

Februar 2024

Metastudie „Nachhaltigkeits- effekte der Digitalisierung“

Eine Auswertung aktueller Studien zur
(quantitativen) Bemessung der
Umwelteffekte durch die Digitalisierung

Endbericht

Februar 2024

Metastudie „Nachhaltigkeitseffekte der Digitalisierung“

Eine Auswertung aktueller Studien zur (quantitativen) Bemessung der Umwelteffekte durch die Digitalisierung

Technopolis: Dr. Jan Stede, Jérôme Treperman, Theresa Iglauer, Bruno Nemeč, Götz Geilhardt, Helen Garber, Ariel Araujo Sosa; IÖW: Dr. Christian Lautermann, Patrick Schöpflin, Frieder Schmelzle, Hannes Bluhm, Lucas Wehde, Melissa Nosova

Impressum

Autor*innen:

Technopolis:

Dr. Jan Stede, Jérôme Treperman, Theresa Iglauer, Bruno Nemeč, Götz Geilhardt, Helen Garber, Ariel Araujo Sosa

IÖW:

Dr. Christian Lautermann, Patrick Schöpflin, Frieder Schmelzle, Hannes Bluhm, Lucas Wehde, Melissa Nosova

Der vorliegende Bericht beinhaltet die Forschungsergebnisse aus dem Projekt „Metastudie Nachhaltigkeitseffekte der Digitalisierung“. Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) beauftragt und ist von Technopolis Deutschland und dem Institut für ökologische Wirtschaftsforschung durchgeführt worden.

BEAUFTRAGT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Kontakt:

Technopolis

Dr. Jan Stede

Technopolis Deutschland GmbH

Scharnweberstr. 30
10247 Berlin

jan.stede@technopolis-group.com

www.technopolis-group.com

IÖW

Dr. Christian Lautermann

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) GmbH, gemeinnützig

Potsdamer Str. 105
D-10785 Berlin

christian.lautermann@ioew.de

www.ioew.de

Zitiervorschlag:

Technopolis & IÖW (Hrsg.) (2024): Metastudie „Nachhaltigkeitseffekte der Digitalisierung“. Eine Auswertung aktueller Studien zur (quantitativen) Bemessung der Umwelteffekte durch die Digitalisierung, Berlin

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
1 Einleitung	1
2 Methodisches Vorgehen	2
3 Analyse der Themenfelder	5
3.1 Energiesysteme	5
3.2 Klimaschutz und -anpassung	18
3.3 Stadtentwicklung und urbane Mobilität	27
3.4 Kreislaufwirtschaft	41
3.5 Nachhaltiges Wirtschaften	49
3.6 Ressourcennutzung	57
3.7 Primärwirtschaft und BioTech-Verfahren	61
3.8 Forschungsinfrastrukturen	70
4 Handlungsempfehlungen: Implikationen für Forschung und Forschungsförderung aus Themenfeldern, Clustern und Fokusgruppen	75
4.1 Vernachlässigte Themen(felder) adressieren	75
4.2 Den Forschungsfokus in fünf Perspektiven neu ausrichten	75
4.3 Implikationen für Forschungsmethoden und -designs	77
5 Fazit	79
Referenzen	81
Anhang A Methodisches Vorgehen	90
A.1 Systematische Literaturrecherche	90
A.2 Ergebnisse der Literaturrecherche	91
A.3 Systematische Literaturanalyse	94
A.4 Fokusgruppen	96

Tabellen

Tabelle 1	Digitale Schlüsseltechnologien für Nachhaltigkeit _____	iii
Tabelle 2	Umwelteffekte von Digitalisierung – Terminologie _____	4
Tabelle 3	Digitale Schlüsseltechnologien im Themenfeld Energiesysteme _____	5
Tabelle 4	Ausgewählte Studien für das Themenfeld Energiesysteme _____	8
Tabelle 5	Direkte und indirekte Effekte im Cluster Smart Grids (mit Anzahl der Studien in Klammern) _____	12
Tabelle 6	Digitale Schlüsseltechnologien im Cluster Smart Buildings _____	14
Tabelle 7	Direkte und indirekte Effekte im Cluster Smart Buildings _____	16
Tabelle 8	Digitale Schlüsseltechnologien im Themenfeld Klimaschutz und Klimaanpassung _____	19
Tabelle 9	Ausgewählte Studien für das Themenfeld Klimaschutz und -anpassung _____	23
Tabelle 10	Digitale Schlüsseltechnologien im Themenfeld Stadtentwicklung und urbane Mobilität _____	28
Tabelle 11	Ausgewählte Studien für das Themenfeld Stadtentwicklung und urbane Mobilität _____	30
Tabelle 12	Direkte und indirekte Effekte im Cluster Smart City _____	34
Tabelle 13	Digitale Schlüsseltechnologien im Cluster Smart Mobility _____	36
Tabelle 14	Direkte und indirekte Effekte im Cluster Smart Mobility _____	38
Tabelle 15	Digitale Schlüsseltechnologien im Themenfeld Kreislaufwirtschaft _____	42
Tabelle 16	Ausgewählte Studien für das Themenfeld Kreislaufwirtschaft _____	45
Tabelle 17	Digitale Schlüsseltechnologien im Themenfeld Nachhaltiges Wirtschaften _____	50
Tabelle 18	Ausgewählte Studien für das Themenfeld Nachhaltiges Wirtschaften _____	52
Tabelle 19	Digitale Schlüsseltechnologien im Cluster Smart Factory _____	54
Tabelle 20	Direkte und indirekte Effekte im Cluster Smart Factory _____	55
Tabelle 21	Ausgewählte Studien für das Themenfeld Ressourcennutzung _____	59
Tabelle 22	Digitale Schlüsseltechnologien im Themenfeld Primärwirtschaft _____	62
Tabelle 23	Ausgewählte Studien für das Themenfeld Primärwirtschaft und BioTech-Verfahren _____	65
Tabelle 24	Umweltauswirkungen der Landwirtschaft _____	66
Tabelle 25	Methodik und geographische Region der Studien im Cluster Smart Agriculture _____	67
Tabelle 26	Studienlage nach digitalen Schlüsseltechnologien _____	67
Tabelle 27	Direkte und indirekte Effekte im Cluster Smart Agriculture _____	68
Tabelle 28	Digitale Schlüsseltechnologien im Themenfeld Forschungsinfrastruktur _____	71
Tabelle 29	Kriterien für die Relevanzbewertung _____	93
Tabelle 30	Zuordnung von Themenclustern zu Sektoren des Klimaschutzgesetzes (KSG) _____	96

Abbildungen

Abbildung 1	Themenfelder der Metastudie „Nachhaltigkeitseffekte der Digitalisierung“	2
Abbildung 2	Clusterthemen der Metastudie „Nachhaltigkeitseffekte der Digitalisierung“	3
Abbildung 3	Umweltauswirkungen der Stromerzeugung	9
Abbildung 4	Methodik und geographische Region der Studien im Cluster Smart Grids	10
Abbildung 5	Ausgewählte Umwelteffekte digitaler Technologien im Cluster Smart Grids, Beispiel Smart Metering	10
Abbildung 6	Ausgewählte Umwelteffekte digitaler Technologien im Cluster Smart Grids, Beispiel Smart Charging	11
Abbildung 7	Effektrichtung der analysierten Studien im Cluster Smart Grid	12
Abbildung 8	Umweltauswirkungen von Gebäuden	13
Abbildung 9	Methodik und geographische Region der Studien im Cluster Smart Buildings	13
Abbildung 10	Ausgewählte Umwelteffekte digitaler Technologien im Cluster Smart Buildings	15
Abbildung 11	Effektrichtung der analysierten Studien im Cluster Smart Buildings	17
Abbildung 12	Methodik und geographische Region der Studien im Cluster Smart City	32
Abbildung 13	Digitale Anwendungen und Schlüsseltechnologien im Cluster Smart City	32
Abbildung 14	Ausgewählte Umwelteffekte digitaler Technologien im Cluster Smart City	33
Abbildung 15	Effektrichtung der analysierten Studien im Cluster Smart City	34
Abbildung 16	Umweltauswirkungen im Verkehrsbereich	34
Abbildung 17	Methodik und geographische Region der Studien im Cluster Smart Mobility	35
Abbildung 18	Ausgewählte Umwelteffekte digitaler Technologien im Cluster Smart Mobility	37
Abbildung 19	Effektrichtung der analysierten Studien im Cluster Smart Mobility	38
Abbildung 20	Rebound-Effekte im Food-Sharing nach Effektart (Meshulam et al., 2023)	45
Abbildung 21	Umweltauswirkungen der industriellen Produktion	53
Abbildung 22	Methodik und geographische Region der Studien im Cluster Smart Factory	53
Abbildung 23	Ausgewählte Umwelteffekte digitaler Technologien im Cluster Smart Factory	55
Abbildung 24	Effektrichtung der analysierten Studien im Cluster Smart Factory	56
Abbildung 25	Ausgewählte Umwelteffekte digitaler Technologien im Cluster Smart Agriculture	68
Abbildung 26	Effektrichtung der analysierten Studien im Cluster Smart Agriculture	69
Abbildung 27	Suchergebnisse in Lens nach Themenfeldern	92
Abbildung 28	Suchergebnisse in Lens nach Themenfeldzuordnung (Mehrfachnennungen möglich)	92
Abbildung 29	Anzahl der Studien in den einzelnen Relevanzkategorien	94

Abkürzungsverzeichnis

ADP	Abiotic Resources Depletion Potential
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -Äq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
DIN	Deutsches Institut für Normung
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
EU	Europäische Union
GB	Gigabyte
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
IoT	Internet der Dinge (Internet of Things)
IT	Informationstechnologie
kg	Kilogramm
KI	Künstliche Intelligenz
kW	Kilo-Watt
kWh	Kilo-Watt-Stunde
LCA	Lebenszyklusanalyse
Lkw	Lastkraftwagen
Mt	Megatonne
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
Pkw	Personenkraftwagen
PV	Photovoltaik
TAF	Tarifanwendungsfälle
THG	Treibhausgase

Zusammenfassung

Hintergrund

Die Transformation zu einer digitalen und nachhaltigen Gesellschaft und die Umweltauswirkungen der Digitalisierung stellen zentrale politische Herausforderungen unserer Zeit dar. Getrieben von Marktmechanismen, Regulierungen, politischen Prozessen und Forschungsagenden dringen digitale Innovationen und Schlüsseltechnologien in sämtliche Bereiche des gesellschaftlichen Lebens vor. Digitale Technologien werden in diesem Kontext sowohl als Ermöglicher für umweltfreundliche Technologien diskutiert als auch als Umweltrisiko.

Digitalisierung führt zu tiefgreifenden Veränderungen aller gesellschaftlichen Bereiche. Derzeit lässt sich durch den Fortschritt in der Entwicklung Künstlicher Intelligenz (KI) eine weitere Beschleunigung dieses Prozesses erahnen. Um Nachhaltigkeit als Zielsetzung bei Digitalisierungsprozessen mitdenken und politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen darauf ausrichten zu können, bedarf es eines fundierten Verständnisses der Konsequenzen, die mit dem Aufbau und der Anwendung digitaler Infrastrukturen und Technologien einhergehen.

In diesem Kontext haben Technopolis und das Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung (iÖW) die internationale wissenschaftliche Studienlage zu den Nachhaltigkeitseffekten der Digitalisierung umfassend analysiert. Die Studie wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) durchgeführt. Sie analysiert den aktuellen Forschungsstand zu den Nachhaltigkeitseffekten der Digitalisierung in verschiedenen Bereichen der Wirtschaft auf Basis einer systematischen Literaturrecherche.

Methodik

In die Literaturanalyse wurden vor allem Studien einbezogen, die mögliche Nachhaltigkeitseffekte nicht nur qualitativ diskutieren, sondern auch quantifizieren. Teil der Analyse waren relevante Veröffentlichungen aus dem Zeitraum von 2019 bis 2023. Von den ca. 6000 Studien der Literaturrecherche wurden ca. 200 als relevant identifiziert, d. h. diese Studien enthalten (überwiegend) quantifizierte Umwelteffekte der Digitalisierung, die auf den deutschen bzw. europäischen Kontext übertragbar sind. Neben der systematischen Literaturanalyse wurden zu ausgewählten Themen vertiefende Steckbriefe erstellt und interdisziplinäre Fokusgruppen mit Expert*innen vor allem aus der Wissenschaft durchgeführt. Ausgehend von dieser Methodik identifiziert dieser Bericht relevante Forschungsbedarfe im Bereich Digitalisierung und Nachhaltigkeit.

Wichtigste Erkenntnisse

In dieser Studie werden auf Basis der Literaturanalyse eine Vielzahl an Anwendungsfällen mit besonders hohen Potenzialen für positive Umwelteffekte identifiziert. Insbesondere im Energiebereich gibt es eine Vielzahl von vergleichsweise gut erforschten Anwendungsfällen. Hierzu zählt beispielsweise der Einsatz von Smart Metering und preisdynamischen Tarifen. Auch Automatisierung und Monitoring im Gebäudebereich können den Energieverbrauch deutlich verringern. Durch Digitalisierung im Energiesektor kann außerdem das Abregeln erneuerbarer Energien vermieden werden. Im Bereich Verkehr können Technologien wie Internet of Things (IoT) und 5G z. B. die THG-Emissionen im Güterverkehr deutlich senken. Die positiven Umweltpotenziale der Digitalisierung sind jedoch nicht auf das Einsparen von CO₂-Emissionen beschränkt. In der Landwirtschaft können z. B. durch den Einsatz von Precision Farming durch digital gestütztes Monitoring der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und Bewässerung reduziert werden.

Trotz einer Vielzahl von Studien, die sich mit Umwelteffekten von Digitalisierung beschäftigen, ist der Wissensstand über das Ausmaß der Potenziale in vielen Bereichen jedoch immer noch lückenhaft. In den für diese Studie analysierten Veröffentlichungen wird eine Vielzahl von digitalen Technologien und Anwendungsfällen qualitativ bzw. anekdotisch als sehr relevant beschrieben, es fehlen jedoch in der Regel Quantifizierungen. Obwohl z. B. für den Bereich KI viele Veröffentlichungen identifiziert wurden, enthielten nur wenige quantifizierte Analysen, auch Bilanzierungen fehlten zum Teil. Diese Studien wurden daher nur begrenzt in die Metastudie miteinbezogen, deuten aber auf ein potenziell disruptives Potenzial von KI in manchen Anwendungsbereichen hin (z. B. im Bereich Klimaanpassung kann KI durch die Verbesserung von Prognosen die Reaktionsfähigkeit auf Umweltereignisse erhöhen).

Mit der Digitalisierung gehen neben Umweltchancen auch negative Umwelteffekte einher. Zu den negativen Effekten der Digitalisierung gehören direkte Effekte, die durch den Energie- und Ressourcenverbrauch der Produktion und den Betrieb digitaler Infrastruktur entstehen. Ein weiteres prominentes Beispiel sind negative systemische Effekte wie Rebound-Effekte. Daher führt Digitalisierung nicht zwangsläufig zu einer Verringerung des Ressourcenverbrauchs. Positive Umwelteffekte der Digitalisierung gehen oft auf positive Enabling-Effekte wie Optimierungs- und Substitutionseffekte zurück, oder ergeben sich durch den Wandel zu nachhaltigen Verhaltens- und Konsummustern. Im Fokus der Literatur stehen meist positive Enabling-Effekte.

Die vorhandenen Quantifizierungen konzentrieren sich meist auf die Potenziale digitaler Technologien (die positiven Enabling-Effekte). Nur in wenigen Studien werden vor- und nachgelagerte Umwelteffekte der Produktion der digitalen Technologien sowie weitere systemische Effekte wie Rebound-Effekte in die Umweltbewertung mit einbezogen. Eine übergeordnete Bewertung der Gesamtbilanz digitaler Technologien im Rahmen wissenschaftlicher Analysen wird somit erschwert. Bei vielen Studien handelt es sich zudem um Fallstudien, die Umwelteffekte unter sehr spezifischen Rahmenbedingungen ermitteln. Es ist daher häufig nicht klar, inwieweit sich diese Potenziale skalieren bzw. auf andere Kontexte übertragen lassen. Schließlich werden Umweltauswirkungen häufig auf CO₂-Äq. verkürzt und auf eine breitere Betrachtung von Umwelteffekten im Sinne von Ressourcenverbrauch wird oft verzichtet.

Technologien wie Internet of Things (IoT), KI & Big Data und Blockchain haben sich in der Literatur als Schlüsseltechnologien herausgestellt (Tabelle 1). Für jede dieser Technologien gibt es eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten mit entsprechenden Potenzialen für positive Umwelteffekte wie Treibhausgas-Einsparungen, aber auch Umweltrisiken.

