Innovation und Technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands*. https://www.e-fi.de/fileadmin/Assets/Gutachten/2024/EFI_Gutachten_2024_24124.pdf
- El-Heliebi, C. (2018). *Was du über E-Books wissen musst*. Allesebook. Abgerufen am 27. Februar 2025 von <https://allesebook.de/e-books/>
- Ellsworth-Krebs, K., Rampen, C., Rogers, E., Dudley, L., & Wishart, L. (2022). Circular Economy Infrastructure: why we need track and trace for reusable packaging. *Sustainable Production and Consumption*, 29, 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.10.007>

- Erdmann, L. (2011). Quantifizierung der Umwelteffekte des privaten Gebrauchtwarenhandels am Beispiel von Ebay. In S. Behrendt, B. Blättel-Mink & J. Clausen (Hrsg.), *Wiederverkaufskultur im Internet. Chancen für nachhaltigen Konsum am Beispiel von Ebay*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19371-2_5
- Erdmann, L., Cuhls, K., & Priebe, M. (2022). Die Beschleunigung des Alltags durch den Zeit-Rebound-Effekt und dessen Auswirkungen auf den Klimawandel. *Zeitpolitisches Magazin*, 19(40), 3–6.
- Erdmann, L., Hilty, L. M., Goodman, J., & Arnfalk, P. (2004). *The future impact of ICTs on environmental sustainability*. Institute for Prospective Technology Studies. [http://publicationslist.org/data/lorenz.hilty/ref-47/2004%20IPTS%20Final%20Report%202004%20\(synthesis\).pdf](http://publicationslist.org/data/lorenz.hilty/ref-47/2004%20IPTS%20Final%20Report%202004%20(synthesis).pdf)
- Ericsson. (2020). *Breaking the energy curve - An innovative approach to reducing mobile network energy use*. Ericsson. <https://www.readkong.com/page/breaking-the-energy-curve-an-innovative-approach-to-3784510>
- Esposito, M., Halkias, D., Tse, T., & Harkiolakis, T. (2023). Environmental and Climate Impacts of the Metaverse. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4616695>
- Estermann, B., Fivaz, J., Freccè, J., Harder, D., Jarchow, T., & Wäspi, F. (2020). *Digitalisierung und Umwelt: Chancen, Risiken und Handlungsbedarf*. Bundesamt für Umwelt. <https://www.bfh.ch/de/forschung/forschungsprojekte/2018-147-145-061/>
- Europäische Kommission. (2023). *Destination Earth (DestinE), eine Leitinitiative der Europäischen Kommission für eine nachhaltige Zukunft*. Abgerufen am 27. Februar von <https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/policies/destination-earth>
- Europäische Kommission. (2023). *Digital Markets Act: Commission designates sex gatekeepers*. Abgerufen am 25. März von https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_4328
- Europäische Kommission. (o.J.). *Shaping Europe's digital future. The Digital Services Act package*. Abgerufen am 25. März 2025 von <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/digital-services-act-package#:~:text=The%20DSA%20includes%20specific,users%20per%20month%20in>
- Europäisches Parlament. (2023). *EU AI Act: first regulation on artificial intelligence*. Abgerufen am 25. März von <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20230601STO93804/eu-ai-act-first-regulation-on-artificial-intelligence#:~:text=In%20April%202021%2C%20the,in%20different%20applications%20are>
- Faludi, J., Bayley, C., Bhogal, S., & Iribarne, M. (2015). Comparing Environmental Impacts of Additive Manufacturing vs. Traditional Machining via Life-Cycle Assessment. *Rapid Prototyping Journal*, 21(1), 14–33. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2013-0067>
- Fareed, A., De Felice, F., Forcina, A., & Petrillo, A. (2024). Role and applications of advanced digital technologies in achieving sustainability in multimodal logistics operations: A systematic literature review. *Sustainable Futures*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100278>
- Fasnacht, D., & Straube, C. (2024). Quantencomputing als Basistechnologie für den nächsten Konjunkturzyklus. In C. Leyh & T. Schäffer (Hrsg.): *Digitale Kompetenzen*. Springer. <https://doi.org/10.1365/s40702-023-00969-x>
- Fastermann, P. (2016). 3D-Druck: eine nachhaltige und Energieeffizienz fördernde Technologie. In F. J. Matzen, & R. Tesch (Hrsg.), *Industrielle Energiestrategie. Praxishandbuch für Entscheider des produzierenden Gewerbes*. Springer Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-658-07606-1_16
- Fernández Briseño, D., Chegut, A., Glennon, E., Scott, J., & Yang, J. (2020). Retail Carbon Footprints: Measuring Impacts from Real Estate and Technology. *The Real Estate Innovation Lab*. <https://mitcre.mit.edu/news/retail-carbon-footprints-measuring-impacts-from-real-estate-and-technology>
- Fichter, K. (2007). *Zukunftsmarkt energieeffiziente Rechenzentren*. Umweltbundesamt, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3450.pdf>
- Fichter, K., Behrendt, S., Beucker, S., & Hintemann, R. (2012). *Gutachten zum Thema „Green IT – Nachhaltigkeit“ für die Enquete-Kommission Internet und digitale Gesellschaft des Deutschen Bundestages*. Borderstep Institut für Nachhaltigkeit und Innovation, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. https://www.researchgate.net/publication/258298842_Gutachten_zum_Thema_Green_IT_-_Nachhaltigkeit_fur_die_Enquete-Kommission_Internet_und_digitale_Gesellschaft_des_Deutschen_Bundestages

- Fioreze, T., de Gruijter, M., & Geurs, K. (2019). On the likelihood of using Mobility-as-a-Service: A case study on innovative mobility services among residents in the Netherlands. *Case Studies on Transport Policy*, 7(4), 790–801. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.08.002>
- Flämig, H. (2015). Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren im Bereich des Gütertransportes. In M. Mauer, J. C. Gerdes, B. Lenz & H. Winner (Hrsg.), *Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45854-9_18
- Flick, C., & Henseling, C. (2019). Plattformen des Peer-to-Peer Sharing. In S. Behrendt, C. Henseling & G. Scholl (Hrsg.), *Digitale Kultur des Teilens. Mit Sharing nachhaltiger Wirtschaften* (S. 13–26). Springer Gabler.
- Foljanty, L., Gossen, M., Duong, T. C., Kudella, C., Runge, D., & Ruoff, P. (2016). *Mobilität der Zukunft. Ergebnisbericht Projekt „Share-Way - Wege zur Weiterentwicklung von Shared Mobility zur dritten Generation“*. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. https://www.ioew.de/fileadmin/user_upload/BILDER_und_Downloaddateien/Publikationen/2016/ShareWay-Ergebnisbericht.pdf
- Follmer, R., Knie, A., Buchmann, I., Hoffmann, M., van Nek, L., Schelewsky, M. (2024). *Mit Homeoffice und Deutschlandticket in die Mobilitätszukunft? Ergebnisse aus Beobachtungen per repräsentativer Befragung*. Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung, Institut für angewandte Sozialwissenschaft. https://www.infas.de/wp-content/uploads/2024/04/inf_7895_Mobilitaetsreport_09_20240429.pdf
- Font Vivanco, D., Freire-González, J., Galvin, R., Santarius, T., Walnum, H. J., Makov, T., & Sala, S. (2022). Rebound Effect and Sustainability Science: A Review. *Journal of Industrial Ecology*, 26(4), 1543–1563. <https://doi.org/10.1111/jiec.13295>
- Font Vivanco, D., Kemp, R., & van der Voet, E. (2016). How to Deal with the Rebound Effect? A Policy-Oriented Approach. *Energy Policy*, 94, 114–25. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.054>
- Fortune. (2024). *Fortune Business Insights Marktforschungsbericht*. Abgerufen am 2. Mai 2024 von <https://www.fortunebusinessinsights.com/de/information-und-technologie-industry#>
- Fraunhofer IPK - Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik. (o.J.). *Nachhaltigkeit mithilfe von Digital Twins*. Abgerufen am 27. Februar 2025 von <https://www.ipk.fraunhofer.de/de/kompetenzen-und-loesungen/industrietrends/digital-twins/digitaler-produktzwilling/digital-twins-nachhaltigkeit.html>
- Fraunhofer FOKUS – Kompetenzzentrum Öffentliche IT. (2024). *Grüne Software*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://www.oeffentliche-it.de/-/grune-software>
- Fraunhofer IKS – Fraunhofer-Institut für Kognitive Systeme. (2024). *Autonomes Fahren*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://www.iks.fraunhofer.de/de/themen/autonomes-fahren.html>
- Fraunhofer IOSB – Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (o.J.). *Digitale Zwillingssysteme – das Schlüsselkonzept für Industrie 4.0*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://www.iosb.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/automatisierung-digitalisierung/anwendungsfelder/digitaler-zwilling.html>
- Fraunhofer ISE - Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. (2011). *Projekt »Intelliekon« legt erste Ergebnisse zur Stromeinsparung durch Smart-Metering vor*. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2011/ISE_PI_d_Intelliekon_Ergebnisse.pdf
- Freire-González, J., & Ho, M. S. (2022). Policy Strategies to Tackle Rebound Effects: A Comparative Analysis. *Ecological Economics*, 193. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107332>
- Frick, V., & Matthies, E. (2020). Everything is just a click away. Online shopping efficiency and consumption levels in three consumption domains. *Sustainable Production and Consumption*, 23, 212–223. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.05.002>
- Frick, V., & Nguyen, T.-N. (2021). Energieeinsparung, Sicherheit, Technikbegeisterung und Konsumismus. Eine motivbasierte Typologie von Smart-Home-Nutzer/innen in Deutschland. *Umweltpsychologie*, 25(1), 19–42.
- Frick, V., & Santarius, T. (2019). Smarte Konsumwende? Chancen und Grenzen der Digitalisierung für den nachhaltigen Konsum. In R. Hübner & B. Schmon (Hrsg.), *Das transformative Potenzial von Konsum zwischen Nachhaltigkeit und Digitalisierung. Chancen und Risiken*. Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-26040-8_3