Tabelle 1 Digitale Schlüsseltechnologien für Nachhaltigkeit

Relevante Schlüsseltechnologien	IKT gesamt 	IoT 	KI & Big Data 	Blockchain 
Funktionsweise 	IKT umfasst alle relevanten Soft- und Hardware-Infrastrukturen der Telekommunikation und ist Basis für digitale Anwendungen (Server, Rechenzentren, digitale Endgeräte wie Handys und Laptops, etc). Effektive Bereitstellung von Vernetzungs-, Kommunikations- und Transaktionsmöglichkeiten, z.B. durch digitale Infrastruktur	Vernetzung physischer und virtueller Objekte unter Verwendung von digitaler Sensorik und Aktorik. Durch automatische Identifikation, Fernüberwachung und Fernsteuerung können relevante Daten bereitgestellt und integriert werden sowie Prozesse optimiert werden. Dadurch können der Einsatz von Ressourcen und der Energieverbrauch reduziert werden.	Algorithmische Verarbeitung großer Mengen an Daten z. B. für präzisere Prognosen in der Klimaforschung und zur effizienteren Vorhersage von Umweltereignissen im Bereich der Klimaanpassung. Effizienterer Einsatz von Ressourcen durch intelligente Systemsteuerung	Digitale und dezentrale Durchführung von (Kleinst-) Transaktionen Erleichterte Regulierung und Monitoring (z. B. Emissionshandel) durch Manipulationssicherheit, Irreversibilität, Dezentralität & Transparenz
Ausgewählte Anwendungsbeispiele 	Vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, z.B.: <ul style="list-style-type: none"> • Vernetzung digitaler Geräte • Kommunikation und Informationsvermittlung • Ermöglichung von Homeoffice sowie digitalen Besprechungen und Konferenzen mithilfe digitaler (Video-)Kommunikation 	<ul style="list-style-type: none"> • Smart Home & Smart Buildings • Smart Metering & preisdynamische Tarife • Smart Charging & virtuelle Kraftwerke • Sensorik und Drohnen für automatisierte Landmaschinensysteme und Daten für Präzisionslandwirtschaft • Smart Factory & Industrial Internet of Things 	<ul style="list-style-type: none"> • Verschiedenste Arten von Prognosen (z. B. Wetter, Stromerzeugung, Anlagenzustand/ Wartungsbedarfe oder Energieflüsse) • KI-Nutzung zur Modellierung und Simulation in der Klimaforschung • KI-gestützte Datenanalysen & Management-Informationssysteme 	<ul style="list-style-type: none"> • Herkunftsnachweise von Erneuerbaren Energien (Labeling) • Stammdatenregister von Erneuerbare-Energien-Anlagen • Peer-to-Peer-Stromhandel & Smart Contracts für Abwicklung von Transaktionen
Umweltchancen 	<ul style="list-style-type: none"> • Effizienzsteigerung, Substitutionseffekte & Ressourceneinsparungen durch digitale IKT-Dienstleistungen • Verringerung von Emissionen durch Vermeidung von Flugreisen, Pendelverkehr und anderer Formen der Mobilität 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringerer Energieverbrauch durch Monitoring und Automatisierung, z. B. von Energiesystemen • Optimierter Einsatz von Speichern, Verbrauchern und Erzeugern sowie Ressourcen wie etwa Boden, Energie und Wasser • Geringerer Netzausbau- und Wartungsbedarf • Geringerer Einsatz von Düngemitteln & Optimierung von Erntevorgängen • Ressourcenschonung durch Optimierung von Produktionsprozessen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringerer Material- und Energieverbrauch durch intelligente Steuerung, Nutzung und Wartung von Energiesystemen • Verbesserung der Klimaforschung, z. B. validere Prognosen von Klimaereignissen • Optimierter Einsatz von Ressourcen wie etwa Boden, Energie und Wasser • Großes Potenzial im Bereich der Klimaanpassung durch verbesserte (Wetter-) Prognosen 	<ul style="list-style-type: none"> • Effizientere Informationsbereitstellung durch Wegfall von Intermediären bei Geschäftsprozessen • Unterstützung bei Regulierung und Monitoring (z. B. Verwaltung des Emissionshandels)

<p>Umweltrisiken</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Zunahme des Energieverbrauchs durch erhöhte IKT-Nachfrage und Datenströme • Risiko für Rebound- und Obsoleszenz-Effekte durch komplexe Wechselwirkungen und Verhaltensänderungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Großflächiger Roll-out digitaler Infrastrukturen und damit verbundener Energie- und Ressourcenverbrauch • Erhöhte Netzbelastung durch gleichzeitige Ansteuerung vieler technischer Einheiten • Rebound-Effekte können Ressourceneinsparungen entgegenwirken 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Energie- und Ressourcenbedarf für Datenspeicherung und -verarbeitung, insbes. KI-Training und -Anwendung sowie in der Forschung 	<ul style="list-style-type: none"> • Potenziell hoher Energie- und Ressourcenbedarf der Blockchain könnte mögliche Einsparungen (Umweltchancen) überwiegen
<p>Effekte auf THG-Emissionen</p> 	 <p>Produktion und Nutzung digitaler Geräte sind für bis zu 4% der globalen THG-Emissionen verantwortlich. TGH-Einsparungen z. B. durch Effizienzsteigerungen werden global betrachtet verringert durch Auslagerung der energieintensiven Produktion digitaler Geräte</p>	 <p>Positiver Effekt durch reduzierten Energieverbrauch und vermiedene Abregelung von erneuerbaren Energien</p>	 <p>Positiver Effekt durch erhöhte Lebensdauer oder optimierten Ertrag von Energietechnologien</p>	 <p>Gesamteffekt unklar, da indirektem Potenzial durch Ermöglichung und effizientere Abwicklung von Geschäftsprozessen, ein potenziell hoher Energiebedarf der Blockchain gegenübersteht</p>
<p>Studienlage: Quantifizierung von Umweltwirkungen</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Studienlage mit Blick auf den allgemeinen Zusammenhang zwischen IKT und CO₂-Emissionen • Schwierigkeiten, komplexe Folgen wie Rebound- und Obsoleszenz-Effekte quantitativ zu erfassen 	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Studienlage für Smart Home & Buildings, Smart Metering und Smart Charging; übrige Anwendungen in Energiewirtschaft kaum untersucht • Im Bereich Landwirtschaft und Tierhaltung vor allem Case Studies außerhalb Deutschlands • Häufig keine Berücksichtigung der Auswirkungen der Produktion und Nutzung von IoT-Technologien (direkte Effekte) oder von Rebound-Effekten 	<ul style="list-style-type: none"> • Wenige spezifische Studien zu KI und Big Data im Energiebereich • Positive Netto-Wirkung bei prognosegesteuerten Energieanlagen • KI als potenziell disruptive Technologie im Bereich Klimaanpassung, Ausmaß der Umwelteffekte aber noch unklar 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine spezifischen (quantitativen) Studien zu Blockchain im Energiebereich vorhanden • Allgemeine Studien zeigen signifikante Energiebedarfe für Blockchain-Anwendungen wie Kryptowährungen • Unklar, ob Ressourcenverbrauch die potenziellen Einsparungen durch Blockchain überwiegt

Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse nach Themenfeldern

Die Metastudie zu den Nachhaltigkeitseffekten der Digitalisierung fokussiert acht Themenfelder: Energiesysteme, Klimaschutz und -anpassung, Stadtentwicklung und urbane Mobilität, Kreislaufwirtschaft, Nachhaltiges Wirtschaften, Ressourcennutzung, Primärwirtschaft und BioTech-Verfahren sowie Forschungsinfrastrukturen. Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse aus den in der Metastudie analysierten Themenfeldern zusammengefasst.

Energiesysteme

Die Studienlage im Bereich Energiesysteme zeigt, dass in Gebäudeautomation, Smart Charging und Co. viel Potenzial für Umweltentlastungen steckt. Das Themenfeld **Energiesysteme** ist ein Schlüsselbereich für den Klimaschutz und die Umsetzbarkeit des Ziels, 100% des Energiebedarfs aus erneuerbaren Energien zu decken. Wichtige digitale Technologien sind virtuelle Kraftwerke, intelligente Mess- und Steuerungstechnik in Gebäuden (für Strom und Wärme) und darauf aufbauende Systeme der Gebäudeautomation sowie Smart Charging. In allen diesen Anwendungen werden in der Literatur substantielle Potenziale identifiziert, die die direkten Umwelteffekte der digitalen Anwendungen überkompensieren können. Dies gilt allerdings nicht für alle Technologien gleichermaßen. Bei der Gebäudeautomation werden zum Beispiel im Falle eines breiten Rollouts im Wohn- und Nichtwohngebäudebereich allein für die Bereitstellung von Wärme für Heizung und Warmwasser im Jahr 2030 substantielle Einsparpotenziale von bis zu 10,8 Mio. Tonnen und damit rund 1,5% der gesamten aktuellen deutschen THG-Emissionen identifiziert. Bei eher komfortorientierten Smart-Home-Systemen, die z. B. auf Sicherheit oder Entertainment abzielen, können die negativen direkten Umwelteffekte je nach Konfiguration und erzielten Energieeinsparungen jedoch die Potenziale überwiegen. Anwendungen zu steuerbaren Lasten (Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen, Speicher) haben als Systemdienstleistungen ein hohes Umweltpotenzial für das Stromsystem als Ganzes. Im Bereich Smart Charging können z. B. 6-17% Emissionseinsparungen im europäischen Stromsystem erzielt werden, wenn Elektrofahrzeuge smart statt konventionell geladen werden. Empirische Daten zum längerfristigen Verbrauchsverhalten nach dem Einbau eines Smart Meters zeigen wiederum, dass Energieeinsparungen und Mehrverbräuche sich ausgleichen. Insgesamt sind viele Anwendungsfälle der Digitalisierung im Energiebereich allerdings bislang wenig oder gar nicht untersucht. Ein Beispiel hierfür ist das Building Information Modelling, welches in qualitativen Studien als sehr relevant für den Gebäudebereich beschrieben wird (z. B. im Rahmen des Seriellen Sanierens), aber noch nicht ausreichend mit quantitativen Potenzialen hinterlegt ist.

Klimaschutz und -anpassung

Das Themenfeld **Klimaschutz und Klimaanpassung** ist ein Querschnittsthema. Daher wurde hier der Fokus auf Studien mit übergreifenden Betrachtungen der Klimaeffekte von Digitalisierung gelegt. Im Bereich Klimaschutz werden die Gesamtpotenziale von Digitalisierung überwiegend positiv eingeschätzt. Dabei können politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen einen entscheidenden Einfluss auf die Akzeptanz und Nutzung digitaler Technologien und damit auch auf die Realisierung der Klimaschutzpotenziale haben. Dies zeigt sich beispielsweise bei der Nutzung von Videotelefonie im Arbeitskontext, die erst durch die Homeoffice-Regelungen während der Corona-Pandemie flächendeckend eingesetzt wurde (Clausen et al., 2022). Es gibt jedoch nur wenige Studien, die die Systemperspektive einnehmen und die Klimaschutzeffekte der Digitalisierung unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen und Überschneidungen einzelner Effekte untersuchen. Durch Überlappungen und Wechselwirkungen der Klimaeffekte kann es zu Mehrfachzählungen und Überschätzungen der Potenziale von Digitalisierung kommen. Überschüsse erneuerbarer Energien können z. B. mit verschiedenen flexiblen Nachfragern integriert und somit fossile Erzeugung substituiert werden.

Studien einzelner Technologien (z.B. Beucker & Hinterholzer, 2021; Xu et al., 2020) berücksichtigen aber häufig nicht, dass auch andere digitale Anwendungen auf die gleichen Potenziale der Integration abzielen. Durch ein Addieren der verschiedenen quantifizierten Effekte aus den einzelnen Studien würde sich somit eine Überschätzung des Gesamtpotenzials ergeben. Zudem werden direkte Effekte und systemische Effekte wie Rebound-Effekte nur selten quantifiziert.

Im Bereich Klimaanpassung wurden nur verhältnismäßig wenige relevante Studien identifiziert. Hier besteht daher ein großer Bedarf an vertiefter Forschung, um die Rolle der Digitalisierung bei der Anpassung an die Folgen des Klimawandels genauer zu analysieren. Die relevanten Studien im Bereich Klimaanpassung zeigen auf, dass digitale Anwendungen vor allem positive Effekte auf die gesellschaftliche Resilienz und Anpassungsfähigkeit haben. Dieses Potenzial ergibt sich vor allem indirekt, z. B. durch eine präzisere Vorhersagbarkeit von Wetterereignissen oder Schädlingsbefall in Wäldern. Dies ermöglicht eine optimierte Reaktionsfähigkeit auf die Folgen des Klimawandels.

Stadtentwicklung und urbane Mobilität

Für das Themenfeld **Stadtentwicklung und urbane Mobilität** sind Fragen rund um Mobilitäts- und Energiethemen sowie Müllvermeidung und -management von besonderer Bedeutung. Insgesamt lässt sich festhalten, dass digitale Hilfsmittel für Monitoring und Planung allein noch keine positiven Effekte erzeugen. Sie können jedoch eine wertvolle Grundlage für die Entwicklung von Lösungen bieten. Die Verschmelzung von Mobilitäts- und Energiesystemen ist in urbanen Umgebungen zumindest in aktuellen Forschungsarbeiten bereits sehr deutlich zu erkennen. Die Erforschung digitaler Technologien und Werkzeuge im Verkehr bricht allerdings nur selten aus tradierten Paradigmen des (motorisierten) Individualverkehrs aus. Technologisch sind vor allem das Internet of Things (IoT), Smart Grid-Anwendungen und Autonomes Fahren im Fokus der Forschung. So wird zum Beispiel dem Güterverkehr viel Potenzial zugeschrieben: Technologien wie IoT und 5G können die THG-Emissionen in diesem Bereich sehr deutlich senken. Bei Autonomem Fahren entscheidet über die Gesamtrichtung der Umwelteffekte die Frage, ob Effizienzgewinne durch Rebound-Effekte (mehr Nachfrage nach Autos) und der benötigten Hardware (im Auto) überkompensiert werden. Generell ist im Bereich Personenverkehr für die Bestimmung der Umweltauswirkungen die Frage entscheidend, ob digitale Technologien für eine Sharing Economy genutzt werden (z. B. Carsharing von autonom fahrenden Autos), oder ob die Effizienzgewinne zu einem weiter verstärkten Individualverkehr führen. Aufgrund der Fokussierung von Forschungsarbeiten auf den Individualverkehr fehlen insbesondere Studien über die Potenziale digitaler Technologien im öffentlichen Nahverkehr.

Kreislaufwirtschaft

Die Transformation der Ökonomie in Richtung einer **Kreislaufwirtschaft** kann durch den Einsatz digitaler Technologien unterstützt werden. So können zum Beispiel Stoffe und Produkte über die Wertschöpfungskette verfolgt und der Datenaustausch zwischen den beteiligten Akteuren dafür genutzt werden, um Wiederverwendung, Wiederaufbereitung, Reparatur und Recycling zu ermöglichen und zu erleichtern. Die digitale Kreislaufwirtschaft setzt große Hoffnungen auf so genannte digitale Produktpässe, die produktbezogene Informationen mit Nachhaltigkeitsbezug entlang von Lieferketten erfassen und niederschwellig bereitstellen sollen. Bislang scheinen sich jedoch kaum Studien sowohl mit dem Konzept zu befassen als auch empirisch nachgewiesene Effekte aus der Praxis nachzuweisen. Die vergleichsweise wenigen Studien zu Digitalisierung und Kreislaufwirtschaft untersuchen vor allem die Technologien Digital Twin, Internet of Things und KI hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen. Die Effekte basieren häufig auf Sekundärdaten und werden in erster Linie in Form von Einsparungen von Treibhausgasemissionen gemessen, d.h. die für eine Kreislaufwirtschaft mindestens

genauso relevanten Ressourcen- und Stoffströme sind noch nicht hinreichend quantitativ untersucht. Die in den Studien ermittelten Effekte der Digitalisierung sind in Gestalt von Effizienzsteigerung fast durchgehend positiv, während Rebound- und andere negative Effekte nur punktuell thematisiert werden. Die Studienlage ist auch insofern unzureichend, als es bis dato noch relativ wenige hochwertige Studien mit quantifizierten Ergebnissen gibt und die Untersuchungsgegenstände sehr divers sind. Ein umfassendes Bild über die Potenziale und Risiken der Digitalisierung hinsichtlich des Übergangs zu einer Kreislaufwirtschaft kann auf Basis der bestehenden Literatur noch nicht gezeichnet werden. Insofern überrascht es nicht, dass die vorliegenden Studien auch selten politische Implikationen und Handlungsempfehlungen anbieten. Wegen der Komplexität der Datenerfassung über die Wertschöpfungskette empfehlen sich für künftige Forschung transdisziplinäre kollaborative Forschungssettings unter Einbeziehung vielfältiger Akteure und Berücksichtigung der institutionellen Kontexte einer Kreislaufwirtschaft.

Nachhaltiges Wirtschaften

Im Bereich **Nachhaltiges Wirtschaften** zeigen die Studien überwiegend positive Umwelteffekte auf. Dabei handelt es sich aber häufig um Potenziale und nur selten um faktisch gemessene Emissions- oder Ressourceneinsparungen. Da das Themenfeld sehr breit ist, gibt es auch eine Vielzahl von relevanten Technologien. Im Bereich der Produktion (Smart Factory) werden digitale Technologien in der Regel zur Ermöglichung einer nachhaltigeren Produktion diskutiert. Insbesondere IoT und KI ermöglichen Prozessoptimierungen für eine höhere Energie- und Materialeffizienz, beispielweise durch Automatisierung von Prozessen oder intelligentem Monitoring. Im Fokus stehen damit Effizienzgewinne durch Automatisierung und Vernetzung sowie intelligentes Monitoring. Beispielsweise könnte laut einer Studie durch ein IoT-basiertes smartes Monitoring zur Erfassung von Abfalldaten in Echtzeit die Lebensmittelabfälle in der Produktion um 60% reduziert werden. Mit der Einführung der digitalen Technologien und Anwendungen würden auch weitere Vorteile einhergehen (z. B. Verbesserung der Flexibilität im Fertigungsprozess, Modularisierung, Einsparung von laufenden Kosten). Für den Bereich des Intelligenten Monitorings sowie der Automatisierung und Vernetzung von Produktionsanlagen werden zwar in der Breite großes Potenzial für Effizienzsteigerungen zugesprochen, diese sind aber noch zu wenig erforscht und quantifiziert. Auch die Potenziale von Einzeltechnologien wie 3D-Druck und Digital Twins werden betont, diese sind jedoch sehr kontextabhängig. Es fehlt an quantitativen Ergebnissen, insbesondere über spezifische Kontexte hinweg.

Ressourcennutzung

Das Themenfeld **Ressourcennutzung** zeichnet sich durch seinen Fokus auf Studien aus, die direkte Effekte der Digitalisierung quantifizieren. Direkte Effekte entstehen beispielsweise durch den Ressourcenbedarf bei der Herstellung und Nutzung digitaler Endgeräte sowie der benötigten digitalen Infrastruktur. In diesem Themenfeld zeigen die Studien sehr heterogene Einflüsse der Digitalisierung auf die Umwelt. Einige Technologien wie Smart Meter, Cloud-Computing und 5G werden oft positiv bewertet, während Endverbraucher-IKT-Geräte und Online-Anwendungen wie soziale Medien und Kryptowährungen tendenziell negativ beurteilt werden. Die gängige Methodik in diesem Themenfeld ist die Lebenszyklusanalyse (LCA) oder darauf basierende Methodiken, um die direkten Auswirkungen digitaler Technologien auf die Umwelt zu bewerten. Die Mehrheit der analysierten Studien verwendet LCA. Die Qualität der Daten in den Studien variiert stark, insbesondere bei relativ neuen Technologien wie Blockchain. Zudem gibt es Unterschiede in den verwendeten LCA-Methodologien, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschwert. Insgesamt wurden nur wenige Studien gefunden, die den (negativen) direkten Effekten auch (positive und negative) indirekte Effekte quantitativ gegenüberstellen. Dies erschwert die Beurteilung der Gesamtauswirkungen von digitalen

Technologien auf die Umwelt, insbesondere im Hinblick auf Rebound-Effekte und Verhaltensänderungen.

Primärwirtschaft und BioTech-Verfahren

Im Themenfeld **Primärwirtschaft und BioTech-Verfahren** ließ sich für den Bereich BioTech nur eine (qualitative) Übersichtsstudie finden. Zwar gibt es Studien zu umweltrelevanten digitalen Technologien (etwa in der Genomsequenzierung oder im Biomaterial 3D-Druck), die Umwelteffekte dieser Technologien werden aber nicht quantifiziert. Für den Bereich Landwirtschaft zeigen Fallstudien aus anderen Ländern indirekte Effekte im Ackerbau von ~20-30% Ressourcenminderung (Düngemittel, Wasser und Treibstoff) durch Präzisionsfarming auf Basis von Sensortechnologien und anschließender datenbasierter Beratung. Eine mögliche Minderung des Einsatzes von Stickstoff-Dünger bei gleichbleibendem oder steigendem Ertrag würde auch direkte Effekte auf andere Umweltindikatoren wie die Emissionen von Treibhausgasen, Luftverschmutzung, Landnutzung und Gewässerversäuerung haben. Diese Ergebnisse sind in der Höhe aufgrund geographischer Unterschiede und Abweichungen im Industrialisierungsgrad der Primärwirtschaft nicht zwingend auf den deutschen Kontext übertragbar und benötigen daher Validierung. Auch im Bereich der Tierhaltung werden in Fallstudien Effizienzgewinne und daraus folgende Ressourcen- und Umwelteffekte quantifiziert.

Forschungsinfrastruktur

Es wurden keine Studien gefunden, die substanzielle Erkenntnisse über quantifizierte Nachhaltigkeitseffekte der Digitalisierung für große **Forschungsinfrastruktur**-Einrichtungen liefern. Im Fokus der Analyse lagen daher Anwendungen digitaler Videotelefonie, die die dominanteste in diesem Themenfeld gefundene Technologie darstellen. Bisherige Studien, die quantitative Effekte untersuchen, konzentrieren sich auf die Emissionsreduktion durch digitale oder dezentrale Forschungskonferenzen und die damit einhergehende Vermeidung von Flugreisen. Diese Reduktionspotenziale lassen sich grundsätzlich leicht skalieren, da Video-Konferenzen von allen wissenschaftlichen Einrichtungen genutzt werden können. Es bedarf jedoch weiterer hochwertiger Studien, die analysieren, welche faktischen Potenziale die digitale Forschungsinfrastruktur besitzt, um die Umweltbelastung, die durch das wissenschaftliche Arbeiten entsteht, effektiv zu reduzieren.

Handlungsempfehlungen

Aus den Befunden der Metastudie lassen sich Handlungsempfehlungen und Implikationen für Forschung und Forschungsförderung ableiten. Die Empfehlungen richten sich nicht nur auf das Füllen von Wissenslücken, sondern auch auf die Berücksichtigung von Kontextfaktoren und die Integration von Technologie- und Gesellschaftsperspektiven in Forschungsdesigns. Mit den Ergebnissen lassen sich vernachlässigte Themenfelder identifizieren, die stärker in den Fokus künftiger Forschung gerückt werden sollten. Zudem sollten sektorenübergreifende Forschungsthemen könnten vermehrt angegangen werden. Um die festgestellten Defizite in der aktuellen Forschung zu den Umwelteffekten der Digitalisierung zu adressieren, empfiehlt es sich, den Forschungsfokus in fünf Perspektiven zu erweitern. Diese umfassen eine (inter)sektorale, eine Wirkungs-, eine soziotechnische, eine nachhaltigkeitspolitische und eine systemische Perspektive:

- **(Inter-)sektorale Perspektive:** Es empfiehlt sich bei sektoral ausgerichteter Forschungsförderung künftig darauf zu achten, dass innerhalb einzelner Sektoren vernachlässigte Anwendungsfelder berücksichtigt werden, vor allem wenn sie ein transformatives Potenzial besitzen. Darüber hinaus ist zu empfehlen, über rein sektorale Forschungsansätze hinauszugehen und die Synergiepotenziale digitaler Vernetzung explizit sektorenübergreifend anzugehen.

- **Wirkungsperspektive:** Um das Ausmaß der Wirkungen zu bestimmen, die die Digitalisierung auf die ökologische Umwelt hat, sollten Brutto-Rechnungen angestellt werden, die nach Möglichkeit alle relevanten direkten und indirekten Effekte einbeziehen.
- **Soziotechnische Perspektive:** Es empfiehlt sich mehr Forschung, die die sozialen Voraussetzungen für die Anwendung von Digitalisierungstechnologien berücksichtigt.
- **Nachhaltigkeitspolitische Perspektive:** Zukünftige Forschungsförderung könnte dazu beitragen, die Untersuchung politischer Rahmenbedingungen als empirisch wirksamen Kontextfaktor anzuregen und die eigene forschungspolitische Agenda klar an nachhaltigkeitspolitische Transformationsstrategien zu knüpfen.
- **Systemische Perspektive:** Der Fokus zukünftiger Forschungsförderung sollte stärker auf der systemischen Einbettung konkreter Anwendungsfälle und auf den Transfer- und Skalierungsperspektiven liegen.

Diese Perspektivenerweiterung hat auch forschungsmethodische Implikationen. Dazu gehören die Forderung nach einer ganzheitlichen Bewertungsmethodik, mehr Interdisziplinarität, mehr transdisziplinärer Kollaboration. Mit den Empfehlungen für die Forschungsförderung sollen fundierte und praxisrelevante Forschungsvorhaben ermöglicht werden, deren Ergebnisse zu einer umweltverträglichen Digitalisierung beitragen

1 Einleitung

Die Digitalisierung ist eines der herausragenden Zukunftsthemen unserer Gesellschaft. Getrieben von Marktmechanismen, Regulierungen, politischen Prozessen und Forschungsagenden dringen digitale Innovationen und Schlüsseltechnologien in sämtliche Bereiche des gesellschaftlichen Lebens vor. Derzeit lässt sich durch den Fortschritt in der Entwicklung Künstlicher Intelligenz (KI) eine weitere Beschleunigung dieses Prozesses erahnen.

Digitale Technologien werden häufig als Ermöglicher für umweltfreundliche Technologien diskutiert. Neben den Chancen gehen mit dem zunehmenden Einsatz digitaler Produkte auch negative Umwelteffekte wie ein erhöhter Energie- und Ressourcenverbrauch digitaler Infrastrukturen oder unbeabsichtigte Änderungen im Konsumverhalten einher. Digitalisierung führt somit nicht zwangsläufig zu einer Verringerung des Ressourcenverbrauchs. Um Nachhaltigkeit als Zielsetzung bei Digitalisierungsprozessen mitzudenken und politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen darauf ausrichten zu können, bedarf es eines gründlichen Verständnisses der Konsequenzen, die mit dem Aufbau und der Anwendung digitaler Infrastrukturen und Technologien einhergehen.

Die im Rahmen des EU Green Deal entstandene Strategie der Twin Transition denkt beide Transformationsprozesse zusammen und eruiert Synergien (Dæhlen, 2023). Schon in seinem Gutachten „Unsere gemeinsame digitale Zukunft“ von 2019 hob der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen hervor, dass Digitalisierung im Sinne der Nachhaltigkeit gestaltet werden sollte, um ihre Hebelwirkung für die grüne Transformation zu nutzen (Fromhold-Eisebith et al., 2019). Spätestens seit dem Urteil des Bundesverfassungsgerichts sind Nachhaltigkeit und insbesondere die Dekarbonisierung der Wirtschaft keine Option mehr, sondern eine Notwendigkeit, um die Rechte zukünftiger Generationen zu wahren (Bundesverfassungsgericht, 2021).

In diesem Zusammenhang verfolgt die Metastudie „Nachhaltigkeitseffekte der Digitalisierung“ das Ziel, die internationale wissenschaftliche Studienlage zu den ökologischen Wirkungen der Digitalisierung in besonders nachhaltigkeitsrelevanten Themenfeldern aufzubereiten. Das von Technopolis und dem Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) durchgeführte Forschungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) von März 2023 bis November 2023 gefördert. Im vorliegenden Endbericht werden die Ergebnisse der Metastudie zusammengefasst.

Der Bericht gliedert sich in folgende Abschnitte: Kapitel 2 erläutert das methodische Vorgehen der Literaturrecherche, Auswahl und Analyse der ausgewählten Studien. In Kapitel 3 werden die Ergebnisse der Metastudie nach Themenfeldern strukturiert präsentiert. Die ökologischen Auswirkungen der Digitalisierung werden dabei detailliert beleuchtet. Kapitel 4 vergleicht und diskutiert übergreifende Erkenntnisse zu Forschungsbedarfen aus dem vorangegangenen Kapitel, um Gemeinsamkeiten, Trends und Handlungsempfehlungen abzuleiten. In Kapitel 5 wird ein zusammenfassendes Fazit gezogen.

2 Methodisches Vorgehen

Ziel dieses Berichtes ist es, einen Überblick über die Veröffentlichungen im Kontext von Digitalisierung und Nachhaltigkeit von 2019 bis Mai 2023 zu geben und die Umwelteffekte der Digitalisierung zu diskutieren. Es wird dabei ausschließlich die ökologische Dimension von Nachhaltigkeit betrachtet, ökonomische und soziale Fragen werden zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse und im Sinne eines klaren Fokus nicht näher betrachtet. Im Zentrum der Studie stehen Veröffentlichungen, die Umwelteffekte quantifizieren.

Im Fokus der Metastudie stehen acht **Themenfelder**, die von besonderem Erkenntnisinteresse sind und den Rahmen für eine umfassende Literaturrecherche und -analyse bilden. Abbildung 1 stellt diese Themenfelder dar. Um die relevante Literatur zu identifizieren, wurden zunächst für jedes der acht Themenfelder Suchbegriffe definiert und anhand der Ergebnisse der einschlägigen Literaturdatenbank „Lens.org“ und ergänzenden Recherchen in GoogleScholar und Google eine Ausgangsübersicht für weitere Auswertungen erstellt (vgl. detaillierte Beschreibung in Anhang A). Bei der Literaturrecherche in Lens wurden insgesamt 5711 englischsprachige und 560 deutschsprachige Ergebnisse über alle Themenfelder hinweg identifiziert. Darunter waren bei den englischsprachigen Ergebnissen etwa 20% Duplikate, bei den Deutschsprachigen 10% (das detaillierte methodische Vorgehen wird in Anhang A dargelegt).

Die Veröffentlichungen in der Literaturübersicht wurden durch die Sichtung von Titel und Abstracts hinsichtlich ihrer Relevanz für die Metastudie bewertet. Primärer Maßstab für die Relevanz war die Untersuchung von Umwelteffekten, die auf der Basis fundierter wissenschaftlicher Methoden nach Möglichkeit quantitativ bemessen werden. Der Fokus der Literaturrecherche und -analyse lag auf Studien, die den Umfang von Nachhaltigkeitseffekten quantifizieren. Aufgrund der in manchen Bereichen unzureichenden Studienlage wurden jedoch teilweise auch Veröffentlichungen zu nicht-quantifizierten Umwelteffekten aufgenommen, da diese wichtige Hinweise zu Forschungslücken liefern können.

Abbildung 1 Themenfelder der Metastudie „Nachhaltigkeitseffekte der Digitalisierung“



Technopolis und IÖW, 2024

Auf der Basis der **Relevanzbewertung** wurde eine vorläufige Auswahl getroffen. Nach der Etablierung der endgültigen Datenbasis für die Analyse, wurden auf Basis von etwa 200 Veröffentlichungen die Themenfeldfazits und Steckbrief-Cluster erstellt. Die Auswertung erfolgte dabei auf zwei Ebenen: Zum einen wurde für jedes der genannten acht Themenfelder ein strukturiertes Fazit gezogen. Zum anderen wurden vertiefende Steckbriefe für sechs **Clusterthemen** erstellt. Die Cluster stellen besonders relevante und häufig in der Literatur vorkommende Anwendungsbereiche der Digitalisierung dar und orientieren sich an den Sektoren des Klimaschutzgesetzes: Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr,

Landwirtschaft und Kreislaufwirtschaft (Abbildung 2). Um die Analyseergebnisse der Cluster-Steckbriefe zu validieren, wurden sechs Expert*innen-Interviews durchgeführt.

Abbildung 2 Clusterthemen der Metastudie „Nachhaltigkeitseffekte der Digitalisierung“



Technopolis und IÖW, 2024

In einem letzten Schritt wurden Forschungsbedarfe identifiziert und **Handlungsempfehlungen** für eine zukünftige Forschungsförderung entwickelt. Für die drei Themenfelder „Klimaschutz“, „Stadtentwicklung und urbane Mobilität“ und „Kreislaufwirtschaft“ wurden außerdem **interdisziplinäre virtuelle Fokusgruppen** durchgeführt, um die Ergebnisse der Literaturrecherche um Perspektiven von Themenfeld-Expert*innen zu ergänzen. Dabei wurden besonders relevante Potenziale und Risiken sowie Forschungslücken mit Blick auf digitale Technologien mit Expert*innen diskutiert. Ziel des interdisziplinären und partizipativen Formats war die Ergänzung der jeweiligen Literaturanalysen sowie die Entwicklung von Handlungsempfehlungen für eine Forschungsagenda. Es wurde ein explorativer Ansatz gewählt, d.h. die Expert*innen wurden, unabhängig von den detaillierten Ergebnissen der Literaturanalyse, um Ihre Einschätzungen zu den Fragen gebeten, die zuvor literaturbasiert untersucht wurden.

Für die Analyse der Nachhaltigkeitseffekte von Digitalisierung wird in diesem Bericht grundsätzlich zwischen **direkten und indirekten Auswirkungen der Digitalisierung** unterschieden. Diese Unterscheidung basiert auf einer Klassifizierung der OECD (2022) sowie auf Arbeiten von Hilty & Aebischer (2015) und Hankel et al. (2018). Diese Klassifizierungen wiederum beruhen auf einem Bericht aus dem Jahr 2001 über die Auswirkungen der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) auf die Umweltschonung (Berkhout & Hertin, 2001).

Direkte Effekte, die auch oft als Effekte erster Ordnung bezeichnet werden, beziehen sich auf die unmittelbaren Umweltauswirkungen, die durch die physische Existenz der digitalen Infrastruktur entstehen. Dies umfasst die Umweltauswirkungen bei der Herstellung, Nutzung, Wiederverwertung und Entsorgung der erforderlichen Geräte, wie z. B. IKT-Endgeräte, smarte Messgeräte und Übertragungsgeräte.

Indirekte Effekte sind das Ergebnis der Anwendung dieser digitalen Infrastruktur und Geräte. Dabei werden häufig zwei verschiedene Arten von indirekten Effekten differenziert:

- **Enabling-Effekte** (auch Effekte zweiter Ordnung genannt) beschreiben die Effekte, die unmittelbar durch die Verwendung dieser Geräte entstehen. Diese Effekte resultieren aus der Fähigkeit der Digitalisierung, Aspekte wie Produktions- oder Transportprozesse zu verändern. Die kann zu einer Modifikation ihrer Umweltauswirkungen führen, sei es eine Verringerung (positive Effekte) oder eine Erhöhung (negative Effekte). Insbesondere handelt es sich hierbei um Optimierungs- und Substitutionseffekte, die beim Einsatz von IKT beabsichtigt sind und in der Regel das Ziel haben, Verbesserungen in Bezug auf Kosten, Energie- und andere Ressourcenverbräuche zu erzielen.
- **Systemische Effekte** (auch Effekte dritter Ordnung genannt) beziehen sich auf die mittel- oder langfristigen Veränderungen im Verhalten (z. B. Konsumverhalten) oder in den wirtschaftlichen Strukturen aufgrund der stabilen Verfügbarkeit einer digitalen Infrastruktur und der von ihr bereitgestellten Dienste. Ein Beispiel für einen indirekten Effekt dieser Art sind Rebound-Effekte, die aus Energieeffizienzgewinnen durch die Digitalisierung in Gebäuden entstehen können und sich in ungeplanten Mehrverbräuchen niederschlagen.

Verschiedene direkte und indirekte Effekte können gleichzeitig auftreten. Alle diese Effekte können positiv oder negativ für die Umwelt bewertet werden (Hankel et al., 2018).

Tabelle 2 Umwelteffekte von Digitalisierung – Terminologie

		Positiv (ressourcenverringend)	Negativ (ressourcenerhöhend)
Direkte Effekte			Lebenszyklus digitaler Infrastruktur (Produktion, Nutzung, End-of-Life)
Indirekte Effekte	Enabling-Effekte	Optimierungseffekte ¹ Substitutionseffekte ²	Obsoleszenz-Effekte ³ Verlagerungseffekte
	Systemische Effekte	Wandel zu nachhaltigen Produktions- und Konsummustern	Rebound-Effekte ⁴ Entstehende Risiken ⁵

Technopolis und IÖW, 2024 (basierend auf Hilty & Aebischer, 2015)

¹ Optimierungseffekt: Durch den Einsatz von Digitalisierung wird der Verbrauch einer anderen Ressource reduziert. z. B. wird in einem intelligenten Haus, das weiß, wo sich die Bewohner aufhalten, welche Fenster geöffnet sind, welches Wetter vorhergesagt wird usw., weniger Energie für die Heizung verbraucht (Hilty & Aebischer, 2015)

² Substitutionseffekt: Die Nutzung von digitalen Geräten ersetzt die Nutzung einer anderen Ressource, z. B. kann ein E-Book-Reader gedruckte Bücher ersetzen, was positiv ist, wenn dadurch der Druck einer ausreichend großen Anzahl von Büchern vermieden wird (Hilty & Aebischer, 2015).

³ Obsoleszenz-Effekt: Digitalisierung kann die Nutzungsdauer einer anderen Ressource aufgrund von Inkompatibilität verkürzen. z. B. wird ein Gerät, das nicht mehr durch Software-Updates unterstützt wird, obsolet (Hilty & Aebischer, 2015).

⁴ Rebound-Effekte: „Effizienzsteigerungen senken oft die Kosten für Produkte oder Dienstleistungen. Dies kann dazu führen, dass sich das Verhalten der Nutzerinnen und Nutzer ändert: Sie verbrauchen mehr - die ursprünglichen Einsparungen werden teilweise wieder aufgehoben. Dieser Effekt wird Rebound genannt.“ (UBA, 2013)

⁵ Entstehende Risiken: Durch Digitalisierung können neue Risiken entstehen, z. B. durch die Anfälligkeit von IKT-Netzen (Hilty & Aebischer, 2015).

3 Analyse der Themenfelder

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Literaturanalyse für die acht Themenfelder „Energiesysteme“, „Klimaschutz und -anpassung“, „Stadtentwicklung und urbane Mobilität“, „Kreislaufwirtschaft“, „Nachhaltiges Wirtschaften“, „Ressourcennutzung“, „Primärwirtschaft und BioTech-Verfahren“ sowie „Forschungsinfrastrukturen“ auf Basis der analysierten Literatur dargestellt. Ergänzt wurde die Literaturanalyse durch Expert*innen-Interviews und die Durchführung von drei Fokusgruppen (vgl. Kap. 2).

3.1 Energiesysteme

Das Themenfeld Energiesysteme umfasst die Bereitstellung und Umwandlung, den Transport und die Verteilung sowie die Speicherung und Nutzung von Energieträgern für Energiedienstleistungen. Mit Hilfe der Digitalisierung soll das Management dieser Prozesse intelligenter, flexibler und effizienter umgesetzt werden, was eine Voraussetzung für Systeme mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien ist. Energiesysteme, die durch den Einsatz digitaler Technologien geprägt sind, werden u.a. unter dem Begriff „Smart Energy“ zusammengefasst (Liggesmeyer et al., 2018).

Für das Themenfeld Energiesysteme wurde zunächst eine übergeordnete Literaturanalyse durchgeführt. Anschließend wurden vertiefende Steckbriefe für die Clusterthemen Smart Grid (Kap. 3.1.2) und Smart Buildings (Kap. 0) erstellt. Eine Validierung der Ergebnisse fand im Rahmen von zwei Expert*innen-Interviews statt.