- Frick, V., Gossen, M., & Kettner, S. E. (2022). Sustainable consumption and the internet. Does online advertising stimulate overconsumption?. *Ökologisches Wirtschaften*, 37(1), 46–50. <https://doi.org/10.14512/OEW370146>
- Frick, V., Gossen, M., Lautermann, C., Muster, V., Kettner, S., Thorun, C., & Santarius, T. (2019). *Digitalisierung von Märkten und Lebensstilen: Neue Herausforderungen für nachhaltigen Konsum. Stand der Forschung und Handlungsempfehlungen. Zwischenbericht*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/digitalisierung-von-maerkten-lebensstilen-neue>
- Fritzsche, K., Niehoff, S., & Beier, G. (2018). Industry 4.0 and climate change - Exploring the science-policy gap. *Sustainability*, 10(12), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su10124511>
- Frondel, M. (2021). Digitalisierung und Nachhaltigkeit im Haushalts-, Gebäude- und Verkehrssektor: Ein kurzer Überblick. *List Forum für Wirtschafts- und Finanzpolitik*, 46, 405–422. <https://doi.org/10.1007/s41025-021-00222-7>
- Gähns, S., Bluhm, H., Dunkelberg, E., Katner, J., Weiß, J., Henning, P., Herrmann, L., & Knauff, M. (2021a). *Potenziale der Digitalisierung für die Minderung von Treibhausgasemissionen im Energiebereich. Abschlussbericht*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/potenziale-der-digitalisierung-fuer-die-minderung>
- Gähns, S., Weiß, J., Bluhm, J., Dunkelberg, E., & Katner, J. (2021b). *Erkenntnisse zu Umweltwirkungen von Smart-Metering. Erfahrungen aus dem Einsatz von Smart Metern in Europa*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erkenntnisse-zu-umweltwirkungen-von-smart-metern>
- Geels, F. W. (2018). Disruption and Low-Carbon System Transformation: Progress and New Challenges in Socio-Technical Transitions Research and the Multi-Level Perspective. *Energy Research & Social Science*, 37, 224–31. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.010>
- GeSI - Global eSustainability Initiative. (2015). *Smarter 2030. ICT Solutions for 21st Century Challenges*. https://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report.pdf
- Ghosh, B., Mekhilef, S., Ahmad, S., & Ghosh, S. (2022). A Review on Global Emissions by E-Products Based Waste: Technical Management for Reduced Effects and Achieving Sustainable Development Goals. *Sustainability*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/su14074036>
- Ghulam, S., & Abushammala, H. (2023). Challenges and Opportunities in the Management of Electronic Waste and Its Impact on Human Health and Environment. *Sustainability*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/su15031837>
- Glaeser, B. (1989). *Umweltpolitik — Neuansatz in der Spannung zwischen Theorie Und Praxis*. In B. Glaeser (Hrsg.), *Humanökologie: Grundlagen Präventiver Umweltpolitik*. VS Verlag für Sozialwissenschaften. https://doi.org/10.1007/978-3-322-93573-1_1
- Golde, M. (2016). *Rebound-Effekte. Empirische Ergebnisse und Handlungsstrategien*. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rebound-effekte_empirische_ergebnisse_und_handlungsstrategien_hintergrundpapier.pdf
- Google. (2022): *Google Maps: Umweltfreundliche Routenplanung startet in Deutschland – Benzin sparen und das Klima schonen*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://www.googlewatchblog.de/2022/08/google-maps-umweltfreundliche-routenplanung/>
- Göpel, M. (2020). *Unsere Welt neu denken*. Ullstein Hardcover.
- Gosling, S., Perez, F., Li, J. D., Martinez, A., & Miguel, M. (2023). *Digital logistics: Technology race gathers momentum*. McKinsey & Company. Abgerufen am 25. Februar von <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-logistics-technology-race-gathers-momentum>
- Gossart, C. (2015). Rebound Effects and ICT: A Review of the Literature. In L. M. Hilty & B. Aebischer (Hrsg.), *ICT Innovations for Sustainability*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_26
- Gossen, M., Frick, V., Lell, O., & Scholl, G. (2022). *Politik für nachhaltigen Konsum in der digitalen Welt. Policy Paper*. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_politik_fuer_nachhaltigen_konsum_in_der_digitalen_welt.pdf
- Gotsch, M., Erdmann, L., & Eberling, E. (2020). *Digitalisierung ökologisch nachhaltig nutzbar machen. Entwicklung von Handlungsempfehlungen zu den wichtigsten umweltpolitischen Maßnahmen in ausgewählten Trendthemen der*

- Digitalisierung mittels der Durchführung von Stakeholderdialogen.* Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/digitalisierung-oekologisch-nachhaltig-nutzbar>
- Götz, T., Adisorn, T., & Tholen, L. (2021). *Der Digitale Produktpass als Politik-Konzept. Kurzstudie im Rahmen der Umweltpolitischen Digitalagenda des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.* Wuppertal Institut Klima, Umwelt, Energie. <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7694/file/WR20.pdf>
- Götz, T., Berg, H., Jansen, M., Adisorn, T., Cembrero, D., Markkanen, S., & Chowdhury, T. (2022). *Digital Product Passport: The ticket to achieving a climate neutral and circular European economy?.* Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership.
<https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/8049>
- Goulder, L., & Parry, I. (2008). Instrument Choice in Environmental Policy. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2(2), 152–74. <https://doi.org/10.1093/reep/ren005>
- Goyal, S., & Gupta, S. (2024). A Comprehensive Review of Current Techniques, Issues, and Technological Advancements in Sustainable E-Waste Management. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 9.
<https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100702>
- Greening, L., Greene, D., & Difiglio, C. (2000). Energy efficiency and consumption: The rebound effect - a survey. *Energy Policy*, 28(6–7), 389–401. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00021-5)
- Gröger, J., Köhler, A., Naumann, S., Filler, A., Guldner, A., Kern, E., Hilty, L. M., & Maksimov, Y. (2018). *Entwicklung und Anwendung von Bewertungsgrundlagen für ressourceneffiziente Software unter Berücksichtigung bestehender Methodik.* Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-anwendung-von-bewertungsgrundlagen-fuer>
- Gröger, J., Liu, R., Stobbe, L., Druschke, J., & Richter, N. (2021). *Green Cloud Computing. Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing.* Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/green-cloud-computing>
- Groß, K., Duggen, J., Postert, S., & Auffermann, C. (2016). *Auswirkung des E-Commerce Auf Die Verkehrsströme Innerstädtischer Einzelhandelsstandorte Am Beispiel Der Stadt Bochum.* Industrie- und Handelskammer Mittleres Ruhrgebiet. <https://www.ihk.de/blueprint/servlet/resource/blob/5601538/95af6f8eed23fd850f24442509cfbbd6/studie-auswirkungen-des-ecommerce-data.pdf>
- Grünwald, R., & Caviezel, C. (2022). *Energieverbrauch der IKT-Infrastruktur, Endbericht zum TA-Projekt. TAB-Arbeitsbericht, 198.* <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000151164>
- Gsell, M., Dehoust, G., Hülsmann, F., Brommer, E., Cheung, E., Förster, H., Kasten, P., Möck, A., Putzke, H., Quack, D., Peter, M., Schwegler, R., Bertschmann, D., & Zandonella, R. (2015). *Nutzen statt Besitzen: Neue Ansätze für eine Collaborative Economy.* Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/nutzen-statt-besitzen-neue-ansaeetze-fuer-eine>
- Guillen-Royo, M. (2019). Sustainable Consumption and Wellbeing: Does online Shopping Matter? *Journal of Cleaner Production*, 229, 1112–1124. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.061>
- Gyetko, M., Pichlmaier, S., von Roon, S. (2021). *Energiewirtschaftliche Auswirkungen autonomer Fahrtechnologie auf den Verkehrssektor.* Forschungsstelle für Energiewirtschaft. <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/energiewirtschaftliche-auswirkungen-autonomer-fahrtechnologie-auf-den-verkehrssektor/>
- Hao, K. (2019). *The Computing power needed to train AI is now raising seven times faster than ever before.* Abgerufen am 25. März von <https://www.technologyreview.com/2019/11/11/132004/the-computing-power-needed-to-train-ai-is-now-rising-seven-times-faster-than-ever-before/#:~:text=In%202018%2C%20OpenAI%20found,every%203.4%20months%20since>
- Harb, M., Xiao, Y., Circella, G., Mokhtarian, P., & Walker, J. (2018). Projecting travelers into a world of self-driving vehicles: estimating travel behavior implications via a naturalistic experiment. *Transportation*, 45, 1671–1685.
<https://doi.org/10.1007/s11116-018-9937-9>
- Hargreaves, T., Hauxwell-Baldwin, R., Coleman, M., Wilson, C., Stankovic, L., Stankovic, V., Murray, D., Liao, J., Kane, T., Firth, S., & Hassan, T. (2015). Smart-Homes, Control and Energy Management: How do Smart-Home Technologies Influence Control Over Energy Use and Domestic Life?. *ECEE Summer Study Proceedings*, 1021 – 1032.

Hebinck, A., Diercks, G., von Wirth, T., Beers, P. J., Barsties, L., Buchel, S., Greer, R., van Steenberg, F., & Loorbach, D. (2022). An Actionable Understanding of Societal Transitions: The X-Curve Framework. *Sustainability Science*, *17*, 1009–1021. <https://doi.org/10.1007/s11625-021-01084-w>

Heinrich-Böll-Stiftung. (2024). *The EU AI Act and environmental protection: the case for a missed opportunity*. Abgerufen am 25. März von <https://eu.boell.org/en/2024/04/08/eu-ai-act-missed-opportunity#:~:text=The%20wording%20of%20Article,the%20consumption%20of%20other>

Henderson, P., Hu, J., Romoff, J., Brunskill, E., Jurafsky, D., & Pineau, J. (2020). Towards the Systematic Reporting of the Energy and Carbon Footprints of Machine Learning. *Journal of Machine Learning Research*, *21*(1), 10039–10081.

Henseling, C. (2019). Nutzungsmuster von Plattformen des Peer-to-Peer Sharing. In S. Behrendt, C. Henseling & G. Scholl (Hrsg.), *Digitale Kultur des Teilens. Mit Sharing nachhaltiger Wirtschaften* (S. 53–69). Springer Gabler.

Henseling, C., Behrendt, S., & Zwiers, J. (2021a). *Zirkuläre Innovationen im Bereich Textilien in Berlin. Potenziale und Governance-Ansätze*. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, https://www.ecornet.eu/fileadmin/ecornet/user_upload/Ecornet_Berlin/EcornetBerlin_Report7_CiBER_Zirkulaere_Innovationen_Textilien.pdf

Henseling, C., Behrendt, S., Gegner, K., & Willim, Z. (2021b). *Auswertung der Fokusgruppe „Teilflächenspezifische Ausbringung organischer Düngemittel unterstützt durch NIRS-Technologie“* (internes Arbeitspapier). Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung.

Hensher, D. A., Ho, C. Q., & Reck, D. J. (2021). Mobility as a service and private car use: Evidence from the Sydney MaaS trial. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *145*, 17–33. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.12.015>

Heyen, D. A. (2021). *Soziale Wirkungen von Umweltpolitik. Konzeptionelle Fragen, empirischer Forschungsstand und weiterer Forschungsbedarf*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/soziale-wirkungen-von-umweltpolitik>

Hilty, L. M., & Bieser, J. (2017). Opportunities and Risks of Digitalization for Climate Protection in Switzerland. *University of Zurich*. <https://www.zora.uzh.ch/id/eprint/141128/>

Hilty, L. M., Behrendt, S., Binswanger, M., Bruinink, A., Erdmann, L., Fröhlich, J., Köhler, A., Kuster, N., Som, C., & Würtenberger, F. (2005). *The Precautionary Principle in the Information Society. Effects of Pervasive Computing on Health and Environment. Report of the Centre for Technology Assessment*. Swiss Center for Technology Assessment (TA-SWISS). https://www.researchgate.net/publication/258298988_The_Precapution_Principle_in_the_Information_Society_Effects_of_Pervasive_Computing_on_Health_and_Environment_Report_of_the_Centre_for_Technology_Assessment#fullTextFileContent

Hilty, L. M., Behrendt, S., Binswanger, M., Erdmann, L., Fröhlich, J., Koehler, A., Kuster, N., Som, C., & Würtenberger, F. (2003). *Das Vorsorgeprinzip in der Informationsgesellschaft. Auswirkungen des Pervasive Computing auf Gesundheit und Umwelt. Studie des Zentrums für Technologiefolgen-Abschätzung*. TA-SWISS Zentrum für Technologiefolgenabschätzung. https://www.researchgate.net/publication/258299122_Das_Vorsorgeprinzip_in_der_Informationsgesellschaft_Auswirkungen_des_Pervasive_Computing_auf_Gesundheit_und_Umwelt_Studie_des_Zentrums_fur_Technologiefolgen-Abschätzung_TA_Swiss

Hilty, L. M., Koehler, A. R., von Scheelé, F., Zah, R., Ruddy, T. F. (2006). Rebound Effects of Progress in Information Technology. *Poiesis & Praxis - International Journal of Technology Assessment and Ethics of Science*, *4*, 19–38. <https://doi.org/10.1007/s10202-005-0011-2>

Hilty, L. M., Lohmann, W., Behrendt, S., Evers-Wölk, M., Fichter, K., & Hintemann, R. (2015). *Grüne Software. Ermittlung und Erschließung von Umweltschutzpotenzialen der Informations- und Kommunikationstechnik (Green IT). Potenzialanalyse zur Ressourcenschonung optimierter Softwareentwicklung und -einsatz*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/gruene-software>

Hintemann, R. & Iffländer, S. (2021). *Klimaschutzpotenziale durch den Einsatz von Virtualisierung und Cloud Computing in privaten und öffentlichen Unternehmen*. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2023/05/AP3-1_Cloud-Computing-final.pdf

Hintemann, R. (2017). Software, Internet, Computer – noch lange nicht „green“. In Heinrich-Böll-Stiftung (Hrsg.), *Wirtschaft im Zukunfts-Check. So gelingt die Transformation* (37–56). Oekom.

Hintemann, R. (2020). *Rechenzentren 2018. Effizienzgewinne reichen nicht aus: Energiebedarf der Rechenzentren steigt weiter deutlich an*. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit.

<https://www.borderstep.de/publikation/hintemann-r-2020-rechenzentren-2018-effizienzgewinne-reichen-nicht-aus-energiebedarf-der-rechenzentren-steigt-weiter-deutlich-an-berlin-borderstep-institut/>

Hintemann, R. (2021). *Rechenzentren 2020. Cloud Computing profitiert von der Krise. Energiebedarf der Rechenzentren steigt trotz Corona weiter an*. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit.

<https://www.borderstep.de/publikation/hintemann-r-2021-rechenzentren-2020-cloud-computing-profitiert-von-der-krise-energiebedarf-der-rechenzentren-steigt-trotz-corona-weiter-an-berlin-borderstep-institut/>

Hintemann, R., & Clausen, J. (2016). *Internet und Cloud Computing - Umweltinnovationen und ihre Diffusion als Treiber der Green Economy*. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. <https://www.borderstep.de/publikation/hintemann-r-clausen-j-2016-materialband-8-internet-und-cloud-computing-umweltinnovationen-und-ihre-diffusion-als-treiber-der-green-economy-berlin-borderstep-institut/>

Hintemann, R., & Hinterholzer, S. (2020). *Videostreaming: Energiebedarf und CO₂-Emissionen, Hintergrundpapier*. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit.

<https://www.borderstep.de/2020/07/13/videostreamingenergiebedarf-und-co2-emissionen/>

Hintemann, R., Hinterholzer, S., Clausen, J. (2020). *Rechenzentren in Europa – Chancen für eine nachhaltige Digitalisierung (Teil 2)*. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. <https://www.borderstep.de/publikation/hintemann-r-hinterholzer-s-clausen-j-2020-rechenzentren-in-europa-chancen-fuer-eine-nachhaltige-digitalisierung-teil-2-berlin-borderstep-institut/>

Hintemann, R., Schaudwet, C., & Wagner, K. (2024, 10 Oktober). *KI und Klima. Wird die Technologie der Umwelt helfen oder schaden?*. Tagesspiegel. <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/ki-und-klima-wird-die-technologie-der-umwelt-helfen-oder-schaden-12588929.html>

Hischier, R. (2018). Car vs. Packaging - A First, Simple (Environmental) Sustainability Assessment of Our Changing Shopping Behaviour. *Sustainability*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/su10093061>

Hochfeld, C., Jung, A., Klein-Hitpaß, A., Maier, U., Meyer, K., & Vorholz, F. (2017). *Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern. 12 Thesen zur Verkehrswende. Eine Diskussion zu den wichtigsten Herausforderungen der Verkehrswende*. Agora Verkehrswende. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/12_Thesen/Agora-Verkehrswende-12-Thesen_WEB.pdf

Höfer, T., Bierwirth, S., & Madlener, R. (2019, 10. März). *C15 – Energiemehrverbrauch in Rechenzentren bei Einführung des 5G Standards* [Konferenzbeitrag]. Nachhaltige Rechenzentren – Chancen und Entwicklungsmöglichkeiten am Standort Baden-Württemberg, Stuttgart, Deutschland.

Hoffmann, P., Frey, G., Friedrich, M., Kerber-Clasen, S., Marschall, J., & Geiger, M. (2012). *Praxistest „Moderne Energiesparsysteme im Haushalt“*. Institut für ZukunftsEnergieSysteme.

https://alt.izes.de/sites/default/files/publikationen/EM_8_705.pdf

Holistic AI. (2024). The Artificial Intelligence Environmental Impacts Act of 2024: What You Need to Know. Abgerufen am 25. März von <https://www.holisticai.com/blog/artificial-intelligence-environmental-impacts-act#:~:text=and%20the%20Secretary%20of,measurements%2C%20methodologies%2C%20standards%2C%20and>

Holtermann, F., Jahn, F., & Witsch, K. (2024, 16. Oktober). *KI-treibt Energieverbrauch. Google setzt auf kleine Atomreaktoren für seine Rechenzentren*. Tagesspiegel. <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/ki-treibt-energieverbrauch--google-setzt-auf-atomstrom-12536327.html>

Hook, A., Court, V., Sovacool, B., & Sorrell, S. (2020). A systematic review of the energy and climate impacts of teleworking. *Environmental Research Letters*, 15(9). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8a84>

Hörl, S., Becker, F., Dubernet, T., & Axhausen, K. (2019). *Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge: Eine Abschätzung*. Institut für Verkehrsplanung und Transportssysteme. <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ivt/ivt-dam/vpl/reports/1401-1500/ab1433.pdf>

Houde, S., Todd, A., Sudarshan, A., Flora, J. A., & Armel, K. C. (2013). Real-time Feedback and Electricity Consumption. A Field Experiment Assessing the Potential for Savings and Persistence. *The Energy Journal*, 34(1), 87–102.

<https://doi.org.10.5547/01956574.34.1.4>

- IEA – International Energy Agency. (2019). *Energy Efficiency 2019*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/8441ab46-9d86-47eb-b1fc-cb36fc3e7143/Energy_Efficiency_2019.pdf
- Illenberger, R. (2020). Virtual Reality: Vom Content Marketing zum Immersive Marketing. In M. Wesselmann (Hrsg.): *Content gekonnt. Strategie, Organisation, Umsetzung, ROI-Messung und Fallbeispiele aus der Praxis*. Springer Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-658-24620-4_21
- International Transport Forum. (2017). Shared Mobility Simulations for Auckland. International Transport Forum Policy Papers, (41). <https://doi.org/10.1787/5423af87-en>
- ISO. (2024). *What Is Artificial Intelligence (AI)?*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://www.iso.org/artificial-intelligence/what-is-ai>
- IT-Lexikon. (2024). Software – Definition. In *IT-Lexikon*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://it-service.network/it-lexikon/software/>
- ITU - International Telecommunication Union. (2015). *IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/r-rec-m.2083-0-201509-i!!pdf-e.pdf
- ITU – International Telecommunication Union. (2022). *5G – Fifth generation of mobile technologies*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx#:~:text=The%20fifth%20generation%20of%20mobile,in%20smart%20networked%20communication%20environments>
- iwd - Informationsdienst des Instituts der deutschen Wirtschaft. (2022). *Printzeitung weicht dem E-Paper*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://www.iwd.de/artikel/printzeitung-weicht-dem-e-paper-558088/>
- Jaeger-Erben, M., Poppe, E., Wagner, E., Schaefer, A., Druschke, J., Gröger, J., & Behrens, F. (2023). *Analyse der softwarebasierten Einflussnahme auf eine verkürzte Nutzungsdauer von Produkten. Abschlussbericht*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-der-softwarebasierten-einflussnahme-auf>
- Jenkins, J., Nordhaus, T., & Shellenberger, M. (2011). *Energy emergence: Rebound & Backfire as Emergent Phenomena*. Breakthrough Institute. https://s3.us-east-2.amazonaws.com/uploads.thebreakthrough.org/legacy/blog/Energy_Emergence.pdf
- Jensen, R. H., Strengers, Y., Kjeldskov, J., Nicholls, L., & Skov, M. (2018). Designing the Desirable Smart-Home: A Study of Household Experiences and Energy Consumption Impacts. *Proceedings of the 2018 Conference on Human Factors in Computing Systems*, (4), 1–14. <https://doi.org/10.1145/3173574.3173578>
- Jetzke, T., Abel, S., Meißner, L., Richter, S., Michelmann, J., Ziegler, O., Domröse, L., Knörzer, U., Olliges, J., & Keppner, B. (2023). *Umweltrelevante Zukunftsthemen von Quantencomputing über die Zukunft der Innenstädte bis zu einer neuen Weltordnung*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/von-quantencomputing-ueber-die-zukunft-der>
- Jetzke, T., Richter, S., Abel, S., Keppner, B., Kahlenborn, W., Weiß, D. (2020). *Umweltrelevante Zukunftsthemen. Von Blockchain über Raumfahrt bis zu virtuellen Welten. Ergebnisse des ersten Horizon Scanning-Zyklus für das Umweltressort*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/von-blockchain-ueber-raumfahrt-bis-virtuellen>
- Jetzke, T., Richter, S., Ferdinand, J.-P., & Schaaf, S. (2019). *Künstliche Intelligenz im Umweltbereich. Anwendungsbeispiele und Zukunftsperspektiven im Sinne der Nachhaltigkeit*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kuenstliche-intelligenz-im-umweltbereich>
- Jevons, W. S. (1865). *The Coal Question: An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal-Mines*. Macmillan and Co.
- Juge, E., Pomiès, A., & Collin-Lachaud, I. (2022). Digital platforms and speed-based competition: The case of secondhand clothing. *Recherche et Applications en Marketing*, 37(1), 36–58. <https://doi.org/10.1177/20515707211028551>
- Jung, T., tom Dieck, M. C., Lee, H., & Chung, N. (2016). Effects of virtual reality and augmented reality on visitor experiences in museum. In A. Iversini & R. Schegg (Hrsg.), *Proceedings of the Information and Communication Technologies in Tourism 2016*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28231-2_45