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die wichtigsten Schlüsseltechnologien, Anwendungsbeispiele, Umweltchancen und -risiken sowie eine Einschätzung zur Studienlage im Bereich Energiesysteme.

Tabelle 3 Digitale Schlüsseltechnologien im Themenfeld Energiesysteme

Relevante Schlüsseltechnologien	IoT	KI & Big Data	Blockchain
Funktionsweise 	Optimierter Einsatz von Energieverbrauch und -technologien durch digitale Sensorik und Aktorik sowie durch Fernzugriff	Algorithmische Verarbeitung großer Mengen an Bewegungsdaten	Digitale und dezentrale Durchführung von (Kleinst-) Transaktionen
Ausgewählte Anwendungsbeispiele 	<ul style="list-style-type: none"> • Smart Home & Smart Buildings • Smart Metering & preisdynamische Tarife • Smart Charging & virtuelle Kraftwerke • Monitoring von erneuerbaren Energieanlagen und Netzelementen 	<ul style="list-style-type: none"> • Prognosen für Wetter und Stromerzeugung, Anlagenzustand und Wartungsbedarfe oder Energieflüsse 	<ul style="list-style-type: none"> • Herkunftsnachweise von Erneuerbaren Energien (Labeling) • Stammdatenregister von erneuerbaren Energieanlagen • Peer-to-Peer-Stromhandel & Smart Contracts für Abwicklung von Transaktionen

<p>Umweltchancen</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringerer Energieverbrauch durch Monitoring und Automatisierung • Optimierter Einsatz von Speichern, Verbrauchern und Erzeugern • Geringerer Netzausbau- und Wartungsbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringerer Material- und Energieverbrauch durch intelligente Steuerung, Nutzung und Wartung 	<ul style="list-style-type: none"> • Effizientere Informationsbereitstellung durch Wegfall von Intermediären bei Geschäftsprozessen
<p>Umweltrisiken</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhte Netzbelastung durch gleichzeitige Ansteuerung vieler technischer Einheiten • Großflächiger Roll-out digitaler Infrastrukturen und damit verbundener Energie- und Ressourcenverbrauch • Direkte und indirekte Rebound-Effekte 	<ul style="list-style-type: none"> • Energie- und Ressourcenbedarf für Datenspeicherung und -verarbeitung, insbes. KI-Training und -Anwendung 	<ul style="list-style-type: none"> • Potenziell hoher Energie- und Ressourcenbedarf der Blockchain
<p>Treibhausgas-reduktionspotenzial</p> 	 <p>Positiver Effekt durch reduzierten Energieverbrauch und vermiedene Abregelung von erneuerbaren Energien</p>	 <p>Positiver Effekt durch erhöhte Lebensdauer oder optimierter Ertrag von Energietechnologien</p>	 <p>Indirektes Potenzial durch Ermöglichung und effizientere Abwicklung von Geschäftsprozessen, die für die Energiewende benötigt werden; allerdings potenziell hoher Energiebedarf der Blockchain</p>
<p>Studienlage: Quantifizierungen von Umweltwirkungen</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Studienlage für Smart Home & Buildings, Smart Metering und Smart Charging; übrige Anwendungen sind kaum untersucht • Umweltwirkungen der digitalen Infrastruktur sind vergleichsweise gering und können in der Regel kompensiert werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Wenige spezifische Studien zu KI und Big Data im Energiebereich • Positive Netto-Wirkung bei prognosegesteuerten Energieanlagen und Predictive Maintenance 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine spezifischen (quantitativen) Studien zu Blockchain im Energiebereich vorhanden • Allgemeine Studien zeigen signifikante Energiebedarfe für Blockchain-Anwendungen wie Kryptowährungen • Aufgrund der derzeitigen Studienlage ist unklar, ob diese Effekte die potenziellen Einsparungen durch Blockchain überwiegen

Technopolis und IÖW, 2024

3.1.1 Literaturanalyse

Überblick

Ausgangspunkt für die Studiensuche war eine **Metastudie zu digitalen Anwendungen** im Energiesektor. Weigel & Fishedick (2019) unterscheiden die identifizierten Anwendungen demnach in drei übergeordnete und sieben Unterkategorien:

- Systemgleichgewicht: (1) Smart Grid und Betriebsoptimierung, (2) Smart Market und Integration von Flexibilitäten, (3) Identifikation von Anomalien und Prognosen,
- Prozessoptimierung: (3) Identifikation von Anomalien und Prognosen, (4) Prozesseffizienz,

- Kundenorientierung: (5) Smart Home, (6) Kommunikationskanäle, (7) Vertrauen und Transparenz.

Aufgrund der hohen Bedeutung von Smart Metern als eine grundlegende digitale Infrastruktur für die Kommunikation und Steuerung technischer Systeme im Energiesektor und insbesondere im Verteilnetz waren die definierten **Tarifanwendungsfälle (TAF) für intelligente Messsysteme** des Bundesamtes für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI, 2019) ein weiterer Ausgangspunkt für die Studiensuche.

Insgesamt konnten **53 relevante Studien** für die Metaauswertung identifiziert werden, in denen die Umweltwirkungen der Digitalisierung im Energiebereich quantitativ adressiert sind. Der Großteil der identifizierten Studien konzentriert sich auf den Einsatz digitaler Systeme im Gebäudebereich und intelligente Messsysteme, auf die Einbindung von batterieelektrischen Fahrzeugen und anderer Flexibilitäten ins Stromnetz (z. B. über preisdynamische Tarife) sowie auf übergreifende Betrachtungen, die mehrere Anwendungsfälle und -bereiche untersuchen.

Besonders häufig werden **Modellierungen oder Simulationen** basierend auf größeren Primärdatensamples oder auf Basis von Sekundärdaten durchgeführt. Häufig vertreten sind außerdem Fallstudienansätze mit spezifischeren methodischen Ansätzen sowie **Ökobilanzierungen und statistische Datenauswertungen**. Die resultierenden Umwelteffekte der Digitalisierung werden überwiegend in Änderungen von CO₂-Emissionen und Energieeinsparungen angegeben. Primärdaten aus eigenen Erhebungen, Feldtests o.ä. werden in etwa 30% der Studien genutzt. 43 Studien kommen zu dem Ergebnis, dass die Effekte der Digitalisierung auf den Energiesektor positiv sind. Bei den übrigen ist der Effekte neutral oder unklar oder es werden nur die direkten Effekte der Digitalisierung analysiert.

Identifizierte Effekte und Effektgrößen

Technologiebezogene Effekte aus der **Herstellung, Nutzung und Entsorgung der genutzten IKT** (direkte Effekte) werden in etwa 25% der Studien berücksichtigt. Dabei wird in allen Studien festgestellt, dass die Effekte im Vergleich zu den übrigen Umwelteffekten der Anwendungen vergleichsweise klein sind und bereits durch geringe realisierte Energie- und Ressourceneinsparungen kompensiert werden könnten.

In den Untersuchungen zum **Gebäudebereich** stehen Optimierungseffekte der Digitalisierung im Mittelpunkt der Untersuchungen, sowohl für Wohngebäude als auch für Nicht-Wohngebäude. Eine Vielzahl der Studien beschäftigt sich mit neuen Steuer- und Regelungsalgorithmen sowie neuen Optimierungsmethoden für die Bereitstellung von Wärme und Kälte (z. B. Einbindung von Raumbelagungsensoren) und die Interaktion mit der übrigen Gebäudeenergie-technik (z. B. PV, Speicher, Ladeeinrichtungen für Elektrofahrzeuge). Es werden in allen Studien potenzielle Energieeinsparungen durch die Anwendungen festgestellt. Ein Grund hierfür ist die immer noch geringe Verbreitung von Gebäudeautomationssystemen und Smart-Home-Anwendungen, die auf eine optimierte Energienutzung abzielen. Lediglich in zwei Studien (Aretz et al., 2022; Gähns et al., 2021) wird explizit der Anwendungsbereich der Identifikation von Anomalien bzw. „predictive maintenance“ von Wärmeanlagen untersucht, die einen wesentlichen Umweltentlastungseffekt haben können, da die Anlagen häufig unbemerkt ineffizient betrieben werden.

Bezogen auf den **gesamten Gebäudebereich** variieren die Ergebnisse der wenigen identifizierten Studien stark. Zwei Auftragsstudien von Bitkom zeigen wesentliche Beiträge der Digitalisierung zu den deutschen Energie- und Klimazielen für 2030 auf (Beucker & Hinterholzer (2021) bis zu 15 Mio. t und Accenture (2021) bis zu 19 Mio. t CO₂-Äq.). Eine von Google beauftragte und von Implement Consulting Group (2023) durchgeführte Studie kommt auf Basis von hochgerechneten Herstellerangaben und Literaturangaben auf Einspareffekte von bis zu 30 Mio. t CO₂-Äq. Gähns et al. (2021) kommen hingegen auf deutlich kleinere Beiträge (149

Tsd. t CO₂-Äq.), untersuchen jedoch nur einen Teilbereich des Gebäudebestands und sehr spezifische technische Anwendungen. Der methodische Ansatz für die Gesamtabeschätzung ist ein wesentlicher Grund für die großen Bandbreiten der ermittelten Umwelteffekte.

Nutzungsbezogene Effekte in Bezug auf Gebäude und Messsysteme werden in einzelnen Studien explizit adressiert (u.a. Aretz et al., 2022; Blair et al., 2022; Gährs et al., 2021; Pohl et al., 2021, 2022; Sim et al., 2023) und zeigen, dass sowohl positive Umwelteffekte (Suffizienzeffekte) als auch negative Umwelteffekte (Rebound-Effekte) mit dem Einsatz digitaler Anwendungen verbunden sein können (z. B. beim Smart Metering Stromverbrauchserhöhungen von durchschnittlich +24% und Einsparungen von -28% (Aretz et al., 2022).

In den Anwendungsbereichen des **intelligenten Ladens** von batterieelektrischen Fahrzeugen und **anderen Flexibilitäten** (Smart Charging und virtuelle Kraftwerke) werden potenziell positive Umwelteffekte gegenüber den betrachteten Referenzfällen berichtet (u.a. Bluhm & Gährs, 2023; Tang et al., 2021; Xu et al., 2020). Demnach sind beispielsweise schon im Betrachtungsjahr 2019 in verschiedenen europäischen Ländern Emissionsreduktionen von bis zu 13% beim Smart Charging gegenüber konventionellem Laden von Elektrofahrzeugen realisierbar (Tang et al., 2021), wenn beim Laden die Zusammensetzung des Strommixes (insbesondere der erneuerbare Anteil) berücksichtigt wird.

Tabelle 4 Ausgewählte Studien für das Themenfeld Energiesysteme

Autoren und Jahr	Titel	Erkenntnisse
Accenture (2021)	Klimaeffekte der Digitalisierung	<ul style="list-style-type: none"> • Untersuchte Anwendungsbereiche: Smart Grids, effiziente Produktion erneuerbarer Energien, Smart Homes, Vernetzte Gebäude • Effekt: CO₂-Einsparpotenzial von 5 bis 16 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2030 in Deutschland pro Anwendung • Methodik: Reduktionspotenzial pro Anwendung auf Basis von Sekundärliteratur skaliert mit erwarteter Marktdurchdringung
Gährs et al. (2021)	Potenziale der Digitalisierung für die Minderung von Treibhausgasemissionen im Energiebereich	<ul style="list-style-type: none"> • Untersuchte Anwendungsfälle: Wetterprognosesteuerung und Online-Effizienzüberwachung von Heizanlagen, Online-Effizienzüberwachung von Heizanlagen, Smart Metering mit Feedback-System, PV-Batteriespeicher in virtuellen Verbänden, stromnetzdienlicher Betrieb von Wärmepumpen und Elektroladestationen • Effekt: Netto-Klimaschutzeffekte von 13 Tsd. bis 149 Tsd. t CO₂-Äq. in 2030 in Deutschland pro Anwendungsfall • Methodik: Ökobilanzierung von technischer Anwendung und Skalierung in spezifischem Anwendungskontext (z. B. Mehrfamilienhäuser mit mehr als 12 Wohneinheiten und Gaskessel) und in Abhängigkeit bisheriger Wachstumsraten

Technopolis und IÖW, 2024

Chancen und Herausforderungen

Bei der Entwicklung hin zu einem klimaneutralen Energiesystem ist die **Digitalisierung ein wichtiger Enabler** für das Management des zunehmenden Anteils fluktuierender erneuerbarer Energien und das Zusammenbringen mit verschiebbaren Lasten sowie für die Verbrauchsminderung. Auch wenn mitunter nur geringe Emissionsminderungen pro Anwendung ermittelt werden, liegt ein weiterer Wert der Digitalisierung in der verbesserten Energienutzung.

Im **Gebäudebereich** ergibt sich, wie oben aufgezeigt, aufgrund der unmittelbaren Wirkung von intelligenter Gebäudetechnik auf den Energieverbrauch und aufgrund der geringen

Verbreitung der Technologien aus Umweltsicht eine deutliche Chance beim weiteren Roll-out der Technologien, was durch einzelne Gesamtabschätzungen zu den Potenzialen der Digitalisierung unterstrichen wird (u.a. Accenture, 2021; Beucker & Hinterholzer, 2021). Im Gegensatz zu diesen abgeschätzten Potenzialen aus der Optimierung der Gebäudeenergieversorgung stellen Verhaltensänderungen der Nutzenden – sowohl Mehr- als auch Minderverbräuche – aber bereits heute in der Praxis beobachtbare Chancen und Herausforderungen dar, wie einzelne Studien zeigen (z.B. Aretz et al., 2022). Somit ist der Aspekt, wie eine Verhaltensänderungen der Nutzenden hin zu Energieeinsparungen (Suffizienz) gestärkt werden kann (z. B. durch eine begleitende und nachvollziehbare Kommunikation zum Energieverbrauch) eine Herausforderung für den weiteren Roll-out.

Für Anwendungen mit einer **Steuerung nach Preissignalen** (Smart Charging, virtuelle Kraftwerke, Time of Use Tarife) wird mitunter von potenziell negativen Umwelteffekten oder nur geringen positiven Umwelteffekten in den Studien berichtet (u.a. Ghotge et al., 2020; Nirukkanaporn & Petcharaks, 2019). Ein Hintergrund ist, dass niedrige Preise und hohe erneuerbare Energieanteile im Strommarkt zwar meistens aber nicht immer positiv korrelieren. Das bedeutet auch eine Herausforderung für die zukünftige **regulatorische Ausgestaltung von Strompreisbestandteilen**, sodass über eine adäquate Anreizsetzung die ökologischen Potenziale der Digitalisierung gehoben werden können, und für die **konkrete Produkt- und Geschäftsmodellgestaltung der Unternehmen**. Die damit verbundenen Geschäftsmodelle (z. B. Einsatz von Speichern für Systemdienstleistungen oder preisdynamische Tarife) können zudem in Konkurrenz um die dezentralisierte Nutzung der Energietechnologien zueinanderstehen, was die Frage aufwirft, welcher Einsatz ökologisch besonders sinnvoll ist.

Weitere systemische Herausforderungen für die ökologischen Auswirkungen der Energiesystemanwendungen ist die **Verfügbarkeit der Technologien und der benötigten Infrastrukturen** (v.a. Smart Meter mit Option zur aktiven Steuerung), die wirtschaftliche Umsetzbarkeit im Rahmen der regulatorischen Vorgaben und die Motivation und Akzeptanz der Nutzenden für den Einsatz digitaler Geräte.

3.1.2 Smart Grid (Cluster-Steckbrief)

Abbildung 3 Umweltauswirkungen der Stromerzeugung



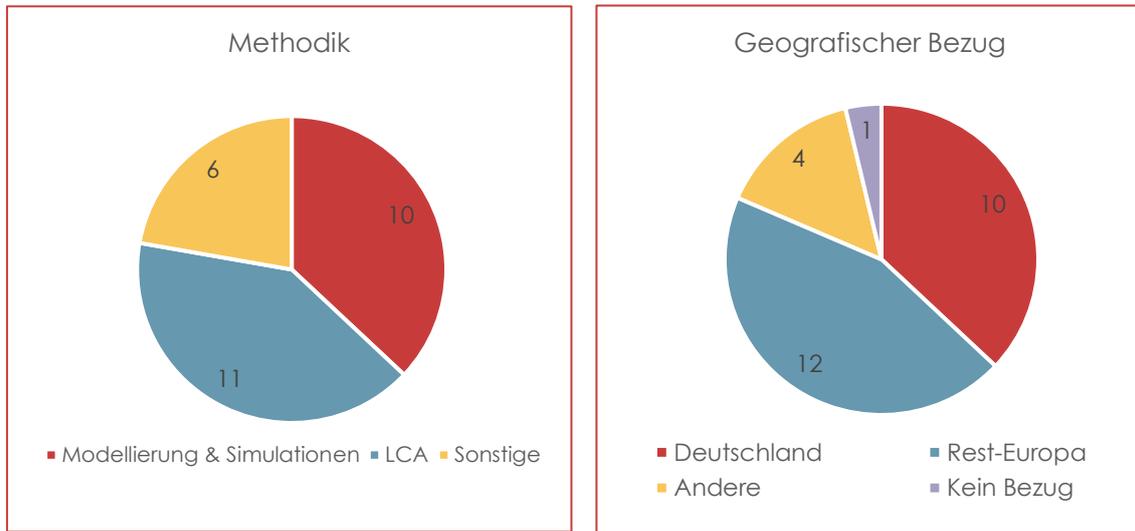
Technopolis und IÖW, 2024

Eingrenzung des Clusters

- Laut Internationaler Energieagentur sind Smart Grids intelligente Stromnetze, die digitale Technologien, Sensoren und Software nutzen, um Stromangebot und -nachfrage in Echtzeit besser aufeinander abzustimmen und gleichzeitig die Kosten zu minimieren und die Stabilität und Zuverlässigkeit des Netzes zu erhalten (IEA, 2023).
- In dem untersuchten Studiensample sind Anwendungsfälle für steuerbare Verbraucher und Speicher (intelligentes Laden von batterieelektrischen Fahrzeugen, virtuelle Kraftwerke) sowie für das Smart Metering vertreten. Nicht identifiziert werden konnten Umweltbewertungen zu Use Cases für die Steuerung von Stromnetzelementen.