- Kaack, L., Donti, P., Strubell, E., & Rolnick, D. (2020). *Artificial Intelligence and Climate Change: Opportunities, considerations, and policy levers to align AI with climate change goals*. Heinrich-Böll-Stiftung. https://us.boell.org/sites/default/files/2020-12/Artificial%20Intelligence%20and%20Climate%20Change_FINAL.pdf
- Kadner, S., Kobus, J., Hansen, E., Akinci, S., Elsner, P., Hagelüken, C., Jaeger-Erben, M., Kick, M., Kwade, A., Kühl, C., Müller-Kirschbaum, T., Obeth, D., Schweitzer, K., Stuchtey, M., Vahle, T., Weber, T., Wiedemann, P., Wilts, H., & von Wittken, R. (2021). *Circular Economy Roadmap für Deutschland*. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Circular Economy Initiative Deutschland, SYSTEMIQ. <https://www.acatech.de/publikation/circular-economy-roadmap-fuer-deutschland/>
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. <https://www.acatech.de/publikation/umsetzungsempfehlungen-fuer-das-zukunftsprojekt-industrie-4-0-abschlussbericht-des-arbeitskreises-industrie-4-0/>
- Kahlenborn, W., Keppner, B., Uhle, C., Richter, S., & Jetzke, T. (2018). *Die Zukunft im Blick: Konsum 4.0. – wie Digitalisierung den Konsum verändert. Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/konsum-40-wie-digitalisierung-den-konsum-veraendert>
- Kang, Q., Lu, J., & Xu, J. (2021). Is e-reading environmentally more sustainable than conventional reading? Evidence from a systematic literature review. *Library & Information Science Research*, 43(1). <https://doi.org/10.1016/j.lisr.2021.101105>
- Karamanos, P. (2001). Voluntary Environmental Agreements: Evolution and Definition of a New Environmental Policy Approach. *Journal of Environmental Planning and Management*, 44, 67–84. <https://doi.org/10.1080/09640560124364>
- Karl, D., & Zitzmann, I. (2018). *Smart und Sustainable? Industrie 4.0 aus der Perspektive der Nachhaltigkeit*. *Opus*, 78 – 97. <https://doi.org/10.20378/irbo-51578>
- Karl, H., & Orwat, C. (2002). Economic Aspects of Environmental Labelling. In H. Folmer & T. Tietenberg (Hrsg.): *The International Yearbook of Environmental and Resource Economics 1999/2000. A Survey of current Issues* Economics Archive. <https://doi.org/10.4337/9781035365913.00010>
- Kehl, C., Meyer, R., & Steiger, S. (2021). *Digitalisierung der Landwirtschaft: gesellschaftliche Voraussetzungen, Rahmenbedingungen und Effekte. Teil II des Endberichts zum TA-Projekt*. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. https://www.tab-beim-bundestag.de/projekte_digitalisierung-der-landwirtschaft.php
- Kharchenko, T., & Andreieva, O. (2024). Modern Aspects of Environmental Logistics Activities of Entreprises based on the Implementation of Artificial Intelligence Opportunities. *Theoretical and Applied Issues of Economics*. <https://doi.org/10.17721/tppe.2024.48.16>
- Keppner, B., Kahlenborn, W., Richter, S., Jetzke, T., Lessmann, A., & Bovenschulte, M. (2018). *Die Zukunft im Blick: 3D-Druck. Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/die-zukunft-im-blick-3d-druck>
- Kersken, M., Sinnesbichler, H., & Erhorn, H. (2018). *Analyse der Einsparpotenziale durch Smarthome- und intelligente Heizungsregelungen*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik. <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/d3063416-e4d7-47c5-8b30-b996ab1f45ec>
- Khazzoom, J. D. (1980). The economic implications of mandated efficiency in standards for household appliances. *The Energy Journal*, 1(4), 21–40.
- Kim, S.-N., Choo, S., & Mokhtarian, P. L. (2015). Home-based telecommuting and intra-household interactions in work and non-work travel: A seemingly unrelated censored regression approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 80, 197–214. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.07.018>
- Kliem, L., Krachunova, T., Lange, S., Wagner, J., & Bellingrath-Kimura, S. (2023). *Chancen und Risiken der Digitalisierung in der Landwirtschaft aus der Sicht des Umwelt- und Naturschutzes*. Bundesamt für Naturschutz. <https://bfu.bsz-bw.de/frontdoor/deliver/index/docid/1109/file/Schrift645.pdf>
- Klose, S., & Kreutzer, R. T. (2023). Metaverse – Technologien, Infrastruktur und Use-Cases. In G. Schuster & B. Wecke (Hrsg.): *Marketing-Technologien. Innovative Unternehmenspraxis: Insights, Strategien und Impulse*. Wiesbaden: Springer Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42294-3_4

- Klöß, S., Krösmann, C., Gentemann, L., & Esser, R. (2019). *Zukunft der Consumer Technology – 2019. Marktentwicklung, Trends, Mediennutzung, Technologien, Geschäftsmodelle*. Bitkom e.V. <https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Die-Zukunft-der-Consumer-Technology-2019>
- Köhler, J., Geels, F. W., Kern, F., Markard, J., Onsongo, E., Wieczorek, A., Alkemade, F., Avelino, F., Bergek, A., Boons, F., Fünfschilling, L., Hess, D., Holtz, G., Hyysalo, S., Jenkins, K., Kivimaa, P., Martiskainen, M., McMeekin, A., Mühlemeier, M. S., Nykvist, B., Pel, B., Raven, R., Rohrer, H., Sandén, B., Schot, J., Sovacool, B., Turnheim, B., Welch, D., & Wells, P. (2019). An Agenda for Sustainability Transitions Research: State of the Art and Future Directions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 31, 1–32. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.01.004>
- Köhn, M., Gröger, J., & Stobbe, L. (2020). *Energie- und Ressourceneffizienz digitaler Infrastrukturen. Ergebnisse des Forschungsprojektes „Green Cloud-Computing“*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/energie-ressourceneffizienz-digitaler>
- Kolarova, V., Stark, K., Hedemann, L., & Lenz, B. (2020). *Die Automatisierung des Automobils und ihre Folgen. Chancen und Risiken selbstfahrender Fahrzeuge für nachhaltige Mobilität*. Agora Verkehrswende. <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/die-automatisierung-des-automobils-und-ihre-folgen>
- Koomey, J., Berard, S., Sanchez, M., & Wong, H. (2011). Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing. *IEEE Annals of the History of Computing*, 33 (3), 46–54. <https://doi.org/10.1109/MAHC.2010.28>
- Korduan, J., Kuhlmann, J., Hildebrandt, F., & Hasper, M. (2023). *Ein Digitaler Produktpass für Ressourcenschutz und Kreislaufwirtschaft*. Bund für Umwelt und Naturschutz e.V. <https://www.bund.net/service/publikationen/detail/publication/digitaler-produktpass-fuer-ressourcenschutz-und-kreislaufwirtschaft/>
- Krail, M. (2020). *Auto tankt Internet - Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen, Datenübertragung und Infrastruktur. Analyse*. Agora Verkehrswende. <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/auto-tankt-internet>
- Krail, M., Hellekes, J., Schneider, U., Dütschke, E., Schellert, M., Rüdiger, D., Steindl, A., Luchmann, I., Waßmuth, V., Flämig, H., Schade, W., & Mader, S. (2019). *Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr*. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung. https://www.researchgate.net/publication/330728232_Energie-_und_Treibhausgaswirkungen_des_automatisierten_und_vernetzten_Fahrens_im_Strassenverkehr
- Kroll, M. (2020). *Die Auswirkungen des 5G Netz-Ausbaus auf Energieverbrauch, Klimaschutz und die Einführung weiterer Überwachungstechniken*. Stiftung World Future Council. <https://www.worldfuturecouncil.org/de/5g-studie-klimaschutz-datenschutz/>
- Kühnen, M., Hahn, R., Silva, S. L., & Schaltegger, S. (2017). *Verständnis und Messung sozialer und positive Nachhaltigkeitswirkungen: Erkenntnisse aus Literatur, Praxis und Delphi-Studien – Arbeitspapier Nr. 1 im Rahmen des Projekts „Der Handabdruck: Ein komplementäres Maß positiver Nachhaltigkeitswirkung von Produkten“*. Centrum für Nachhaltigkeitsmanagement. https://mehrwert-nachhaltigkeit.de/media/pages/mediapool/7f598c9928-1727270629/handabdruck_ap1.pdf
- Laine, A., Lampikoski, T., Rautiainen, T., Bröckl, M., Bang, C., Poulsen, N. S., & Kofoed-Wiuff, A. (2018). *Mobility as a Service and Greener Transportation Systems in a Nordic context*. Nordic Council of Ministers. <https://www.ea-energianalyse.dk/wp-content/uploads/2021/04/Mobility-as-a-Service-and-Greener-Transportation-Systems-in-a-Nordic-context.pdf>
- Lambrecht, U., Kräck, J., & Dünnebeil, F. (2021). *Home-Office und Ersatz von Dienst- und Geschäftsreisen durch Videokonferenzen. Potenziale zur Minderung der Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung der Erfahrungen aus der Corona-Krise*. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. <https://www.ifeu.de/publikation/homeoffice-und-ersatz-von-dienst-und-geschaeftsreisen-durch-videokonferenzen>
- Lange, S., & Santarius T. (2020). Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand?. *Ecological Economics*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106760>
- Lange, S., & Santarius, T. (2018). *Smarte grüne Welt? Digitalisierung zwischen Überwachung, Konsum und Nachhaltigkeit*. Oekom. <https://doi.org/10.14512/9783962384449>

- Lange, S., Frick, V., Gossen, M., Pohl, J., Rohde, F., & Santarius, T. (2023). The induction effect: why the rebound effect is only half the story of technology's failure to achieve sustainability. *Frontiers in Sustainability*, 4, 1–14. <https://doi.org/10.3389/frsus.2023.1178089>
- Lange, S., Kern, F., Peuckert, J., & Santarius, T. (2021). The Jevons paradox unravelled: A multi-level typology of rebound effects and mechanisms. *Energy Research & Social Science*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.101982>
- Lange, S., Santarius, T., Dencik, L., Diez, T., Ferreboeuf, H., Hankey, S., Hilbkeck, A., Hilty, L. M., Höjer, M., Kleine, D., Pohl, J., Reisch, L., Ryghauf, M., Schwanen, T., & Staab, P. (2023). *Digital Reset. Redirecting Technologies for the Deep Sustainability Transformation*. Oekom. <https://doi.org/10.14512/9783987262463>
- Larson, W., & Zhao, W. (2017). Telework: Urban Form, Energy Consumption and Greenhouse Gas Implications. *Economic Inquiry*, 55(2), 714–735. <https://doi.org/10.1111/ecin.12399>
- Le, H.T. K., Carrel, A. L., & Shah, H. (2021). Impacts of Online Shopping on Travel Demand: A Systematic Review. *Transport Reviews*, 42(3), 273–95. <https://doi.org/10.1080/01441647.2021.1961917>
- Lell, O., Muster, V., Thorun, C., & Gossen, M. (2020). *Förderung des nachhaltigen Konsums durch digitale Produktinformationen: Bestandsaufnahme und Handlungsempfehlungen*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/foerderung-des-nachhaltigen-konsums-durch-digitale>
- Llorca M., & Jamasb, T. (2017). Energy efficiency and rebound effect in European road freight Transport. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 101, 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.05.002>
- Lema, M. (2024). Managing the e-waste crisis in Africa: A mini-review of policies, practices, technologies and business model innovations. *Waste management & research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*. <https://doi.org/10.1177/0734242X241304321>
- Liu, K., Tan, Q., Yu, J., & Wang, M. (2023). A global perspective on e-waste recycling. *Circular Economy*, 2(1). <https://doi.org/10.1016/j.cec.2023.100028>
- Loorbach, D. (2010). Transition Management for Sustainable Development: A Prescriptive, Complexity-Based Governance Framework. *Governance*, 23(1), 161–83. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0491.2009.01471.x>
- Loorbach, D., Frantzeskaki, N., & Avelino, F. (2017). Sustainability Transitions Research: Transforming Science and Practice for Societal Change. *Annual Review of Environment and Resources*, 42, 599–626. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021340>
- Loose, W. (2016). *Mehr Platz zum Leben – wie Carsharing Städte entlastet. Ergebnisse des bcs-Projektes „CarSharing im innerstädtischen Raum – eine Wirkungsanalyse“*. Endbericht. Bundesverband CarSharing. https://carsharing.de/sites/default/files/uploads/alles_ueber_carsharing/pdf/endbericht_bcs-eigenprojekt_final.pdf
- Loske, R. (2019). Die Doppelsichtigkeit der Sharing Economy. Vorschläge zu ihrer gemeinwohlorientierten Regulierung. WSI Mitteilungen Zeitschrift des Wirtschafts- und Sozialwissenschaften Instituts der Hans-Böckler-Stiftung. <https://doi.org/10.5771/0342-300X-2019-1-64>
- Luan, F., Yang, X., Chen, Y., & Regis, P. J. (2022). Industrial robots and air environment: a moderated mediation model of population density and energy consumption. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 870–888. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.01.015>
- Luccioni, A. S., Strubell, E., & Crawford, K. (2025). From Efficiency Gains to Rebound Effects: The Problem of Jevons' Paradox in AI's Polarized Environmental Debate. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.16548>
- Ludmann, S. (2018). *Ökologie des Teilens. Bilanzierung der Umweltwirkungen des Peer-to-Peer Sharing*. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. http://www.peer-sharing.de/data/peersharing/user_upload/Dateien/Oekologie_des_Teilens_Arbeitspapier_8_.pdf
- Ludmann, S. (2019). Ökologische Betrachtung des Peer-to-Peer Sharing. In S. Behrendt, C. Henseling & G. Scholl (Hrsg.), *Digitale Kultur des Teilens. Mit Sharing nachhaltiger Wirtschaften* (S. 71–93). Springer Gabler.
- Lutter, S., Giljum, S., & Gözet, B. (2016). *Rebound Effekte. Inputpapier für die Implementierung von RESET2020*. Wirtschaftsuniversität Wien. https://www.wu.ac.at/fileadmin/wu/d/i/ecocon/PDF/RESET2020_Rebound_Effekte_Report.pdf

- Maas Alliance. (2022). *Mobility as a Service?*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://maas-alliance.eu/homepage/what-is-maas/>
- Madlener, R. & Alcott, B. (2011). *Herausforderung für eine technisch-ökonomische Entkoppelung von Naturverbrauch und Wirtschaftswachstum. Unter besonderer Berücksichtigung der Systematisierung von Rebound-Effekten und Problemverschiebungen*. Deutscher Bundestag Enquete-Kommission Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität. <https://webarchiv.bundestag.de/archive/2013/0510/bundestag/gremien/enquete/wachstum/gutachten/m17-26-13.pdf>
- Magdolen, M., Chlond, B., Schulz, A., Nobis, C., Jödden, C., Sauer, A., Führer, M., & Frick, R. (2022). *Handlungsoptionen für eine ökologische Gestaltung der Langstreckenmobilität im Personenverkehr. Abschlussbericht*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/handlungsoptionen-fuer-eine-oekologische-gestaltung-0>
- Malmodin, J., & Coroama, V. (2016, 6-9 September). *Assessing ICT's enabling effect through case study extrapolation – the example of Smart-Metering*. [Konferenzbeitrag]. Electronics Goes Green, Berlin, Deutschland.
- Manhart, A., Brommer, E., & Gröger, J. (2011). *E-Book-Reader. Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen. Studie im Rahmen des Projekts „Top 100 – Umweltzeichen für klima-relevante Produkte“*. Öko-Institut. <https://www.oeko.de/oekodoc/1179/2011-037-de.pdf>
- Marasco, A. (2020). Beyond virtual cultural tourism: History-living experiences with cinematic virtual reality. *Tourism & Heritage Journal*, 2, 1–16. <https://doi.org/10.1344/THJ.2020.2.1>
- Marston, S., Li, Z., Bandyopadhyay, S., Zhang, J., & Ghalsasi, A. (2011). Cloud computing - The business perspective. *Decision Support Systems*, 51(1), 176–189. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2010.12.006>
- Martin, E., & Shaheen, S. (2011). The Impact of Carsharing on Public Transit and Non-Motorized Travel: An Exploration of North American Carsharing Survey Data. *Energies*, 4(11), 2094–2114. <https://doi.org/10.3390/en4112094>
- Martin, H., Reck, D., Axhausen, K.W., & Raubal, M. (2021). *ETH Mobility Initiative Project MI-01-19 Empirical use and Impact analysis of MaaS: Ergebnisse*. ETH Zurich. <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/521380/EIM-Abschlussbericht-2021.pdf?sequence=3>
- Marz, W. (2022). *Reduziert mehr Home-Office die Emissionen im Verkehr?*. Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München. <https://www.ifo.de/publikationen/2022/aufsatz-zeitschrift/reduziert-mehr-homeoffice-die-emissionen-im-verkehr>
- Marz, W., & Sen, S. (2021). Does Telecommuting Reduce Commuting Emissions?. CESifo Working Paper, (9357). <http://doi.org/10.2139/ssrn.3945279>
- Masanet, E., Shehabi, A., Ramakrishnan, L., Liang, J., Ma, X., Walker, B., Hendrix, V., & Mantha, P. (2013). *The Energy Efficiency Potential of Cloud Based-Software: A U.S. Case Study*. Lawrence Berkeley National Laboratory. https://crd.lbl.gov/assets/pubs_presos/ACS/cloud_efficiency_study.pdf
- Massié, C., & Belaïd, F. (2024). Estimating the Direct Rebound Effect for Residential Electricity Use in Seventeen European Countries: Short and Long-Run Perspectives. *Energy Economics*, 134, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107571>
- Mataloto, B., Ferreira, J. C., & Resende, R. (2023). Long Term Energy Savings Through User Behavior Modeling in Smart-Homes. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Access*, 11, 44544–44558. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3272888>
- Meadows, D. H. (1999). *Leverage Points - Places to Intervene in a System*. The Sustainability Institute. http://www.donellameadows.org/wp-content/userfiles/Leverage_Points.pdf
- Meinecke, C. (2017). *Potentiale und Grenzen von Smart-Metering. Empirische Wirkungsanalyse eines Feldtests mit privaten Haushalten*. Springer VS.
- Meyer-Aurich, A., Gandorfer, M., Hoffmann, C., Weltzien, C., Bellingrath-Kimura, S., & Floto, H. (2021, 8-9. März). *Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft* [Konferenzbeitrag]. 41 GIL-Jahrestagung, Potsdam, Deutschland.
- Montevecchi, F., Stickler, T., Hintemann, R., & Hinterholzer, S. (2020). *Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market*. European Commission, Directorate General for Communications Networks, Content and Technology. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/bf276684-32bd-11eb-b27b-01aa75ed71a1/language-en>

- Moos, M., Andrey J., & Johnson L. C. (2006). The sustainability of telework: an ecological-footprinting approach. *Sustainability Science Practice and Policy*, 2(1), 3–14. <https://doi.org/10.1080/15487733.2006.11907973>
- Moura, F. T., & Carnicelli-Fihlo, S. (2017). Virtual reality and the decision making process of German senior travelers: A cross-media comparison. In C. Lee, S. Filep, J. N. Albrecht & W. Coetzee (Hrsg.), *CAUTHE 2017: Time For Big Ideas? Re-thinking The Field For Tomorrow*. University of Otago Press. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.849643300162597>
- Müller, A. (2016). The digital nomad: buzzword or research category?. *Transnational Social Review*, 6(3), 344–348. <https://doi.org/10.1080/21931674.2016.1229930>
- Nakanishi H. (2015). Does telework really save energy?. *International Management Review*, 11(2), 89–97.
- Neligan, A., Schleicher, C., Engels, B., & Kroke, T. (2023). *Digitaler Produktpass – Enabler der Circular Economy. Relevanz und Umsetzbarkeit durch Unternehmen*. Institut der deutschen Wirtschaft. https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Report/PDF/2023/IW-Report_2023-Digitaler-Produktpass.pdf
- Neumann, K. (2013). KNOW-WHY Thinking as a New Approach to Systems Thinking. *E:CO Emergence: Complexity and Organization*, 15(3), 81-93.
- Neumann, K., & Grimm, F. (2020). *ICT - Utopia oder Dystopia?*. Consideo. <https://www.consideo.com/files/consideo/pdfs/papers/eng/ConsideoPaper-ICT-Engl.pdf>
- Neumann, K., & Grimm, F. (2022). *Why iMODELER*. Consideo. https://www.consideo.com/files/consideo/pdfs/papers/eng/Why_iMODELER.pdf
- Neumann, K., Grimm, F., Diefenbacher, H., Hirschnitz-Gabers, M., Langsdorf, S., Schipperges, M., & Weiss, D. (2018). *Entwicklung eines quantitativen Modells "Nachhaltiges Deutschland". Band 2: Simulation der Potentiale und Auswirkungen einer Transformation hin zu einer nachhaltigen Gesellschaft*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-eines-quantitativen-modells>
- Neves, S., Marques, A., & De Sá Lopes, L. (2024). Is environmental regulation keeping e-waste under control? Evidence from e-waste exports in the European Union. *Ecological Economics*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.108031>
- Nicholls, L., Strengers, Y., & Tirado, S. (2017). *Smart-Home Control. Exploring the Potential For Off-The-Shelf Enabling Technologies in Energy Vulnerable and Other Households*. Centre for Urban Research. https://www.researchgate.net/publication/319188182_Smart_home_control_Exploring_the_potential_for_off-the-shelf_enabling_technologies_in_energy_vulnerable_and_other_households
- Nleya, S. M., & Mthulisi, V. (2024). Industrial Metaverse: A Comprehensive Review, Environmental Impact, and Challenges. *Applied Sciences*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/app14135736>
- Nobis, C., & Kuhnimhof, T. (2018). *Mobilität in Deutschland –Ergebnisbericht*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/mid-ergebnisbericht.pdf?__blob=publicationFile
- Nokia. (2020). *Nokia confirms 5G as 90 percent more energy efficient*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2020/12/02/nokia-confirms-5g-as-90-percent-more-energy-efficient/>
- Novak, A. (2019). *Platooning-Pilotprojekt: Erste Schritte mit Erfolg, Pulse*, 16.05.2019. Deutsche Bahn. Abgerufen am 2. Mai 2024 von <https://pulse.dbschenker.com/de/platooning-pilotprojekt-erfolgreich/>
- NPM – Nationale Plattform Zukunft der Mobilität. (2019). *Wege zur Erreichung der Klimaziele 2030 im Verkehrssektor. Arbeitsgruppe Klimaschutz im Verkehr. Zwischenbericht*. <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/03/NPM-AG-1-Wege-zur-Erreichung-der-Klimaziele-2030-im-Verkehrssektor.pdf>
- Oehme, R., Scherf, C., Emmerich, J., Emmerich, C., Streif, M., Schade, W., & Knauff, M. (2024): *Digitale Mobilitätsplattformen. Arbeitspaket 1: Analyse und Bestandsaufnahme zu plattformbasierten Mobilitätskonzepten und -angeboten. Zwischenbericht*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/digitale-mobilitaetsplattformen>
- Oh, J. (2020). IoT-Based Smart Plug for Residential Energy Conservation: An Empirical Study Based on 15 Months' Monitoring. *Energies*, 13(15), 1–13. <https://doi.org/10.3390/en13154035>