Übersicht der analysierten Studien

Abbildung 4 Methodik und geographische Region der Studien im Cluster Smart Grids

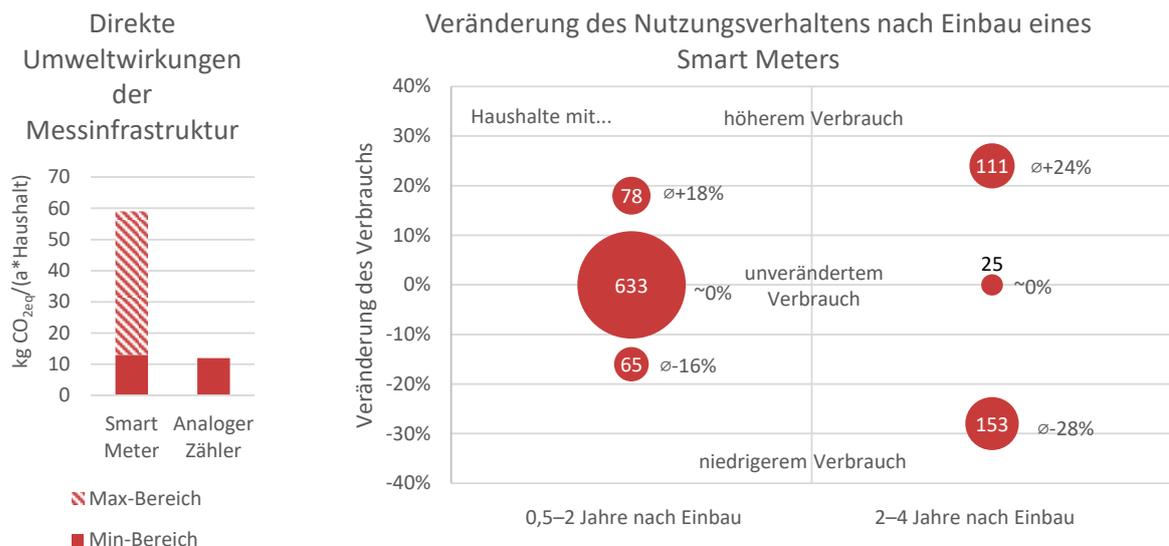


Technopolis und IÖW, 2024

- Insgesamt 27 identifizierte Studien, von denen 26 die Umwelteffekte quantitativ bestimmen
- Methodisch werden primär Lebenszyklusanalysen (LCA) sowie Modellierungen und Simulationen genutzt.

Quantifizierte Effekte

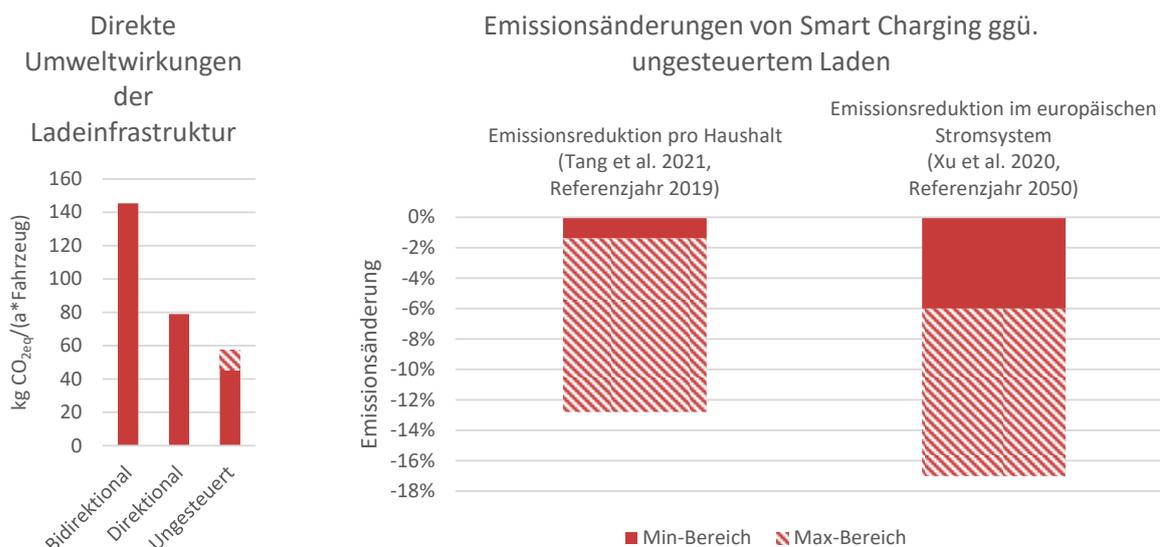
Abbildung 5 Ausgewählte Umwelteffekte digitaler Technologien im Cluster Smart Grids, Beispiel Smart Metering



Größe der Kreise entspricht Anzahl der Haushalte. Quellen: Aretz et al. (2022), Gähns et al. (2021), Wohlschlager et al. (2021)

- Die **direkten Umweltwirkungen aus der Produktion**, Nutzung und Entsorgung der Smart Meter-Geräte (Zähler und Kommunikationseinheit bzw. Gateway) sowie dem Datentransfer weisen aufgrund von Unterschieden im angenommenen Stromverbrauch und der zugrundeliegenden Lebensdauer eine **hohe Bandbreite** auf.
- Empirische Daten zum längerfristigen Verbrauchsverhalten nach Einbau eines Smart Meters zeigen, dass **Energieeinsparungen und Mehrverbräuche sich ausgleichen**.

Abbildung 6 Ausgewählte Umwelteffekte digitaler Technologien im Cluster Smart Grids, Beispiel Smart Charging



Quellen: Wohlschlager et al. (2022), Tang et al. (2021), Xu et al. (2020)

- Die direkten Umweltwirkungen des Smart Charging resultieren aus Bau, Nutzung und Entsorgung der Ladepunkte (z. B. Wallbox) sowie der Mess- und Kommunikationsinfrastruktur. Sie sind **für bidirektionales Laden** (gesteuertes Laden und Entladen ins Netz) **deutlich höher** als für direktionales Laden (gesteuertes Laden) und ungesteuertes Laden (siehe Abbildung 6, links).
- Ein Haushalt in Europa hätte Smart Charging mit dem vorherrschenden Strommix im Jahr 2019 gegenüber ungesteuertem Laden **zwischen 1,4%** (oder 0,09 kg CO₂-Äq.) **und 12,8%** (oder 0,78 kg CO₂-Äq.) **der THG-Emissionen pro Ladevorgang einsparen** können – abhängig von Land und Ladestrategie (Tang et al., 2021) (siehe , links). Abbildung 6, rechts). Gemäß Xu et al. (2020) wären über bidirektionales Laden bis zu 17% der europäischen THG-Emissionen von rund 560 Mt CO₂-Äq. aus dem Lebenszyklus der stromproduzierenden Energietechnologien im Jahr 2050 vermeidbar.

Art der analysierten Umwelteffekte

Tabelle 5 Direkte und indirekte Effekte im Cluster Smart Grids (mit Anzahl der Studien in Klammern)

Anwendungsbereich	Direkte Effekte	Indirekte Effekte		
		Optimierung, Substitution	Nutzungs-bezogene Effekte	Effekte auf das Energiesystem
Smart Metering, dynamische Tarife (9)	Herstellung, Nutzung, Entsorgung von Smart Metern, Datentransfer (7)	Vorzeitige Entsorgung von Altgeräten, veränderter Strombezug (2)	Änderung des Stromverbrauchs durch Verhaltensänderung (5)	Einfluss auf Gesamtemissionen, Strommix und -netz (3)
Smart Charging, virtuelle Kraftwerke, steuerbare Lasten (20)	Herstellung, Nutzung, Ladeinfrastruktur und Kommunikationsgeräten, Datentransfer (7)	Veränderter Strombezug, Einfluss auf Effizienz und Batterielebensdauer (12)	- (0)	Einfluss auf Gesamtemissionen, Strommix und -netz (12)

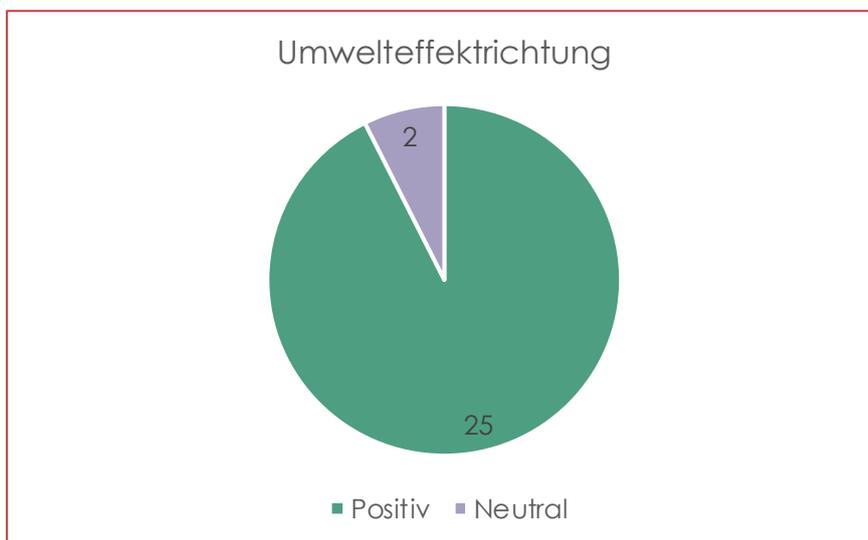
Technopolis und IÖW, 2024

- Beim Smart Metering stehen nutzungsbezogene Umweltauswirkungen im Fokus der Analyse von indirekten Effekten.
- Studien mit Fokus auf Smart Charging und virtuelle Kraftwerke analysieren häufig den Einfluss auf das Stromsystem als Ganzes und die daraus resultierenden Emissionen.

Übergeordnete Effektrichtung der untersuchten Studien

- Es finden sich fast ausschließlich positive Abschätzungen zum Umwelteffekt von Digitalisierung im Bereich Smart Grid.
- Studien, die den Einsatz der benötigten IKT der Anwendungsfälle bilanzieren, stellen unter Berücksichtigung der potenziellen indirekten Effekte Netto-Umweltentlastungen fest.

Abbildung 7 Effektrichtung der analysierten Studien im Cluster Smart Grid



Technopolis und IÖW 2023, n=27

3.1.3 Smart Buildings (Cluster-Steckbrief)

Abbildung 8 Umweltauswirkungen von Gebäuden



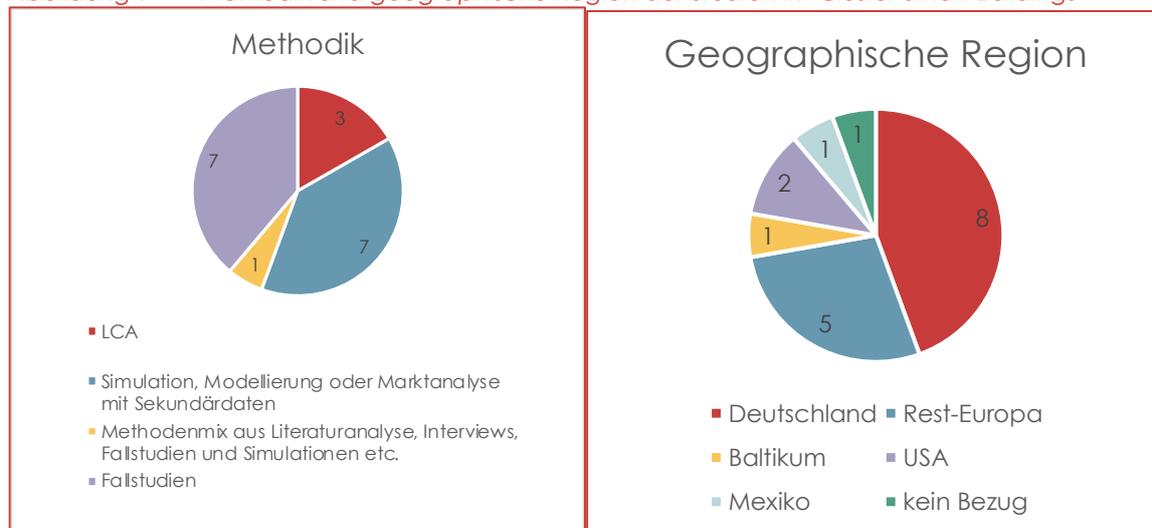
Technopolis und IÖW, 2024

Eingrenzung des Clusters

- Der Einfluss von digitalen Technologien auf Ressourcenverbrauch von Wohn- und Nichtwohngebäuden in der Nutzungsphase wird untersucht.
 - Keine detaillierte Betrachtung der Bau- und Entsorgungsphase
- Besonderer Fokus auf Potenziale von Gebäudeautomation und Smart-Home-Systemen
 - Breite Datenbasis durch Quantifizierungen von Einspar-Potenzialen in Studien und standardisierten Gebäudeautomation-Effizienzklassen in DIN-Normung (vgl. Beucker & Hinterholzer, 2021).

Übersicht der analysierten Studien

Abbildung 9 Methodik und geographische Region der Studien im Cluster Smart Buildings



Technopolis und IÖW, 2024

- Methodisch dominieren Fallstudien sowie Simulationen und Modellierungen.
- Es gibt relativ viele Studien aus Deutschland zum Potenzial von Gebäudeautomation und Smart-Home-Systemen.

Untersuchte Anwendungen und Schlüsseltechnologien

Tabelle 6 Digitale Schlüsseltechnologien im Cluster Smart Buildings

	Gebäudeautomation	Smart Home ⁶	Building Information Modelling ⁷
Mögliche Umweltfreundliche Anwendungen der digitalen Technologien	<ul style="list-style-type: none"> • Intelligente Steuerung der Heizung und Trinkwarmwasserzubereitung • Energieeffiziente Steuerung von Beleuchtung und Kühlung • Integration von überschüssigem erneuerbarem Strom (Sektorkopplung) • Kombination von Gebäudeautomation mit Sanierungsmaßnahmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Prozessmonitoring und Automatisierung (z. B. Regulierung der Raumtemperatur durch Nutzer*in oder Empfehlungen für Energieeinsparungen) • Große Bandbreite des Umfangs von Smart-Home-Paketen (auch nicht energierelevante Komponenten) 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung von Energieverbrauch in Bau- und Entsorgungsphase, aber auch im Bestand • z. B. Einsatz im seriellen Sanieren
Anzahl von untersuchten Studien	12 Studien	5 Studien	2 Studien

Technopolis und IÖW, 2024

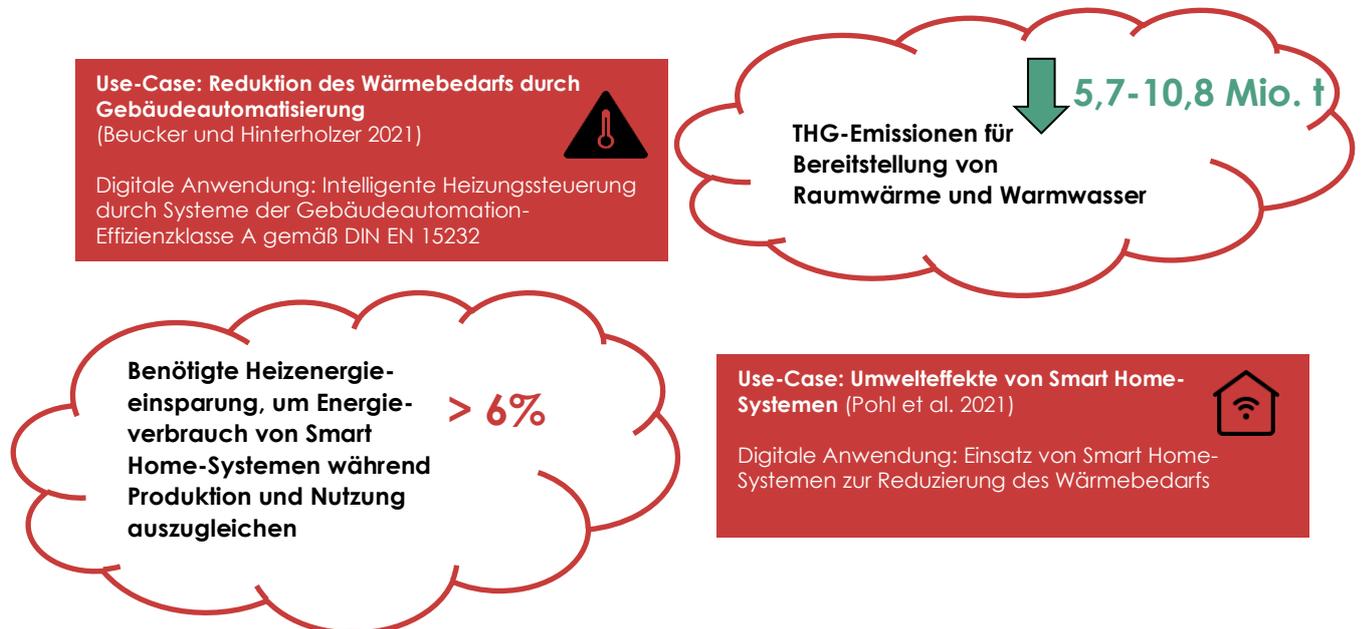
- Im Vergleich zu anderen Bereichen ist bei digitalen Technologien aus dem Bereich Smart Buildings eine **Konzentration auf vergleichsweise wenige digitale Lösungen** zu beobachten.
- Im Fokus stehen vor allem Technologien zur Erhöhung der Effizienz.
- Herausragende Bedeutung haben insbesondere **intelligente Messtechnik** und darauf aufbauendes Energiemanagement und **Gebäudeautomation**.
- Auch die **Revision der EU-Gebäuderichtlinie** (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD) zielt auf das Heben der Potenziale von Gebäudeautomation ab: Geplant ist eine Ausweitung der Vorschriften für Gebäudeautomation auf mittelgroße gewerblich genutzte Gebäude sowie für Wohngebäude auf Neubauten und bei tiefgreifenden Sanierungen (EPRS, 2022).
- Das Potenzial von **Building Information Modelling** zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs wird betont, es fehlen jedoch Quantifizierungen der Potenziale.

⁶ Unter Smart Home wird die Vernetzung und (Nutzer-)Steuerung von Geräten auf der Wohnungsebene verstanden, zu der neben Haushaltsgeräten und Energiemanagement auch Sicherheit (z. B. Alarm- und Überwachungstechnik) oder auch Entertainment (z. B. Musik) gehören können (Pohl et al., 2021). Hierdurch gibt es Überschneidungen zur Gebäudeautomation. Smart Home-Systeme haben allerdings häufig eine deutlich kürzere Lebensdauer als die aus dem Business-to-Business stammenden Gebäudeautomations-Systeme. Dies hat Auswirkungen auf die Ökobilanzen.

⁷ Building Information Modelling (BIM) ermöglicht die digitalisierte und vernetzte Lebenszyklusanalyse von Bauprojekten von der Planung über den Bau bis zum Betrieb.

Quantifizierte Effekte

Abbildung 10 Ausgewählte Umwelteffekte digitaler Technologien im Cluster Smart Buildings



Technopolis und IÖW, 2024

- Substanzielles **Einsparpotenzial durch Gebäudeautomation**: In Abhängigkeit der Marktdurchdringung in Wohn- und Nichtwohngebäuden könnten allein für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser im Jahr 2030 **bis zu 1,5% der deutschen Treibhausgasemissionen** eingespart werden (ohne Berücksichtigung direkter Effekte bzw. von Emissionen der digitalen Technologien über den Lebenszyklus und etwaiger Rebound-Effekte (vgl. Beucker & Hinterholzer, 2021).
- Energieverbrauch und Emissionen während der **Produktion und Nutzung von Smart-Home-Systemen reduziert die Einsparpotenziale deutlich**.
- Smart-Home-Systeme enthalten neben einem Monitoring des Energieverbrauchs und entsprechenden Steuerungsmöglichkeiten häufig auch komfortorientierte Komponenten, die z. B. auf Sicherheit oder Entertainment abzielen.
- Hinsichtlich von Luft- und Wasseremissionen sind Smart-Home-Systeme eine Belastung für die Umwelt, da bei der Produktion mehr Emissionen anfallen, als in der Nutzungsphase eingespart werden (Pohl et al., 2021).