- OMV. (2021). *Nachhaltigkeitsbericht 2020. Nicht finanzieller Bericht*. <https://omv.online-report.eu/de/nachhaltigkeitsbericht/2020/servicesseiten/downloads/files/entire-omv-sr20.pdf>
- Onat, N. C., Mandouri J., Kucukvar, M., Sen, B., Abbasi, S. A., Alhajyaseen, W., Kutty, A. A., Jabbar, R., Contestabile, M., & Hamouda, A. M. (2023). Rebound Effects Undermine Carbon Footprint Reduction Potential of Autonomous Electric Vehicles. *Nature Communications*, *14*(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41992-2>
- Oracle. (2024). *Was ist ein Transportation Management-System?*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://www.oracle.com/de/scm/logistics/transportation-management/what-is-transportation-management-system/>
- Ouerghemmi, C., Ertz, M., Bouslama, N., & Tandon, U. (2023). The Impact of Virtual Reality (VR) Tour Experience on Tourists' Intention to Visit. *Information*, *14*(10), 1–27. <https://doi.org/10.3390/info14100546>
- Paech, N. (2011). Grünes Wachstum? Vom Fehlschlagen jeglicher Entkoppelungsbemühungen: Ein Trauerspiel in mehreren Akten. In T. Sauer (Hrsg.), *Ökonomie der Nachhaltigkeit. Grundlagen, Indikatoren, Strategien* (S. 161–182). Metropolis.
- Paul, C., Techen, A.-K., Robinson, J. S., & Helming, K. (2019). Rebound effects in agricultural land and soil management: Review and analytical framework. *Journal of Cleaner Production*, *227*, 1054–1067. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.115>
- Peters, A., Sonneberger, M. & Deuschle, J. (2012). *Rebound-Effekte aus sozialwissenschaftlicher Perspektive. Ergebnisse aus Fokusgruppen im Rahmen des REBOUND-Projektes. Working Paper Sustainability and Innovation*. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung. https://www.researchgate.net/publication/254459367_Rebound-Effekte_aus_sozialwissenschaftlicher_Perspektive_Ergebnisse_aus_Fokusgruppen_im_Rahmen_des_REBOUND-Projektes
- Peters, R., Schmietow, B., & Krieger, B. (2022). *Zwischen Hype und Zukunftsthema: Auf dem Weg ins Metaverse? Bestandsaufnahme und Handlungsperspektiven für die Gestaltung des Metaverse*. Institut für Innovation und Technik. <https://www.iit-berlin.de/publikation/zwischen-hype-und-zukunftsthema-auf-dem-weg-ins-metaverse-bestandsaufnahme-und-handlungsperspektiven-fuer-die-gestaltung-des-metaverse/>
- Petersen, M., & van Almsick, R. (2021). Maßnahmen und Anreize zur Senkung von CO₂-Emissionen - Wie kleine Transportdienstleister und ihre Auftraggeber einem klimafreundlichen Straßengüterverkehr näherkommen können. *Industrie 4.0 Management*, *41-44*. https://doi.org/10.30844/I40M_22-1_41-44
- Petschow, U., Ferdinand, J.-P., Dickel, S., Flämig, H., Steinfeldt, M., & Worobei, A. (2014). *Dezentrale Produktion, 3D-Druck und Nachhaltigkeit. Trajektorien und Potenziale innovativer Wertschöpfungsmuster zwischen Maker-Bewegung und Industrie 4.0*. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung. https://www.ioew.de/publikation/dezentrale_production_3d_druck_und_nachhaltigkeit
- Peuckert, J., & Pentzien, J. (2019). Nachhaltige Governance des Peer-to-Peer Sharing. In S. Behrendt, C. Henseling & G. Scholl (Hrsg.), *Digitale Kultur des Teilens. Mit Sharing nachhaltiger Wirtschaften* (S. 177–211). Springer Gabler.
- Peuckert, J., Gossen, M., & Scholl, G. (2017). *Kontexte des Teilens: Herausforderungen bei der gesellschaftlichen Verankerung von Peer-to-Peer Sharing am Beispiel von Übernachten und Autoteilen*. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung. https://www.ioew.de/publikation/kontexte_des_teilens
- Pfaffenbichler, P. (2018). *Umweltbelastung und Ressourcenverbrauch als mögliche Auswirkung der zunehmenden Nutzung des Onlinehandels durch die EinwohnerInnen der Stadt Wien*. Technische Universität Wien. <https://wua-wien.at/images/stories/publikationen/uranos-endbericht.pdf>
- Pflanzenforschung. (o.J.). Präzisionslandwirtschaft („Precision Farming“). Abgerufen am 27. März 2025 von <https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/lexikon-a-z/praezisionslandwirtschaft-precision-farming-983>
- Piétron, D., Hofmann, F., & Jaeger-Erben, M. (2023). *Die digitale Circular Economy. Zirkuläre Daten-Governance für eine Ressourcennutzung von der Wiege zur Wiege. Begleitstudie zur Fachgesprächsreihe „Digitalisierung und zirkuläre Wertschöpfung“ im Auftrag der Friedrich-Ebert-Stiftung und der Cradle to Cradle NGO*. Friedrich-Ebert-Stiftung. <https://library.fes.de/pdf-files/a-p-b/20544.pdf>
- Plattform Industrie 4.0. (2020): *Nachhaltige Produktion: Mit Industrie 4.0 die Ökologische Transformation aktiv gestalten. Impulspapier der Task Force Nachhaltigkeit*. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/industrie-4-0-nachhaltige-produktion.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Plattform Industrie 4.0. (2021). *Thesenpapier - Industrie 4.0 und Nachhaltigkeit. Zehn Thesen, wie digitale Geschäftsmodelle Nachhaltigkeit in der Industrie 4.0 fördern.*

https://www.researchgate.net/publication/358044801_Zehn_Thesen_wie_digitale_Geschäftsmodelle_Nachhaltigkeit_in_der_Industrie_40_fordern

Pohl, J., Frick, V., Hoefner, A., Santarius, T., & Finkbeiner, M. (2021). Environmental saving potentials of a Smart-Home system from a life cycle perspective: how green is the Smart-Home? *Journal of Cleaner Production*, 312, 1–12.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127845>

Pyrko, J. (2011, 06.-11. Juni). *“Am I as smart as my Smart-Metering is?” – Swedish experience of statistics feedback to households* [Konferenzbeitrag]. eceee 2011 Summer Study - Energy efficiency first: The foundation of a low-carbon society. Conference proceedings, Belambra Presqu’île de Giens, Frankreich.

Quack, D., Liu, R., & Gröger, J. (2019): *Smart-Home – Energieverbrauch und Einsparpotenzial der intelligenten Geräte*. Öko-Institut. <https://www.oeko.de/publikation/smart-home-energieverbrauch-und-einsparpotenzial-der-intelligenten-geraete/>

Raimund, W. (2023). *Rebound-Effekte in der Mobilität, Kurzstudie im Rahmen des Projekts „Nachhaltige Mobilitätswende“*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/dp178.pdf>

Ramesohl, S., Berg, H., & Wirtz, J. (2022). *Circular Economy und Digitalisierung – Strategien für die digital-ökologische Industrietransformation. Studie im Rahmen des Projekts „Shaping the Digital Transformation“*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7899/file/7899_Circular_Economy.pdf

Raw, G., & Ross, D. (2011). *Energy Demand Research Project: Final Analysis*. AECOM.

https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/2011/06/energy-demand-research-project-final-analysis_0.pdf

Rehm, T., Schneiders, T., Strohm, C., & Deimel, M. (2018, 17.18. Mai). *Smart-Home field test – investigation of heating energy savings in residential buildings* [Konferenzbeitrag]. 7th International Energy and Sustainability Conference (IESC), Köln, Deutschland.

Reichel, C., Pascher, P., Scholz, R. W., Berger, G., Brunsch, R., Strobel-Unbehaun, T., Tölle-Nolting, C., Rogga, S., & Zscheischler, J. (2021). Agrarökologische Auswirkungen der Digitalisierung. Supplementarische Information (SI 4.1) zum Kapitel 4: Landwirtschaft, Digitalisierung und digitale Daten. In R. W. Scholz, M. Beckedahl, S. Noller & O. Renn (Hrsg.): *DiDaT Weißbuch. Verantwortungsvoller Umgang mit digitalen Daten – Orientierungen eines transdisziplinären Prozesses*. Nomos. <https://doi.org/10.5771/9783748912125-SI4-1>

Rengelshausen, O., & Schmeißer, D. R. (2007). Touristik 2.0.: Chancen und Risiken von User Generated Content für den Online-Reisevertrieb. *Planung & Analyse: Zeitschrift für Marktforschung und Marketing*, 58-61.

Renner, S., Jamek, A., Baumann, M., & Urban, M. (2012). *Smart-Metering. Die Auswirkungen auf das Energieverbrauchsverhalten*. Österreichische Energieagentur. <https://energieforschung.at/wp-content/uploads/sites/11/2020/12/Endbericht-final-2.pdf>

Riva, G., Wiederhold, B. K., & Villani, D. (2023). Toward a Humane Metaverse: Challenges and Opportunities. *Cyberpsychology, Behavior and Social Networking*, 27(1), 3–8. <https://doi.org/10.1089/cyber.2023.29303.editorial>

Robison, K. (2023). *Meta exec says ‘the metaverse hype is dead and he’s happy: ‘Now we can put our heads down to build’*. Abgerufen am 25. März 2025 von <https://fortune.com/2023/07/11/meta-vp-vishal-shah-happy-metaverse-hype-is-dead/>

Rodden, T., Azapagic, A., Bardell, A., Basiri, A., Chessell, M., Dawn, D., Furber, S., Ramchurn, S., Roberts, S., Vallor, S., & Weldemariam, K. (2025). *Engineering Responsible AI: foundations for environmentally sustainable AI*. Royal Academy of Engineering, The Chartered Institute for IT, The Institution of Engineering and Technology. <https://nepc.raeng.org.uk/media/2aggau2j/foundations-for-sustainable-ai-nepc-report.pdf>

Rohde, F., Wagner, J., Reinhard, P., Petschow, U., Meyer, A., Voß, M., & Mollen, A. (2021). *Nachhaltigkeitskriterien für künstliche Intelligenz. Entwicklung eines Kriterien- und Indikatorensets für die Nachhaltigkeitsbewertung von KI-Systemen entlang des Lebenszyklus*. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung. https://www.ioew.de/publikation/nachhaltigkeitskriterien_fuer_kuenstliche_intelligenz

Roth, K. W., Rhodes, T., & Ponoum, R. (2008, 19-22. Mai). *The energy and greenhouse gas emission impacts of telecommuting in the US* [Konferenzbeitrag]. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, San Francisco, USA.

- Rüger, H., Stawarz, N., Skora, T., & Jaszlovsky, V. (2021). Verändertes Pendelverhalten durch mehr Home-Office? Mögliche Auswirkungen infolge der Corona-Pandemie. *Bevölkerungsforschung Aktuell*, 3-7.
- Rühlin, V., Del Duce, A., & Scherrer, M. (2023). The Impact of Spatial Aspects on the Supply Chain and Mobility Demand of Pharmaceutical Products in E-Commerce and Brick-and-Mortar Shopping. *Sustainability*, 15(14).
<https://doi.org/10.3390/su151411058>
- RW Digital. (2024). *How Much Energy Do Google Search and ChatGPT Use?*. Abgerufen am 25. März von
<https://www.rwdigital.ca/blog/how-much-energy-do-google-search-and-chatgpt-use/>
- Sangeeta, P., Gulia, P., Gill, N. S., & Chatterjee, J. M. (2023). Metaverse and Its Impact on Climate Change. In A. E. Hassani, A. Darwish & M. Torky (Hrsg.), *The Future of Metaverse in the Virtual Era and Physical World*. Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-29132-6_12
- Santarius, T. (2012). *Der Rebound-Effekt. Über die unerwünschten Folgen der erwünschten Energieeffizienz* Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/4219/file/impw5.pdf>
- Santarius, T. (2016). Investigating Meso-Economic Rebound Effects: Production-Side Effects and Feedback Loops between the Micro and Macro Level. *Journal of Cleaner Production*, 134, 406–413. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.055>
- Schebek, L., Kannengießer, J., Campitelli, A., Fischer, J., Eberhard, A., Bauerdick, C., Anderl, R., Haag, S., Sauer, A., Mandel, J., Lucke, D., Bogdanov, I., Nuffer, A.-K., Steinhilper, R., Böhner, J., Lothes, G., Schock, C., Zühlke, D., Plociennik, C., & Bergweiler, S. (2017). *Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes*. VDI Zentrum Ressourceneffizienz. <https://www.ressource-deutschland.de/service/publikationen/detailseite/studie-industrie-40/>
- Semmling, E., Peters, A., Marth, H., Kahlenborn, W., & de Haan, P. (2015). *Rebound-Effekte: Wie können sie effektiv begrenzt werden? Ein Handbuch für die umweltpolitische Praxis*. Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/rebound-effekte-wie-koennen-sie-effektiv-begrenzt>
- Schleich, J., Faure, C., & Klobasa, M. (2017). Persistence of the effects of providing feedback alongside smart metering devices on household electricity demand. *Energy Policy*, 107, 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.05.002>
- Schmidt, C. M. (2023). *Digitainability. Digitale Schlüsseltechnologien für ökologisch nachhaltiges Wirtschaften: Marktpotenziale und strategische Implikationen*. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.
<https://www.acatech.de/publikation/digitainability-digitale-schluesselechnologien-fuer-oekologisch-nachhaltiges-wirtschaften-marktpotenziale-und-strategische-implikationen/>
- Schneider, C., Mrogenda, K., & Davis, M. (2023). *Digitalisierung im Naturschutz. Potenziale, Risiken und Lösungsansätze*. Bundesamt für Naturschutz. <https://www.bfn.de/aktuelles/digitalisierung-im-naturschutz-potenziale-und-risiken-0>
- Schneiders, T., Rhem, T., & Hilger, L. (2018). *Forschungsstudie SmartHome Rösrath. Feldtest in 120 Haushalten zur Untersuchung von Heizenergieeinsparungen in Bestandsgebäuden*. Technische Hochschule Köln. <https://smart-energy-nrw.web.th-koeln.de/policy-brief-nr-2-forschungsstudie-smarhome-roesrath/>
- Scholl, G., Behrendt, S., Flick, C., Gossen, M., Henseling, C., & Richter, L. (2015). *Peer-to-Peer Sharing. Definition und Bestandsaufnahme*. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Institut für Energie- und Umweltforschung. https://www.peer-sharing.de/data/peersharing/user_upload/Dateien/PeerSharing_Ergebnispapier.pdf
- Scholl, G., Gossen, M., & Holzhauser, B. (2017). *Teilen digital - Verbreitung, Zielgruppen und Potenziale des Peer-to-Peer Sharing in Deutschland. Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsbefragung*. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Institut für Energie- und Umweltforschung. http://www.peer-sharing.de/data/peersharing/user_upload/PeerSharing_Brosch%C3%BCre_Teilen_digital.pdf
- Schramm, S. (2020). *Effekte der COVID-19-Pandemie auf berufsbedingten Verkehr, geschäftliche Meetings, Home-Office und Klimabilanz. Literatúrauswertung zum Lock-Down Mitte März bis Mitte Mai 2020*. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. <https://www.borderstep.de/publikation/schramm-s-2020-effekte-der-covid-19-pandemie-auf-berufsbedingten-verkehr-geschaeftliche-meetings-home-office-und-klimabilanz-cliditrans-werkstattbericht-borderstep-berlin/>
- Schuh, G., Schmitz, S., Maetschke, J., & Welsing, M. (2023): Die digitale Produktakte als zentrales Element zirkulärer Wertschöpfung. In B. Fesidis, S. A. Röß & S. Rummel (Hrsg.), *Mit Digitalisierung und Nachhaltigkeit zum klimaneutralen*

- Unternehmen. *Strategische Frameworks und Best-Practise-Beispiele*. Springer Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42485-5_10
- Schulze-Quester, M. (2021). Megatrend Nachhaltigkeit – Herausforderungen und Lösungsansätze durch digitale Managementstrategien. In M. Bodemann, W. Fellner & J. Just (Hrsg.), *Zukunftsfähigkeit durch Innovation, Digitalisierung und Technologien. Geschäftsmodelle und Unternehmenspraxis im Wandel*. Springer Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-662-62148-6_2
- Schwartz, R., Dodge, J., Smith, N. A., & Etzioni, O. (2020). Green AI. *Communications of the ACM*, 63(12), 54–63. <https://doi.org/10.1145/3381831>
- Seebauer, S., Fruhmann, C., Kulmer, V., Soteropoulos, A., Berger, M., Getzner, M., & Böhm, M. (2018). *Dynamik und Prävention von Rebound-Effekten bei Mobilitätsinnovationen. Bericht an das BMVIT im Rahmen des Programms Mobilität der Zukunft*. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. https://projekte.ffg.at/anhang/5bc98d97c48b5_Rebound-Endbericht_final.pdf
- Shehabi, A., Walker, B., & Masanet, E. (2014). The energy and greenhouse-gas implications of internet video streaming in the United States. *Environmental Research Letters*, 9(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/054007>
- Shi, Y., Sorrell, S., & Foxon, T. (2023). The impact of teleworking on domestic energy use and carbon emissions: An assessment for England. *Energy and Buildings*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112996>
- Siikavirta, H., Punakivi, M., Kärkkäinen, M., & Linnanen, L. (2008). Effects of E-Commerce on Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of Grocery Home Delivery in Finland. *Journal of Industrial Ecology*, 6(2), 83–97. <https://doi.org/10.1162/108819802763471807>
- Silva, J.A., & Melo, P. (2017). The effects of home-based telework on household total travel: A path analysis approach of British households. *Transportation Research Procedia*, 27(1), 832–840. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.085>
- Simonis, U. E. (2001). Stichwort Umweltpolitik. Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung WZB Discussion Paper, 1-403.
- Sorell, S., & Dimitropoulos, J. (2008). The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions. *Ecological Economics*, 65(3), 636–649. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.08.013>
- Sorrell, S. (2009). Jevons' Paradox Revisited: The Evidence for Backfire from Improved Energy Efficiency. *Energy Policy*, 37(4), 1456–1469. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.12.003>
- Stahl, H. (2013). *3D-Printings – Risks and Opportunities*. Ökoinstitut e.V. <https://www.oeko.de/publikation/3d-printing-risks-and-opportunities/>
- Statista. (2021). *Wie werden die Medien in Deutschland genutzt?*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://de.statista.com/themen/101/medien/#topicOverview>
- Statista. (2024a): *CO₂-Emissionen der Personenkraftwagen in privaten Haushalten in Deutschland in ausgewählten Jahren von 2005 bis 2020*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/484072/umfrage/co2-emissionen-pkw-in-privaten-haushalten-in-deutschland/>
- Statista. (2024b). *E-Commerce in Deutschland: Daten und Fakten zum boomenden Online-Geschäft*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://de.statista.com/themen/247/e-commerce/>
- Statista. (2024c). *Lesen Sie zumindest hin und wieder gedruckte Bücher oder E-Books?*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/277971/umfrage/nutzung-von-buechern-und-e-books-deutschland/>
- Stavins, R. N. (2002). Experience with Market-Based Environmental Policy Instruments. *Handbook of Environmental Economics*, 1, 335–435. [https://doi.org/10.1016/S1574-0099\(03\)01014-3](https://doi.org/10.1016/S1574-0099(03)01014-3)
- Stechemesser, A., Koch, N., Mark, E., Dilger, E., Klösel, P., Menicacci, L., Nachtigall, D., Pretis, F., Ritter, N., Schwarz, M. P., Vossen, H., & Wenzel, A. (2024). Climate policies that achieved major emission reductions: Global evidence from two decades. *Science*, 385(6711), 884–892. <https://doi.org/10.1126/science.adl6547>
- Stede, J., Treperman, J., Iglauer, T., Nemeč, B., Geilhardt, G., Garber, H., Sosa, A., Lautermann, C., Schöplin, P., Schmelzle, F., Blum, H., Wehde, L., & Nosova, M. (2024). *Metastudie „Nachhaltigkeitseffekte der Digitalisierung“ Eine Auswertung aktueller Studien zur (quantitativen) Bemessung der Umwelteffekte durch die Digitalisierung*. Technopolis Deutschland,

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung.

https://www.ioew.de/publikation/metastudie_nachhaltigkeitseffekte_der_digitalisierung

Steiner, M. (2018). *Ermittlung der ökologischen Umweltwirkungen eines 3D-Druckers und damit zusammenhängender Produktionsprozesse*. [Diplomarbeit, Technische Universität Wien]. reposiTUm.

<https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/7243>

Stiles, J., & Smart, M. J. (2021). Working at home and elsewhere: daily work location, telework, and travel among United States knowledge workers. *Transportation*, *48*, 2461–2491. <https://doi.org/10.1007/s11116-020-10136-6>

Stobbe, L., Proske, M., Zedel, H., Hintemann, R., Clausen, J., & Beucker, S. (2015). *Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland*. Fraunhofer IZM, Borderstep Insitut für Innovation und Nachhaltigkeit.

<https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/8261de62-6988-4ff1-b730-ea21a3661cae>

Stobbe, L., Richter, N., Quaeck, M., Knüfermann, K., Druschke, J., Fahland, M., Höller, V. W., Werner, N., Zedel, H., Kaiser, M., Hoffmann, S., Töpfer, M., & Nissen, N. (2023). *Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland, Projekt UTAMO*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltbezogene-technikfolgenabschaetzung-mobilfunk>

Stoll, C., Gallersdörfer, U., & Klaaßen, L. (2022). Climate Impacts of the Metaverse. *Joule*, *6*(12) 2663–2673.

<https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.10.013>

Storme, T., De Vos, J., De Paepe, L., & Witlox, F. (2020). Limitations to the car-substitution effect of MaaS. Findings from a Belgian pilot study. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *131*, 196–205.

<https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.09.032>

Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2019, 28. Juli-2. August). *Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP* [Konferenzbeitrag]. Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, Florenz, Italien.