Art der analysierten Umwelteffekte

Tabelle 7 Direkte und indirekte Effekte im Cluster Smart Buildings

Direkte Effekte (Ressourcenaufwand für Produktion und Nutzung digitaler Technologien)	Indirekte Effekte durch die Nutzung digitaler Technologien (enabling effects)	Weitere Indirekte Effekte (z. B. Rebound-Effekte)
<ul style="list-style-type: none"> • Energieaufwand für Nutzung von Technologien der Gebäudeautomation fällt im Vergleich zum Einsparpotenzial in der Regel kaum ins Gewicht (Aretz et al., 2022) • Bei Smart-Home-Systemen ist der Ressourcenaufwand während Produktion und Nutzung im Vergleich zum Einsparpotenzial sehr viel relevanter (Pohl et al., 2021) • In seltenen Fällen kann auch bei Gebäudeautomation der Energieaufwand die Einsparungen übersteigen (z. B. falls Gebäude vor Einsatz digitaler Technologien kaum beheizt wurden (Beucker & Hinterholzer, 2021) 	<ul style="list-style-type: none"> • Substanzielles Potenzial von Energie- und Treibhausgas-einsparungen durch intelligente Steuerung von Heizungsanlagen (z. B. im Rahmen von Gebäudeautomation) • Mit zunehmender Elektrifizierung und dem Ausbau Erneuerbarer Energien immer größer werdende Potenziale durch intelligente Sektorenkopplung (z. B. flexible Nutzung von Wärmepumpen, bidirektionales Laden von E-Autos) (Beucker & Hinterholzer, 2021) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nicht beabsichtigte indirekte Effekte wie Rebound-Effekte, die den Ressourcenverbrauch erhöhen, werden selten und meist nur qualitativ diskutiert; die Relevanz wird als verhältnismäßig gering eingeschätzt (Beucker & Hinterholzer, 2021; Pohl et al., 2021b) • Smart Home-Technologien, die den Energieverbrauch verringern (v.a. Heizungssteuerung), können zum Kauf von zusätzlichen Smart-Home-Services anregen, die den Ressourcenverbrauch nicht verringern (z. B. Komfort, Sicherheit, vgl. Pohl et al., 2021)

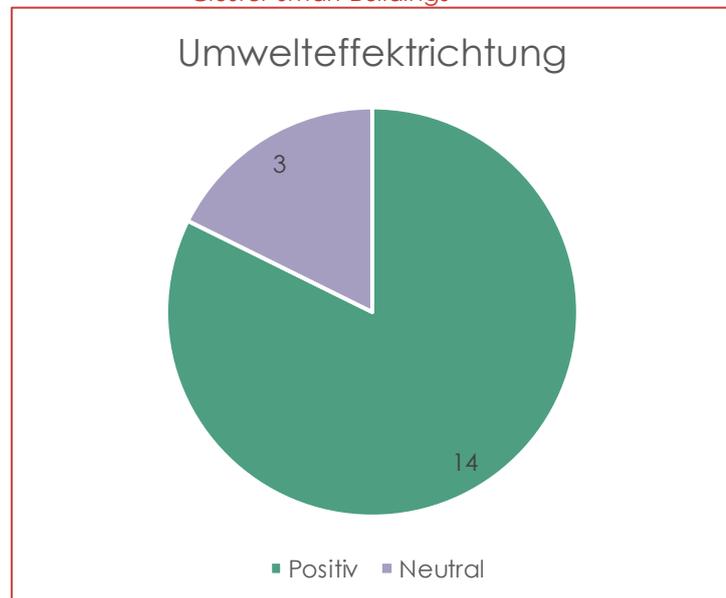
Technopolis und IÖW, 2024

- Die Umweltentlastungen der Einsparpotenziale durch Gebäudeautomation übersteigen die Umweltbelastungen des Ressourcenaufwands für Produktion und Nutzung digitaler Technologien zumeist deutlich.
- Bei Smart Home-Systemen, die eher auf Komfort ausgerichtet sind und häufig eine kürzere Lebensdauer haben als Systeme der Gebäudeautomation, fällt der direkte Ressourcenverbrauch hingegen im Vergleich zu den Einsparpotenzialen deutlich stärker ins Gewicht.
- Das größte Einsparpotenzial bieten intelligente Steuerungstechniken, die auf den Wärmeverbrauch von Gebäuden abzielen.
- Die Relevanz von Rebound-Effekten wird als verhältnismäßig gering eingeschätzt.

Übergeordnete Effektrichtung der untersuchten Studien

- In vier von fünf Studien werden positive Umwelteffekte gefunden.
- Keine Studie findet negative Effekte auf die Umwelt.

Abbildung 11 Effektrichtung der analysierten Studien im Cluster Smart Buildings



Technopolis und IÖW, 2024

3.1.4 Forschungslücken aus der Literaturliteraturanalyse

Die identifizierten Studien im Bereich Energiesysteme decken nur einen Teil der digitalen Anwendungsfälle aus den Kategorien Systemgleichgewicht, Prozessoptimierung und Kundenorientierung ab. Im Cluster Smart Grid dominieren Studien, die die energiesystemischen Umweltwirkungen von Smart Charging auf den Strommix untersuchen und relativ gut beschreiben. Im Cluster **fehlen Studien zu Quantifizierungen des intelligenten Einsatzes bestimmter Energietechnologien** wie Wärmepumpen und kleiner Batteriespeicher, **sowie für konkretere Anwendungen** bzw. Use Cases von Technologien (z. B. verschiedene Tarifanwendungsfälle von Smart Metern). Die meisten quantifizierten Studien im Gebäudebereich konzentrieren sich auf die Nutzungsphase von Gebäuden und insbesondere auf Technologien der Gebäudeautomation. Es konnten außerdem nur verhältnismäßig **wenig Studien mit Fokus auf Nichtwohngebäude** identifiziert werden. Eine wenig erforschte Technologie trotz erwarteter Potenziale ist darüber hinaus das Building Information Modelling, das z. B. für seriell Sanieren eingesetzt werden kann (vgl. Clausen et al., 2022). Die nicht oder wenig untersuchten Felder im Bereich Energiesysteme betreffen darüber hinaus die Anwendungsbereiche Predictive Maintenance und Dienstleistungsprozesse für die Abrechnung und Kundenkommunikation.

Mit Blick auf die Breite der Studien ist auffällig, dass es für viele Anwendungen an empirischen Daten fehlt, sodass die Studien eher Potenziale als gesicherte Effekte darstellen. Dies erklärt auch den hohen Anteil an Studien, die mit Hilfe von Simulationen durchgeführt wurden. Mit der weiteren Verbreitung der Anwendung ist daher eine **Ausweitung der empirischen Datenbasis aus der realen Nutzung** von digitalen Anwendungen und der **offene Datenzugang** wünschenswert (z. B. aus Begleitprogrammen zum Smart Meter Roll-out) – u.a. für die Bewertung verschiedener Umwelteffekte und darüber hinaus, z. B. als Grundlage für das Training intelligenter Systeme.

Lediglich in einigen LCA-Studien werden die **Umweltwirkungen über THG-Emissionen hinaus** dargestellt. Weitere Wirkungskategorien wie Ressourcenverbrauch, Wasserverbrauch, Toxizität etc. sollten zukünftig verstärkt berücksichtigt werden, insbesondere, weil in Zukunft mit einem immer weniger CO₂-intensiven Strommix Wirkungskategorien aus der Herstellung und Entsorgung von erneuerbaren Energietechnologien relevanter werden (insbesondere der Ressourcenverbrauch).

Die direkten Umwelteffekte der Digitalisierung (Lebenszyklus der IKT) werden in den Studien häufig nicht berücksichtigt, sodass der Netto-Umwelteffekt nicht abschließend bewertet werden kann. Die Veröffentlichungen, die direkte Effekte analysieren, stellen aber **durchgehend Kompensationspotenziale durch indirekte Effekte der Digitalisierung** und somit Netto-Umweltentlastungen fest. Weitere, potenziell negative Effekte der Digitalisierung auf lokaler Ebene, die wenig untersucht werden, sind z. B. der Einfluss einer intelligenten Steuerung auf die Lebensdauer der Energietechnik (z. B. Degradationseffekte bei Batterien oder Effizienzen von Wärmepumpen) und Interaktionseffekte digitaler Anwendungen mit den Nutzenden (Rebound- und Suffizienz-Effekte).

Eine weitere **Forschungslücke sind umfassendere und wissenschaftlich unabhängige Abschätzungen für Hochlaufeffekte** von digitalisierten Energiesystemen. Bislang werden für Gesamtabbildungen (bislang v.a. Auftragsstudien) üblicherweise die Ergebnisse von Einzelanalysen linear hochskaliert, wobei nicht-lineare Effekte (z. B. Netzengpässe, Unterschiede in Größenklassen von technischen Einheiten, Abnutzungs- und Early-Adopter-Effekte, Übertragbarkeit auf soziale Milieus) vernachlässigt werden und zu Fehleinschätzungen über die Potenziale und Folgen einer großflächigen Einführung digitaler Anwendungen führen können. Für die weitere Erforschung von Effekten aus der Interaktion von digitalen Anwendungen mit den Nutzenden und Effekten auf das Energiesystem wird in den Studien mitunter eine **stärkere interdisziplinäre Zusammenarbeit** vorgeschlagen, z. B. durch Kombinationen der LCA mit Methoden aus der Sozialforschung und Umweltpsychologie sowie aus der Energiesystemanalyse.

Die zu erwartende, **millionenfache Verbreitung** von digitalen Anwendungen im Energiebereich ist zugleich ein unmittelbarer Hebel für die direkten Umwelteffekte und somit **Multiplikator sowohl für die damit verbundenen Chancen als auch Risiken**. Bei den direkten Effekten (Geräteherstellung, -nutzung und -entsorgung, Datentransfer) ist die Frage, wie Vorgaben für Geräteeffizienz, Langlebigkeit und Reparierbarkeit sowie Datensparsamkeit die Auswirkungen von mehreren Millionen Geräten reduzieren können (z. B. eine datensparsame Messung und Kommunikation oder das Submetering beim Smart Metering, bei dem eine Kommunikationseinheit für mehrere Messstellen genutzt wird). Dies stellt sowohl eine Forschungslücke als auch eine Herausforderung für politische Akteure dar. Eine weitere Forschungs- und Gestaltungsfrage im Energiebereich ist, wie negative Umwelteffekte (z. B. Rebound-Effekte) reduziert und potenziell positive Umweltwirkungen gestärkt werden können, z. B. durch Verhaltensanpassungen.

Kaum untersucht ist zudem die ökologische **Wirkung der regulatorischen Rahmenbedingungen und Anreizsetzungen** im Energiebereich. So kann es beispielsweise sein, dass der anvisierte, flexiblere und damit umweltfreundlichere Betrieb von Energietechnologien mit Hilfe der Digitalisierung technisch möglich, aber finanziell unattraktiv (z. B. aufgrund fixer Netzentgelte) oder regulatorisch nicht darstellbar (z. B. wegen fehlender Ausgestaltung des Energiewirtschaftsgesetzes wie im Fall von EnWG § 14a und 14c) ist.

3.2 Klimaschutz und -anpassung

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den Folgen der Digitalisierung auf den allgemeinen Klimaschutz sowie auf Maßnahmen der Klimaanpassung. Die Auswirkungen digitaler

Technologien und Anwendungen auf das Klima gehören zu den wichtigsten analysierten Umwelteffekten in den in dieser Studie untersuchten Themenfeldern. Das Themenfeld Klimaschutz ist daher ein Querschnittsthema mit vielen Überschneidungen zu anderen Bereichen, vor allem den Feldern Energiesysteme, Nachhaltiges Wirtschaften und Primärwirtschaft.

Um Doppelungen zu vermeiden, fokussiert sich das Themenfeld Klimaschutz auf makroökonomische Gesamtbetrachtungen und Studien zu den Gesamt-THG-Emissionen und Nachhaltigkeitspotenzialen digitaler Technologien. Für das Themenfeld Klimaschutz wurde im Anschluss an die Literaturanalyse eine Fokusgruppe mit Expert*innen durchgeführt. Das Feld der Klimaanpassung umfasst alle Bereiche, in denen die Digitalisierung genutzt werden kann, um sich effektiv auf zukünftige Klimaveränderungen vorzubereiten und potenzielle negative Ereignisse zu vermeiden beziehungsweise deren Schäden zu minimieren. Der Bereich der Klimaanpassung weist bestimmte Besonderheiten im Vergleich zu den anderen Themenfeldern auf. Da es bei der Anpassung an den Klimawandel, nicht primär um die Reduktion von Treibhausgasen und des Energieverbrauchs geht, stellen Energieeinheiten (CO₂-Ausstoß) nicht den angemessenen Indikator zur Beurteilung der Wirkkraft digitaler Innovationen in diesem Bereich dar. Vielmehr steht der Schutz der Bevölkerung von Ökosystemen und Infrastruktur durch Prognosen, Vorhersage und entsprechende Anpassungsmaßnahmen im Vordergrund. Der Nutzen digitaler Technologien wird daher danach beurteilt, inwieweit sie die Praxis der Klimaanpassung optimieren und befähigen können.

Tabelle 8 stellt die wichtigsten Schlüsseltechnologien, Anwendungsbeispiele, Umweltchancen und -risiken sowie eine Einschätzung zur Studienlage für die Themenfelder Klimaschutz- und Klimaanpassung dar.

Tabelle 8 Digitale Schlüsseltechnologien im Themenfeld Klimaschutz und Klimaanpassung

Relevante Schlüsseltechnologien 	IKT gesamt 	KI & Big Data 
Funktionsweise 	Erzeugung, Speicherung, Verarbeitung und Nutzung von Informationen Effektive Bereitstellung von Vernetzungs- und Transaktionsmöglichkeiten	Algorithmische Verarbeitung großer Mengen an Daten Automatisierung und Monitoring komplexer Prozesse
Ausgewählte Anwendungsbeispiele 	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung mobiler Endgeräte (Handy, Laptops, Smart Watch, etc.) • Vernetzung digitaler Geräte • Transaktionsmöglichkeiten durch Blockchain • Kommunikation und Informationsvermittlung 	<ul style="list-style-type: none"> • Verschiedenste Arten von Prognosen (z. B. Wetter, Stromerzeugung, Anlagenzustand/ Wartungsbedarfe oder Energieflüsse) • KI-Nutzung zur Modellierung und Simulation in der Klimaforschung • Digitale Twins zur Klimamodellierung • Überwachung und Steuerung von individuellen Produktkreisläufen sowie Liefer-/ und Wertschöpfungsketten
Umweltchancen 	<ul style="list-style-type: none"> • Effizienzsteigerung, Substitutionseffekte & Ressourceneinsparungen durch digitale IKT-Dienstleistungen • Verringerung von Transaktionskosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Präzisere Prognosen und validere Klimamodelle durch Einbeziehung großer Datenmengen und algorithmischer Verarbeitung

	<ul style="list-style-type: none"> • Nachhaltige Veränderung von herkömmlichen Prozessen, Umgang mit Komplexität 	<ul style="list-style-type: none"> • Steuerung & Automatisierung komplexer Planungs- & Entscheidungsprozesse • Nachhaltige Veränderung von herkömmlichen Prozessen, Umgang mit Komplexität
Umweltrisiken 	<ul style="list-style-type: none"> • Zunahme des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen durch eine Zunahme der IKT-Nachfrage und Datenströme • Risiko für Rebound- und Obsoleszenz-Effekte 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Energie- und Ressourcenbedarf für Datenspeicherung und -verarbeitung, insbes. KI-Training und -Anwendung sowie in der Forschung
Effekte auf THG-Emissionen 	<p>IKT macht bis zu 4% der globalen THG-Emissionen aus. TGH-Einsparungen z. B. durch Effizienzsteigerungen werden global betrachtet verringert durch Auslagerung der energieintensiven Produktion digitaler Geräte</p>	<p>Positiver Effekt im Bereich Klimaanpassung, dort besteht ein großes Potenzial durch verbesserte (Wetter-) Prognose</p>
Studienlage: Quantifizierungen von Umweltwirkungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Studienlage mit Blick auf den allgemeinen Zusammenhang zwischen IKT und CO₂-Emissionen • Schwierigkeiten komplexe Folgen wie Rebound- und Obsoleszenz-Effekte quantitativ zu erfassen 	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Studienlage mit Blick auf Emissionen durch den Einsatz von KI und anderen digitalen Anwendungen • KI als potenziell disruptive Technologie im Bereich Klimaanpassung, Ausmaß der Umwelteffekte aber noch unklar

Technopolis und IÖW, 2024

3.2.1 Literaturanalyse

Überblick

Unter Einbeziehung der Studien, die Klimaeffekte in anderen Themenfeldern untersuchen, fallen in das Themenfeld **Klimaschutz** insgesamt 65 Studien. Um Doppelungen zu vermeiden, liegt der Fokus des Themenfeldfazits Klimaschutz auf übergreifenden Betrachtungen der Klimaeffekte von Digitalisierung. Dadurch reduziert sich die Anzahl der einbezogenen Studien auf 28. Dies beinhaltet zum einen die direkten Klimaeffekte von digitaler Infrastruktur und zum anderen gesamtwirtschaftliche oder -gesellschaftliche Auswirkungen von Digitalisierung und ihre Emissionswirkungen. Zu den wichtigsten digitalen Technologien für den Klimaschutz gehören IKT im allgemeinen, KI & Big Data.

Für den Bereich **Klimaanpassung** wurden insgesamt 9 relevante Studien identifiziert und tiefer analysiert. Bei diesen Studien handelt es sich um Fallstudien unter Einbeziehung und Analyse von Primär- und Sekundärdaten oder um reine literaturgestützte Analysen. KI und Big Data sowie IoT gehören zu den relevantesten digitalen Technologien in diesem Themenbereich.