Stüve, L. (2024, 23. Januar). Wie das Online-Shopping Unsere Innenstädte verändert. *FOCUS Online*.

https://www.focus.de/finanzen/news/branche-waechst-stets-weiter-wie-online-shopping-die-staedte-veraendert_id_259597062.html

Sühlmann-Faul, F., & Rammler, S. (2018). *Der blinde Fleck der Digitalisierung. Wie sich Nachhaltigkeit und digitale Transformation im Einklang bringen lassen*. Oekom verlag.

Tabata, T., & Wang, T. Y. (2021). Life Cycle Assessment of CO₂ Emissions of Online Music and Videos Streaming in Japan. *Applied Sciences*, *11*(9). <https://doi.org/10.3390/app11093992>

Thiesen, J., Christensen, T.S., Kristensen T.G., Andersen, R.D., Brunoe, B., Gregersen, T.K., Thrane, M., & Weidema, B.P. (2008). Rebound effects of price differences. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *13*(2), 104–114.

<https://doi.org/10.1065/lca2006.12.297>

Töller, A. E. (2013). The Rise and Fall of Voluntary Agreements in German Environmental Policy. *German Policy Studies*, *9*(2), 49-92.

Tussyadiah, I. P., & Pesonen, J. (2015). Impacts of Peer-to-Peer Accomodation Use on Travel Patterns. *Journal of Travel Research*, *55*(8), 1022–1040. <https://doi.org/10.1177/0047287515608505>

UBA – Umweltbundesamt. (2013). *Quantencomputing als nächste Computergeneration*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://www.umweltbundesamt.de/quantencomputing-als-naechste-computergeneration>

UBA – Umweltbundesamt. (2020). *Gemeinsame Pressemitteilung von Bundesumweltministerium und Umweltbundesamt. Video-Streaming: Art der Datenübertragung entscheidend für Klimabilanz. Videoübertragung über Glasfaser fast 50-mal effizienter als über UMTS*. Abgerufen am 27. März 2025 von

<https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/video-streaming-art-der-datenuebertragung>

UBA – Umweltbundesamt. (2022). *Digitale Dienste / Cloud Computing*. Abgerufen am 27. März 2025 von

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/digitalisierung/gruene-informationstechnik-green-it/digitale-dienste-cloud-computing#forschungsprojekt-zur-ermittlung-der-umweltwirkungen-des-cloud-computings>

UBA – Umweltbundesamt. (2023a). *Alternativen zum Neukauf: secondhand, teilen, tauschen und leihen spart Geld und schont die Umwelt*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/uebergreifende-tipps/secondhand-teilen-tauschen-leihen#so-konnen-sie-neukaufe-vermeiden>

UBA – Umweltbundesamt. (2023b). *Energieeffizienzgesetz birgt Chancen für Rechenzentren und IT*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/energieeffizienzgesetz-birgt-chancen-fuer>

United States Congress. (2024). *Artificial Intelligence Environmental Impacts Act of 2024*. Abgerufen am 25. März von <https://www.congress.gov/bill/118th-congress/senate-bill/3732/text#:~:text=%282%29%20Accelerating%20use%20of,and%20operating%20artificial%20intelligence>

van Dam, S.S., Bakker, C.A., & van Hal, J.D.M (2010). Home energy monitors: impact over the medium-term. *Building Research & Information*, 38(5), 458–469. <https://doi.org/10.1080/09613218.2010.494832>

VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2022). *Agriculture Technology 2030. Strategische Forschungsagenda. Teil 1: Nachhaltige Pflanzenproduktion. VDI Roadmap*. <https://bauernzeitung.at/wp-content/uploads/2022/03/VDI-Roadmap-1.pdf>

Vihl, I., Docke, J., Poferl, P., Bütow, K., Vötsch, M., Schnabel, S., & Theis, S. (2021). Factsheet Augmented Reality & Virtual Reality. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fs_1_augmented_reality_virtual_reality_210727_bf.pdf

Vinuesa, R., Azizpour, H., Leite, I., Balaam, M., Dignum, V., Domisch, S., Felländer, A., Langhans, S. D., Tegmark, M., & Fuso Nerini, F. (2020). The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14108-y>

Vlăduțescu, S., & Stănescu, G. C. (2023). Environmental Sustainability of Metaverse: Perspectives from Romanian Developers. *Sustainability*, 15(15). <https://doi.org/10.3390/su151511704>

Vodafone. (2019). *5G braucht deutlich weniger Strom*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://www.teltarif.de/5g-4g-technik-stromverbrauch-mackvodafone/news/79091.html>

Von Geibler, J. & Gnanko, T. (2022). *Nachhaltige Konsumententscheidungen durch Künstliche Intelligenz und den Digitalen Produktpass Forschungsbericht zum Roadmapping der Forschungslinie "Transparente Wertschöpfungsketten" im CO:DINA Projekt*. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. https://codina-transformation.de/wp-content/uploads/Forschungsbericht_Nachhaltige-Konsumententscheidungen-durch-Ku%CC%88nstliche-Intelligenz-und-den-Digitalen-Produktpass.pdf

Walnum, H. J., & Andrae, A. S. G. (2016). The Internet: Explaining ICT Service Demand in Light of Cloud Computing Technologies. In T. Santarius, H. J. & C. Aall (Hrsg.), *Rethinking Climate and Energy Policies: New Perspectives on the Rebound Phenomenon*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38807-6_13

Walter, A., Finger, R., Huber, R., & Buchmann, N. (2017). Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(24), 6148–6150. <https://doi.org/10.1073/pnas.1707462114>

Walzberg, J., Dandres, T., Samson, R., Merveille, N., & Cheriet, M. (2017, 8.-13. Oktober). *An agent-based model to evaluate Smart-Homes sustainability potential* [Konferenzbeitrag]. IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Montreal, Kanada.

Weber, C., Goomey, J., & Matthews, S. (2011). The Energy and Climate Change Implications of Different Music Delivery Methods. *Journal of Industrial Ecology*, 14(5), 754–769. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00269.x>

Weber, U., & Grosser, H. (2019). *Digital Twins. Leading the Way to Tomorrow's Ecosystems*. Detecon International. https://www.detecon.com/drupal/sites/default/files/2021-03/ST_DigitalTwins_V1_EN_251119.pdf

Webex. (o.J.). *Was sind Videokonferenzen?*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://www.webex.com/de/what-is-video-conferencing.html#:~:text=Ihr%20Unternehmen%20finden-,Definition%20Videokonferenz,Live%2DVideo%20und%20Ton%20zusammenzubringen>

Wei, W., Qi, R., & Zhang, L. (2019). Effects of virtual reality on theme park visitors' experience and behaviors: A presence perspective. *Tourism Management*, 71(2), 282–293. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2018.10.024>

- Weller von Ahlefeld, P. J. (2019). Rebound Effekte in der Präzisionslandwirtschaft - ein Kommentar. *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft*, 97(3). <https://doi.org/10.12767/buel.v97i3.247>
- Wernbacher, T., Helin, J., Pfeiffer, A., & Dingli, A. (2023). Das Metaverse aus technischer, soziologischer und ökologischer Sicht: Chancen und Herausforderungen im Kontext der Medienbildung. *Materialität(en) und Medienbildung*, 61(2). <https://doi.org/10.21243/mi-02-23-14>
- Wikipedia. (2024). *Navigationssystem*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Navigationssystem>
- Wirtschaft digital BW (o.J.). *Autonomes Fahren. Die intelligente Art der Fortbewegung*. Abgerufen am 27. März 2025 von <https://www.wirtschaft-digital-bw.de/aktuelles/thema-des-monats/autonomes-fahren>
- Witt, E., & Anton, C. (2020). *Additive Fertigung – Entwicklungen, Möglichkeiten und Herausforderungen*. Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V., Deutsche Akademie der Technikwissenschaftler, Union der deutschen Akademien der Wissenschaftler e.V. <https://www.leopoldina.org/publikationen/detailansicht/publication/additive-fertigung-entwicklungen-moeglichkeiten-und-herausforderungen-2020/>
- Wohlschlager, D., Ostermayer, M., Köppl, S., & Regett, A. (2020, 12.-14. Februar). *Ökologische Bewertung digitaler Energieinfrastruktur* [Konferenzbeitrag]. 16. Symposium Energieinnovation (EnInnov), Graz, Österreich.
- Wolff, F., Gensch, C.-O., Kampffmeyer, N., Schöpflin, P., Lautermann, C., Gebauer, J., Schalteffer, S., Norris, S., Wüst, S., Thiel, D., & Buda, F. (2023). *Rebound-Effekte. Management und Vermeidung Leitfaden für Unternehmen. Handreichung im Rahmen des Projektes „Ganzheitliches Management von Energie- und Ressourceneffizienz in Unternehmen“ (MERU)*. Öko-Institut, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Center for Sustainability Management der Leuphana Universität, Data Center Group, B.A.U.M. https://www.ioew.de/fileadmin/user_upload/BILDER_und_Downloaddateien/Publikationen/MERU_2023_Rebound-Effekte.pdf
- Wurm, D., Zielinski, O., Lübben, N., Jansen, M., & Ramesohl, S. (2021). *Wege in eine ökologische Machine Economy. Wir brauchen eine „Grüne Governance der Machine Economy“, um das Zusammenspiel von Internet of Things, Künstlicher Intelligenz und Distributed Ledger Technology ökologisch zu gestalten*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7828/file/WR22.pdf>
- Yin, H., Qu, Y., & Guo, L. (2023). Critical factors for implementing collection target responsibility in e-waste collection in China: A DEMATEL-ISM analysis. *Waste management*, 172, 278-289. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.10.041>
- Zeng, W., Miwa, T., & Morikawa, T. (2016). Prediction of vehicle CO2 emission and its application to eco-routing navigation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 68, 194–214. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.04.007>
- Zhao, N., & You, F. (2023). The growing metaverse sector can reduce greenhouse gas emissions by 10 Gt CO2e in the United States by 2050. *Energy & Environmental Science*, 16(6). <https://doi.org/10.1039/D3EE00081H>
- Zielinski, O., & Lübben, N. (2022). *Umweltbelastungen in aufsteigenden Trends der KI*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. <https://codina-transformation.de/wp-content/uploads/Umweltbelastungen-in-aufsteigenden-Trends-der-KI-.pdf>
- Zimmermann, H., & Frank, D. (2019). *Künstliche Intelligenz für die Energiewende: Chancen und Risiken*. Germanwatch. <https://www.germanwatch.org/sites/default/files/K%C3%BCnstliche%20Intelligenz%20f%C3%BCr%20die%20Energiewende%20-%20Chancen%20und%20Risiken.pdf>
- Zimmermann, T., Hauschke, F., Memelink, R., Reitz, A., Pelke, N., John, R., Eberie, U., & Ninnemann, J. (2021). *Die Ökologisierung des Onlinehandels. Neue Herausforderungen für die umweltpolitische Förderung eines nachhaltigen Konsums. Teilbericht II*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. https://www.researchgate.net/publication/362092530_Die_Ökologisierung_des_Onlinehandels_Neue_Herausforderungen_für_die_umweltpolitische_Förderung_eines_nachhaltigen_Konsums_-_Teilbericht_II
- Zimmermann, T., Memelink, R., Rödiger, L., Reitz, A., Pelke, N., John, R., & Eberie, U. (2020). *Die Ökologisierung des Onlinehandels. Neue Herausforderungen für die umweltpolitische Förderung eines nachhaltigen Konsums. Teilbericht I*. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_03_texte_227-2020_online-handel.pdf