Identifizierte Effekte und Effektgrößen

Die im Themenfeld **Klimaschutz** analysierten Studien untersuchen sowohl direkte als auch indirekte Umwelteffekte der Digitalisierung. Der **direkte Effekt von KI und digitalen Endgeräten** (mit Blick auf Herstellung, Nutzung und Verwertung) auf das Klima ist insgesamt negativ im Sinne von **steigenden THG-Emissionen**. Produktion und Nutzung elektronischer digitaler Geräte (Handys, Computer, Video-Konsolen etc.) machen etwa 1,5 bis 4% der weltweiten THG-Emissionen aus (Bordage, 2019; Andrae, 2020; Bieser, Hintemann, et al., 2023). Der CO₂-Ausstoß durch die Nutzung digitaler Plattformen wie TikTok, Facebook, Netflix und YouTube liegt je nach Berechnungsmethode bei 72 g bis 280 g CO₂-Äq. pro Stunde (Batmunkh, 2022). Auch durch

das Training von Künstlicher Intelligenz entstehen THG-Emissionen. Cows et al. (2023) haben diese am Beispiel von Chat-GPT-3 analysiert und beziffern die Emissionen, die bei einem Trainingsdurchlauf entstehen mit 93 t bis 942 t CO₂-Äq. abhängig von der Region, in der das Training der KI stattfindet (und dem dortigen Strommix). Auch in Dodge et al. (2022) ist die Höhe der THG-Emission, die durch KI und Cloud-Computing entsteht, maßgeblich von der Region, in der die Cloud-Computing-Infrastruktur steht, beeinflusst. Abhängig von der Nutzung von KI kann so bei einer Anwendung mit einem Ausstoß von 10g bis 10.000kg CO₂-Äq. einhergehen.

Neben diesen direkten emissionssteigernden Effekten birgt die Digitalisierung gleichzeitig positive Potenziale im Sinne einer Emissionsminderung. Die **indirekten Effekte** von Cloud-Computing können beispielsweise emissionsreduzierend sein: Eine Studie des Borderstep-Instituts kommt auf Basis mehrerer Fallstudien zu dem Ergebnis, dass die Umstellung auf Cloud-Arbeitsplätze die pro Arbeitsplatz verursachten THG-Emissionen durchschnittlich um 35% reduzieren kann (Clausen et al., 2022). Eine Studie aus der Schweiz kommt ebenfalls zu dem Schluss, dass der Einsatz von 5G im Vergleich zu 2-4G Netzwerken das Potenzial besitzt, THG-Emissionen zu reduzieren (Bieser, Salieri, et al., 2023). Das Emissionsminderungspotenzial von Digitalisierung wird auch von anderen Studien bestätigt: Studien mit Fokus auf die indirekten Klimaeffekte von Digitalisierung in verschiedenen Bereichen wie Landwirtschaft oder Energiesystemen beschreiben meist einen emissionsmindernden Effekt (siehe die entsprechenden Themenfeldfazits in diesem Bericht).

Auch **makroökonomische Betrachtungen** der Klimaeffekte von Digitalisierung (im Fokus steht IKT) finden überwiegend positive Effekte der Digitalisierung. Generell zeigt sich seit 2020 eine Zunahme der Studien, die den Zusammenhang zwischen IKT und THG-Emissionen analysieren, was auch die politische Relevanz dieser Fragestellung betont (Briglauer et al., 2023).

Eine Paneldatenanalyse, in der der Einfluss der Digitalisierung auf THG-Emissionen in 34 OECD-Ländern untersucht wurde, kommt zu dem Ergebnis, dass die emissionsreduzierenden Effekte der IKT überwiegen und die Digitalisierung eine Netto-Reduktion der THG-Emissionen bewirken kann (Briglauer & Köppl-Turyna, 2021). Eine weitere Studie kommt zu dem Schluss, dass eine Zunahme an Softwareproduktion für IKT mit einer Reduktion von CO₂-Emissionen einhergeht, ein Anstieg in IKT-Hardware hängt hingegen mit einer Steigerung der CO₂-Emissionen zusammen (Chi & Meng, 2023). Ulucak et al. (2020) legen in einer Untersuchung von BRICS Ländern zwischen 1990 bis 2015 dar, dass ein Anstieg der IKT um 1% mit einer Reduktion von CO₂-Emissionen um 0.30% einhergeht. Edquist und Bergmark (2023) berichten in ihrer Studie, dass ein Anstieg des mobilen Breitbandausbaus um 10% mit einem Rückgang der CO₂-Emissionen um 7% einhergeht.

Insgesamt dominiert der Trend, dass der Anstieg von IKT-Infrastruktur mit einer Reduktion von THG-Emissionen verbunden ist. Dies gilt vor allem für Länder des globalen Nordens, die auch als entwickelte Länder bezeichnet werden und in der Regel einen höheren Wohlstand aufweisen (J. Zhang et al., 2019). Dieses Muster kommt vor allem dadurch zustande, dass die klimaintensive Produktion von digitalen Technologien in Ländern des globalen Südens verlagert wird. Damit werden die positiven Emissionsminderungseffekte der IKT-Nutzung in diesen Ländern ausgeglichen, was insgesamt zu einer beobachtbaren Steigerung der THG-Emissionen in Zusammenhang mit der IKT-Nutzung führt (Briglauer et al., 2023).

Neben THG-Emissionen sind der Energie- bzw. Stromverbrauch wichtige Indikatoren für die Klimaeffekte von Digitalisierung. Hier zeigt sich bisher ein uneindeutiges Bild, inwieweit IKT zu einer Reduktion oder Steigerung des Energieverbrauchs beiträgt (Axenbeck et al., 2022; Axenbeck & Niebel, 2021; Magazzino et al., 2021). Für den Energieverbrauch ist der Strommix und der Anteil der erneuerbaren Energien entscheidend für die schlussendliche Klimaauswirkung des IKT-Gebrauchs (Briglauer et al., 2023). Bei einigen Gesamtbetrachtungen werden auch gesamtwirtschaftliche Indikatoren genutzt (Cao et al., 2023; Kowal et al., 2022).

Zudem wurden auch Studien identifiziert, die keine quantitativen Ergebnisse liefern, jedoch **qualitative Potenziale digitaler Technologien für den Klimaschutz** aufzeigen. Im Rahmen des Fachdialogs Blockchain wurde zum Beispiel betont, dass **Blockchain-Technologien** aufgrund ihrer Manipulationssicherheit, Irreversibilität sowie Dezentralität und Transparenz bei entscheidenden klimapolitischen Regulierungen eingesetzt werden können. Damit kann die Verwaltung des Emissionshandels sowie die allgemeine Realisierung der Klimaziele erleichtert werden (Märkel et al., 2023). Im Falle von Blockchain-Technologien steht jedoch noch aus, ob ihr massiver Energiebedarf die positiven Potenziale übersteigen könnte.

Die relevanten Studien im Bereich der **Klimaanpassung** berichten **indirekte und positive Effekte** der Digitalisierung. Diese positiven Effekte kommen dadurch zustande, dass digitale Anwendungen das **Verständnis** für durch den Klimawandel verursachte Veränderungen vertiefen und die **Vorhersagbarkeit** von potenziellen negativen Klimafolgen verbessern und damit auf solche Veränderungen reagieren zu können.

Deep Learning-Ansätze besitzen zum Beispiel das Potenzial zu präziseren Wettervorhersagen zu kommen als übliche Rechenmethoden (Dewitte et al., 2021; Espeholt et al., 2022). Erst im November 2023 wurde veröffentlicht, dass ein KI-gestütztes Modell zur Wettervorhersage, das mit vergangenen Wetterdaten trainiert wurde, energieeffiziente und präzise Vorhersagen treffen kann. Diese sind teilweise präziser als Ergebnisse herkömmlicher Methoden, wie etwa die Berechnungen des Supercomputers des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersagen (ECMWF) (Lam et al., 2023). Genauere und schnellere Wetterprognosen können in Zukunft dabei unterstützen, betroffene Bevölkerungsgruppen zu warnen und adäquate Vorkehrungen für extreme Wetterereignisse zu treffen. Zudem besitzen KI-Anwendungen das Potenzial, bei der Modellierung des Erdsystems zu unterstützen und damit das Verständnis zukünftiger klimatischer Entwicklungen zu vertiefen (Irrgang et al., 2021). Mithilfe digitaler Tools (Sensoren, smarte Geräte wie die Smart Watch) können zudem Klima-bezogene Daten (z. B. Temperatur) mit anderen relevanten Parametern wie Gesundheitsdaten integriert werden, um so besonders vulnerable Gruppen besser zu schützen (Barteit et al., 2023). Außerdem können Sensoren und andere Monitoring-Geräte in Kombination mit IoT-Technologien Echtzeit-Daten liefern, die das Verständnis für klimabezogene Veränderungen, z. B. für die Entwicklung urbaner Wälder vertiefen (Matasov et al., 2020). Prinzipiell können auch solche Forschungsarbeiten zu einer optimierten Klimaanpassung beitragen, die sich mit Smart Agriculture auseinandersetzen und damit die Nahrungsmittelsicherheit beispielsweise durch eine effektivere Wassernutzung verbessern (Balasundram et al., 2023; Devi, 2023).

Neben technischen Potenzialen können relevante gesellschaftliche Ansatzpunkte wie Bildung und Aufklärung durch digitale Tools aufgegriffen werden. So können passende Apps auf digitalen Geräten wie Handys, Tablets etc. dabei unterstützen, die Kompetenzen von Schüler*innen in Bezug auf die Folgen des Klimawandels zu fördern (Wankmüller et al., 2022).

Tabelle 9 zeigt exemplarisch zwei Studien, die das positive Potenzial der Digitalisierung für den Klimaschutz und die Klimaanpassung veranschaulichen.

Tabelle 9 Ausgewählte Studien für das Themenfeld Klimaschutz und -anpassung

Autor und Jahr	Titel	Erkenntnisse
Briglauer & Köppl-Turyna (2021)	Die Auswirkung der Digitalisierung auf THG-Emissionen: Theoretische Einzeleffekte und empirische Abschätzung des Gesamteffekts	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie: allg. Digitalisierung bzw. IKT • Scope/Gegenstand: Die genutzten Paneldaten beziehen sich auf 34 OECD-Länder im Zeitraum von 2002 bis 2019 • Methodik: Mithilfe linearer panelökonomischer Modelle sogenannter „two-way Fixed Effects“-Modelle, wurde, unter Berücksichtigung diverser Kontrollvariablen, die Auswirkung der IKT auf die THG-Emissionen analysiert. • Effekte: Generell zeigt sich, dass positive, also CO₂-senkende, Effekte von IKT solche, die zu einer Erhöhung des Emissionsausstoßes führen, übersteigen.
Müller et al. (2022)	Features predisposing forest to bark beetle outbreaks and their dynamics during drought	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie: Nutzung von Maschinellern Lernen zur Modellierung eines Befalls eines Waldes durch Borkenkäfer • Scope/Gegenstand: Die genutzten „Big Data“ beziehen sich auf eine süd-schwedische Waldfläche innerhalb eines Zeitraums von 2018 bis 2020 • Methodik: Random Forest Modellierung wurde genutzt, um die Dynamik des Waldstücks zu simulieren und damit einen Befall durch Borkenkäfer vorherzusagen. • Effekt: georäumliche Daten konnten genutzt werden, um die Prädisposition für das Risiko eines Borkenkäferbefalls akkurat vorherzusagen. Hierdurch kann die Forstwirtschaft den Wald effektiver schützen.

Technopolis und IÖW, 2024

Chancen und Herausforderungen

Die Analyse der identifizierten Literatur zeigt, dass die Nettoauswirkungen der Digitalisierung auf den **Klimaschutz** nicht einfach zu bestimmen sind. Direkte Effekte der Digitalisierung stellen aufgrund des hohen Energieverbrauchs digitaler Endgeräte und Infrastruktur eine Herausforderung für den Klimaschutz dar. Demgegenüber stehen indirekte Effekte wie Optimierungseffekte, die beispielsweise durch **Energieeffizienzsteigerungen** einen Beitrag zum Klimaschutz leisten können. Effizienzsteigerungen können jedoch auch **Rebound- und Obsoleszenz-Effekte**⁸ zur Folge haben, die zu einer Erhöhung statt zu einer Minderung der Umwelt- und Klimabelastung durch digitale Tools führen (Briglauer et al., 2023; Schmidt, 2023; Wright et al., 2023). Daher sollten nicht nur Effizienzgewinne, sondern die Entwicklung von nachhaltigeren digitalen Innovationen berücksichtigt werden (Stichwort Green KI, die so ressourcenschonend wie möglich ist) und die Effektivität in Bezug auf den Klimaschutz miteinbezogen werden. Viele Faktoren, wie komplexe Interdependenzen und Verhaltensänderungen beeinflussen dabei die indirekte Umweltauswirkung digitaler Technologien. Auch die Nutzungsdauer digitaler Geräte spielt eine entscheidende Rolle (Clausen et al., 2022). Viele makroökonomische Studien bestätigen das positive Gesamtpotenzial digitaler Infrastruktur für den Klimaschutz. Die meisten Studien, die Gesamtbetrachtungen durchführen, kommen zu einer positiven Einschätzung des Gesamtpotenzials der Digitalisierung auf Klimaschutz, berücksichtigen allerdings nicht immer relevante vor- und nachgelagerten Effekte. Insbesondere wenn eine geographische

⁸ Obsoleszenz bezeichnet die vorzeitige Entsorgung von noch funktionsfähigen IKT-Komponenten im Zuge der Einführung neuer Technologien

Diskrepanz zwischen dem Auftreten vor- und nachgelagerter Effekte und dem Hauptnutzungsort besteht.

Für die tatsächliche Realisierung der Klimaschutzpotenziale digitaler Technologien und Anwendungen spielen jedoch die **politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingen** eine wichtige Rolle (Clausen et al., 2022). Im besten Fall kann der politische und rechtliche Kontext dabei unterstützen, dass digitale Technologien ressourcenschonender und nachhaltiger gestaltet werden, zum Beispiel durch den Einsatz erneuerbarer Energien im Bereich Digitalisierung. Vor allem die Herstellung, Nutzung und Entsorgung digitaler Technologien sollte auf Langlebigkeit, Reparaturfähigkeit und Ganzheitlichkeit ausgerichtet sein und dabei auch zu einer Konsum- und Verhaltensänderung beitragen (Clausen et al., 2022). Ein weiteres praktisches Beispiel für die Auswirkungen förderlicher gesellschaftlicher Rahmenbedingungen ist das digitale Arbeiten im Homeoffice und die damit verbundenen potenziellen CO₂-Einsparungen durch eine Reduktion der Pendel-Mobilität. Erst durch die Veränderungen des politischen Rahmens während der Pandemie wurden diese technischen Möglichkeiten ausgeschöpft. Gleichzeitig, ist noch unklar, wie sich eine stärkere Inanspruchnahme des digitalen Arbeitens auf den faktischen CO₂-Ausstoß auswirken wird, da auch diese Entwicklung mit komplexen Rebound-Effekten einhergehen kann (Cerqueira et al., 2020; Clausen et al., 2022; Santos & Azhari, 2022).

Für den Bereich der **Klimaanpassung** gilt, dass digitale Errungenschaften in zweierlei Hinsicht positive Potenziale bieten: Sie können zum einen dabei unterstützen, langfristige Strategien zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels zu entwickeln, indem sie zur Erhebung vielfältiger Daten und zu einem vertieften Verständnis beitragen. Zum anderen können digitale Tools die Reaktionsfähigkeit auf akute bereits heute auftretende Umweltereignisse wie Fluten und Hitzewellen verbessern. Hier spielen Frühwarnsysteme und ein smartes Management von Ressourcen eine bedeutende Rolle (D. Wang, 2023).

Negative Effekte und Risiken der Digitalisierung in Bezug auf die Anforderungen der Klimaanpassung können auf Basis der identifizierten Literatur nicht eingeschätzt werden, da sich keine identifizierte Studie mit solchen Potenzialen beschäftigt hat. Im Allgemeinen ist es schwer abzuschätzen, ob der Nutzen digitaler Technologien für die Klimaanpassung ihre Kosten und negativen Einflüsse auf die Umwelt (z. B. der intensive Energieverbrauch) aufwiegen kann.

3.2.2 Forschungslücken aus der Literaturanalyse

Im Rahmen dieser Studie wurden vor allem Veröffentlichungen identifiziert, die die Auswirkungen digitaler Anwendungen auf THG-Emissionen für konkrete technische Anwendungen untersuchen. Die Gesamtpotenziale der Klimaeffekte von Digitalisierung, die sowohl vorgelagerte Umweltauswirkungen, die beispielsweise bei der Produktion digitaler Endgeräte entstehen, als auch nachgelagerte Effekte wie Rebound- und verhaltensinduzierte Effekte berücksichtigen, werden nur selten quantifiziert. Eine besondere Herausforderung besteht dabei darin, dass die in Einzelbetrachtungen gefundenen Effekte häufig nicht einfach addierbar sind, sondern Wechselwirkungen und mögliche Überschneidungen berücksichtigt werden müssen. Dafür müssten die Auswirkungen der Digitalisierung aus der Systemperspektive betrachtet und modelliert werden. Um auch Verhaltenseffekte stärker in Gesamtbetrachtungen einfließen lassen zu können, bedarf es mehr Forschung zur Quantifizierung von Rebound-Effekten. Zudem sind die Akzeptanz von und der Umgang mit neuen digitalen Anwendungen von entscheidender Bedeutung für die Realisierung der Klimaschutzpotenziale. Es liegen jedoch nur wenige Studien vor, die den Einfluss politischer Rahmenbedingungen auf diese Faktoren untersuchen.

Für den Bereich der Klimaanpassung ist es besonders von Bedeutung, gezielte Forschungsvorhaben durchzuführen, die die Wirkung und Effektivität von Digitalisierung für die

Klimaanpassung überprüfen. Damit soll sichergestellt werden, dass die wirkungsvollsten Technologien nicht nur im kleinen Maßstab eingesetzt, sondern schnell und effektiv verbreitet werden. Auf lange Sicht sollte sich der Frage angenähert werden, wie der positive Effekt dieser Technologien in Relation zu den negativen Nebenwirkungen (wie z. B. entstehenden Umweltbelastungen) maximiert werden kann.

3.2.3 Ergebnisse der Fokusgruppe „Klimaschutz“

Für den Bereich Klimaschutz wurde ebenfalls eine Fokusgruppe durchgeführt, wie sie im Methodenteil bereits näher erläutert wurde (vgl. Kapitel 3.2). An der Fokusgruppe nahmen sechs Personen aus den Bereichen Forschung und Gesellschaft teil, wobei verschiedene akademische Hintergründe vertreten waren (u. a. die Perspektive der technischen Machbarkeit, der Rechtswissenschaft und der Ökonomie). Dieser Abschnitt fasst die Ergebnisse zusammen und ordnet sie mit Bezug auf die vorgenommene Literaturanalyse (3.2.1 und 3.2.2) ein.

Wichtige Technologien und Anwendungen

In der Fokusgruppe wurden daher zahlreiche Technologien und Anwendungsfälle als relevant eingestuft, die systematische Querverbindungen zu anderen Themenbereichen wie Kreislaufwirtschaft, Mobilität und Energiesysteme aufwiesen. Für den Bereich Klimaschutz als übergreifende wirtschaftliche und gesellschaftliche Aufgabe wurden weniger konkrete digitale Anwendungen als relevant genannt, sondern vielmehr die Digitalisierung als notwendiger Teil eines grünen Transformationsprozesses diskutiert (Twin Digital & Green Transition).

Als relevante **Schlüsseltechnologien** für den Klimaschutz wurden von den Teilnehmenden der Fokusgruppe **KI und Big-Data-Anwendungen** genannt. KI-Anwendungen könnten insbesondere zur Steuerung komplexer Planungs- und Entscheidungsprozesse und deren Automatisierung beitragen. Dies würde zum Beispiel Multi-Stakeholder-Entscheidungsprozesse erleichtern, wie sie im Kontext klimapolitischer Entscheidungssituationen vorlägen. Insgesamt bestätigte sich in der Diskussion der Teilnehmenden die Erkenntnis der Literaturanalyse, dass Technologien wie **KI und IKT im Allgemeinen** eine große Rolle für den Klimaschutz spielen.

Das Potenzial zum **Umgang mit komplexen Herausforderungen und Prozessen** wurde als allgemeiner relevanter Hebel digitaler Technologien und Anwendungen betont, die auf diese Weise eine befähigende Rolle in der notwendigen sozialökologischen Transformation herkömmlicher Systeme einnehmen könnten. Digitale Anwendungen könnten unter anderem zur Optimierung von Planungsprozessen beitragen und auf diese Weise eine beschleunigte Transformation und den Infrastrukturbau unterstützen. Digitale Lösungen seien auch relevant für die **Kommunikation und Informationsvermittlung** an die Bevölkerung in ihrer Rolle als Bürger*innen und Konsument*innen.

Darüber hinaus wurden **IoT-Anwendungen** zur besseren Überwachung und Steuerung von individuellen Produktkreisläufen sowie Liefer-/ und Wertschöpfungsketten genannt (z. B. durch Einsatz des digitalen Product Passports). Auch **digitale Plattformen** würden ein vielversprechendes Hilfsmittel für nachhaltige Konsumententwicklungen darstellen. Nachhaltige Mobilität durch beispielsweise App-gestützte Vernetzung von Transportmöglichkeiten und gesteigerte Energieeffizienz mithilfe digitalen Demand Response Managements der Stromnachfrage wurden ebenfalls als entscheidende Aspekte für den Klimaschutz herausgegriffen. Im Bereich der Klimamodellierungen wurden **digitale Twins** als vielversprechende Technologie benannt.

Umweltchancen und -risiken der Digitalisierung

Die von den Expert*innen genannten **Chancen** der Digitalisierung für den Klimaschutz, decken sich mit denen, die in der Literaturanalyse identifiziert wurden. Dabei handelt es sich vor allem um **Effizienz- und Substitutionseffekte**, die man sich von digitalen Anwendungen verspreche. Diese Effekte würden vor allem durch eine verstärkte Automatisierung, die dynamische Vernetzung von Stakeholdern, den zielgerichteten Einsatz von Ressourcen und eine Stärkung der Kreislaufwirtschaft zustande kommen.

Diesen Potenzialen stehen jedoch bedeutsame **Risiken** für den Klimaschutz gegenüber. Schwierigkeiten, intelligente Anwendungen miteinander zu verbinden und Synergien zu schaffen wurde als Risiko für eine effiziente und ressourcenschonende Anwendung identifiziert. Diese Herausforderung der energieeffizienten Ausrichtung und Verknüpfung digitaler Tools steht in Zusammenhang mit dem Problem der **Rebound-Effekte**, das als prominenter Risikofaktor benannt wurde⁹. Um Rebound-Effekten entgegenzuwirken, seien klare politische Rahmensetzungen notwendig, um digitale Anwendungen an ihrer klimapolitischen Nützlichkeit auszurichten. Eine rein technische Betrachtung digitaler Optionen verleihe ihren schädlichen Klimaeffekten Auftrieb, wenn sie nicht in eine nachhaltige Gesamtausrichtung integriert würden.

3.2.4 Forschungslücken und Handlungsempfehlungen aus der Fokusgruppe „Klimaschutz“

Für eine zukünftige Forschungsagenda an der Schnittstelle zwischen Digitalisierung und Klimaschutz wurden verschiedene Forschungslücken von den Expert*innen herausgegriffen. Auf deren Basis wurden konkrete Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Aus methodischer Sicht bedarf es zunächst einer verbesserten und valideren **Operationalisierung der Digitalisierung**. Im Moment habe sich laut Einschätzung der Expert*innen noch keine zufriedenstellende Methodik zur Erfassung der Digitalisierung oder der digitalen Ausstattung eines Landes etabliert. Insbesondere sollte in wissenschaftlichen Arbeiten zwischen produkt- und konsumbasierten Emissionen unterschieden werden. Gerade in makroökonomischen Studien sollte auch zwischen Klimaeffekten von Mobilfunk im Vergleich zur stationären Internetnutzung differenziert werden. Eine präzisere Betrachtung des Untersuchungsgegenstandes Digitalisierung würde eine realistischere Bewertung des Umweltbeitrags digitaler Technologien ermöglichen.

Eine weitere Herausforderung bei der methodischen Vorgehensweise sei die **Emissionsbilanzierung** einzelner Anwendungen und Technologien, aber vor allem die Einschätzung der Klimaeffekte der Digitalisierung allgemein. Die Produktion der Hardware und damit verbundene Emissionen finde häufig in Ländern des globalen Südens statt, wohingegen die Nutzung der Hardware, die Optimierung der Software und CO₂-Einsparungen durch Anwendung digitaler Technologien tendenziell eher im globalen Norden realisiert würden. Dies könne zu einer Auslagerung von CO₂-Emissionen in Länder des globalen Südens führen und berge das Risiko der systematischen Untererfassung von CO₂-Emissionen in Analysen, die nicht den gesamten Produktlebenszyklus berücksichtigten, sondern beispielsweise einen Fokus auf Emissionseinsparungen durch Software-Entwicklung in Industrieländern legen. Hier sei mehr Forschung zur korrekten Erfassung der gesamten Emission digitaler Technologien notwendig.

⁹ Am Beispiel digitaler Plattformen wurde der schmale Grat zwischen Chance und Risiko für den Klimaschutz veranschaulicht. So könnten digitale Plattformen den nachhaltigen Konsum im Sinne von ReUse und ReCommerce oder mithilfe von Nudging-Methoden erleichtern. Digitale Plattformen sollten in jedem Fall dazu beitragen, dass die nachhaltigste Option leicht verfügbar und zugänglich sind. Aktuell werde jedoch beobachtet, wie digitale Plattformen herkömmlichen Konsum und damit klimaschädliches Verhalten bevorzugen.

Um den **Energieverbrauch digitaler Systeme effektiv zu kontrollieren**, sei außerdem eine verstärkte Forschung zu standardisierten und allgemein anerkannten Methoden der validen Messung des Energieverbrauchs erforderlich. Aktuell könne der Stromverbrauch digitaler Anwendungen noch nicht optimal erfasst werden. Neben verstärkter Forschung seien in diesem Bereich auch politische und juristische Maßnahmen notwendig. Diese sollten relevante Akteure zur verpflichtenden Überwachung und Berichterstattung ihres digitalen Energieverbrauchs anhalten.

Eine zukünftige Forschungsagenda solle außerdem eine starke **interdisziplinäre Perspektive** einnehmen. Wie Digitalisierung als Katalysator für eine nachhaltige Zukunft genutzt werden könne, sei schließlich nicht nur eine Frage der technischen Machbarkeit und Umsetzung, sondern besitze politische, rechtliche, soziale und psychologische Dimensionen. Beispielsweise würden sich **verfassungsrechtliche Fragen** ergeben, die wissenschaftlich beleuchtet werden sollten: Welche Implikationen ergeben sich für (Umwelt-)Grundrechte durch die Einführung von KI oder autonomen Systemen? Welche regulatorischen Hürden für Umweltinnovationen sind sinnvoll? Auch die **sozialpsychologische Forschung** spiele eine bedeutsame Rolle. Diese könne sich zum Beispiel mit den notwendigen Verhaltensänderung der Bevölkerung oder der Vermittlung von Visionen für eine digitalökologische Zukunft auseinandersetzen. Auch solle die Forschung zur tatsächlichen **Messbarkeit und Wertbarkeit sozialer Nachhaltigkeitsaspekte der Digitalisierung** vertieft werden.

In der Fokusgruppe wurde darauf aufmerksam gemacht, dass der aktuelle, politische und wirtschaftliche **Fokus auf technischen Lösungen** bzw. digitalen Anwendungen liege, die keinen klaren oder primären Bezug zum Klimaschutz aufwiesen. Digitalisierung und technische Errungenschaften als Selbstzweck seien jedoch nicht effektiv, um das nachhaltige Potenzial der Digitalisierung auszuschöpfen. Forschungsvorhaben im Kontext der Digitalisierung sollten auf konkrete politische Ziele und Visionen hinsichtlich der Nachhaltigkeit ausgerichtet werden. Voraussetzung einer solchen Ausrichtung sei nach Auffassung der Expert*innen eine **gesamtheitliche digitalökologische Politikagenda**. Diese solle den übergeordneten Rahmen darstellen, an dem sich alle weiteren Entscheidungen orientieren. Dabei solle der Fokus auf der notwendigen Transformation an sich liegen und welchen Beitrag die Forschung zu Digitalisierung und Klimaschutz leisten könne. Diese Perspektive weitet den Blick von den quantitativen technischen Studien hin zu einem holistischen Verständnis der Rolle der Digitalisierung in der sozialökologischen Transformation.

3.3 Stadtentwicklung und urbane Mobilität

Das Themenfeld betrifft die Nutzung digitaler Technologien für mehr Nachhaltigkeit in urbanen Kontexten. Dies umfasst urbane Datenräume, digitale Vernetzung, Monitoring und Evaluation, Plattformen und Sharing, Mobility-as-a-Service sowie Verkehrssteuerung und -management, Transport und Logistik, aber auch städtische Gebäude und Quartiere, die urbane Landwirtschaft, digitale Zwillinge sowie Stadtplanung. Anschließend an eine übergeordnete Literaturanalyse wurden Steckbriefe für die Clusterthemen Smart City (siehe 3.3.2) und Smart Mobility (siehe 3.3.3) angefertigt. Beide wurden mittels Expert*innen-Interviews validiert und ergänzt.

Tabelle 10 stellt die wichtigsten Schlüsseltechnologien, Anwendungsbeispiele, Umweltchancen und -risiken sowie eine Einschätzung zur Studienlage im Themenfeld Stadtentwicklung und urbane Mobilität im Überblick dar.

Tabelle 10 Digitale Schlüsseltechnologien im Themenfeld Stadtentwicklung und urbane Mobilität

Relevante Schlüsseltechnologien 	IoT & KI 	Autonomes Fahren 
Funktionsweise 	Effiziente Überwachung und Steuerung im städtischen Raum durch digital vernetzte Ökosysteme, Prozesse und technische Artefakte (Geräte, Fahrzeuge, Gebäude, etc.)	Effiziente Verkehrsführung im urbanen Raum durch autonome oder hoch-automatisierte Fahrzeugsteuerung
Ausgewählte Anwendungsbeispiele 	<ul style="list-style-type: none"> • Algorithmisch optimiertes Lademanagement für E-Autos • KI-basierte Verkehrssteuerung über Routen, Ampeln und Fahrzeuge • Digital gestütztes Parkplatzmanagement • Integrierte Entwicklung von städtischer Mobilität und Energiewende 	<ul style="list-style-type: none"> • Selbststeuernde Pkw sowie Fahrzeuge in ÖPNV und Logistik
Umweltchancen 	<ul style="list-style-type: none"> • Erfassung, Monitoring und Planung klimafreundlicher und resilienter urbaner Ökosysteme • Geringere Ressourcen-, Schadstoff- und Emissionsbelastung, z. B. durch effiziente Verkehrssteuerung • Senkung des Energieverbrauchs von E-Autos sowie höherer Anteil an erneuerbarer Energie • Energetische Optimierung durch Vernetzung und Steuerung im Gebäudemanagement 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierter Energieverbrauch durch effizientere Fahrweise und Routen • Zunehmende ÖPNV-Nutzung durch Einbindung autonomer Fahrzeuge in intermodale Mobilitätsketten • Effizientere Auslastung von Verkehrswegen durch vernetztes Fahren, z. B. Platooning (automatisierte Kolonnenführung) • Verlagerung von Straßengüterverkehr auf die Schiene durch effizientere Möglichkeiten in der autonomen Logistik
Umweltrisiken 	<ul style="list-style-type: none"> • Rebound-Effekte durch bloße Optimierung bestehender (nicht nachhaltiger) Verkehrssysteme mittels Digitalisierung • Verstetigung von Mobilitätskonzepten durch Förderung technischer Einzellösungen anstatt tiefgreifender Umgestaltung 	<ul style="list-style-type: none"> • Rebound-Effekte (zunehmende Personenkilometer sowie Energieverbrauch) durch stationsloses Fahrzeug-Sharing • Direkte negative Effekte durch erforderliche digitale Infrastruktur • Lock-in-Effekte im motorisierten Individualverkehr
Treibhausgas-Reduktions-potenzial 	 Unklarer Effekt, einerseits Reduktion durch optimierte Verkehrsführung oder Lademanagement , andererseits sind durch Effizienzgewinne im Individualverkehr Rebound-Effekte wahrscheinlich	 Unklarer Effekt, zum einen Reduktion durch optimierte Fahrweise, Routenführung und Platooning , gleichzeitig sind durch Effizienzgewinne im Individualverkehr Rebound-Effekte wahrscheinlich
Studienlage: Quantifizierungen von Umweltwirkungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Studienlage insbesondere im Gebäudebereich, Befunde hier weitgehend positiv • Wenig quantifizierte Effekte im Bereich urbaner Ökosysteme • Internet der Dinge verbindet Mobilitäts- und Energiesysteme und ermöglicht so nachweislich höhere Energieeffizienz 	<ul style="list-style-type: none"> • Gemischte Befunde hinsichtlich möglicher Nachhaltigkeitseffekte • Hohe Unsicherheiten durch frühes Entwicklungsstadium der Technologie sowie einflussreiche System- und Verhaltensvariablen • Wechselwirkungen mit (autonomem) ÖPNV sind unterrepräsentiert • Ergebnisse stützen sich meist auf Modellierungen und Simulationen

3.3.1 Literaturanalyse

Überblick

Für das Themenfeld wurden systematisch Studien recherchiert, die sich mit digitalen Technologien und entsprechenden Anwendungskonzepten in urbanen Kontexten befassen bzw. diese erproben. Entsprechende Stichworte sind beispielsweise Smart City, urbane Datenräume, digitale Vernetzung, Plattformen und Sharing, Mobility-as-a-Service sowie Verkehrssteuerung und -management, Transport und Logistik, aber auch städtische Gebäude, Quartiere, urbane Landwirtschaft, digitale Zwillinge sowie Stadtplanung. Es wurden insgesamt 37 Studien identifiziert, die Effekte der Digitalisierung im Themenfeld „Stadtentwicklung und urbane Mobilität“ untersuchen und quantifizieren. Der am häufigsten herangezogene Indikator für ökologische Nachhaltigkeitseffekte liegt in diesen Studien in der **Berechnung bzw. Abschätzung von CO₂-Äq. – besonders häufig in Arbeiten zur urbanen Mobilität**. Die analysierten Forschungsarbeiten stützen sich in ihren Analysen hauptsächlich auf Sekundärdaten.

Als zentrales Technologiefeld im Bereich der Stadtentwicklung sticht das **Internet der Dinge** hervor. Es lässt sich oft nahtlos mit Konzepten der Smart City und Smart Grids verbinden. Auch ein Großteil der identifizierten Studien zur städtischen Mobilität ist eng mit der digital gesteuerten Verteilung und Speicherung elektrischen Stroms verwoben. Viele Studien zeigen, dass **Elektromobilität und städtischer Verkehr zunehmend miteinander verschmelzen**. Die größte Schnittmenge der identifizierten Studien weist das Themenfeld „Energiesysteme“ auf.

Identifizierte Effekte und Effektgrößen

Im Bereich der Stadtentwicklung werden potenzielle Effekte deutlich häufiger beschrieben als faktische Effekte. Die Ergebnisse aller hier identifizierten Studien vermitteln in etwa drei Vierteln der Fälle positive Effekte, z. B. in Form **verbesserter Klima- oder Energiebilanzen**. Auch die Studien zur Digitalisierung der urbanen Mobilität schätzen mehrheitlich potenzielle Effekte ab. Dabei konstatieren fast alle positive Nachhaltigkeitseffekte. Die Dienlichkeit digitaler Technologien für Nachhaltigkeitsbelange **hängt im Verkehr oft von einflussreichen Faktoren ab, unter denen die Digitalisierung selbst lediglich einer von vielen** ist. Nur vereinzelt auftauchende Untersuchungsbereiche zur digitalen Stadt befassen sich etwa mit städtischem Ökosystemmonitoring (Matasov et al., 2020) oder Konzepten einer digital optimierten Hafenlogistik (Gonzalez et al., 2021).

In Stadtentwicklung und Verkehrsmanagement kommen immer wieder digitale Werkzeuge zum Einsatz, die zwar Transparenz und Kontrolle stärken, etwa mittels großflächiger Sensorik (Akkad et al., 2022; Matasov et al., 2020; Nguyen & Jung, 2021), aus sich selbst heraus jedoch noch keine direkten positiven Effekte mit sich bringen. Dennoch machen **sie indirekt Potenziale und Steuerungsoptionen** sichtbar, die Umwelt und Klima zugutekommen können. Digitale Daten aus dem Internet der Dinge wirken somit eher als indirekter, **ermöglicher Faktor**. Die Rolle solcher Planungs- und Überwachungsinstrumente ist nicht zu unterschätzen, auch wenn die quantifizierbaren Effekte lediglich darauf aufbauen. Digital getriebene Forschungsmethoden, insbesondere Modellsimulationen, nehmen eine ähnliche Rolle ein. Sie liefern wertvolle Entscheidungsgrundlagen, auch wenn sie lediglich potenzielle Effekte aufzeigen bzw. abschätzen.

Martin et al. (2022) zeigen anhand empirischer Daten zum realen Ladeverhalten von 78 batterieelektrischen Fahrzeugen in der Schweiz, dass **algorithmisch gesteuertes Lademanagement** sehr effektiv sein kann, um möglichst hohe Anteile selbst produzierten PV-

Stroms zu nutzen und Treibhausgasemissionen einzusparen. Bereits mit einem vergleichsweise einfachen digitalen Steuerungsmodell ließen sich demzufolge Einsparungen von 2,93 kg CO₂-Äq. pro Fahrzeug und Woche dadurch erzielen, dass gezielt PV-Strom von Dächern derjenigen Häuser genutzt wird, in denen Fahrzeugbesitzerinnen und -besitzer wohnen. Übertragen auf den deutlich CO₂-intensiveren durchschnittlichen Strommix in Deutschland wären die ermittelten absoluten Einsparungen etwa 2,5-mal so hoch (7,29 kg CO₂-Äq. pro Fahrzeug und Woche). Nutzen die Haushalte zusätzlich Stromspeicher (13,5 kWh / 4,6 kW) zur Glättung von Angebots- und Nachfragespitzen, lassen sich die Emissionseinsparungen durch algorithmische Optimierung laut der vorgenommenen Modellrechnungen um weitere 7% erhöhen. Eine maximale Einsparung von 10,78 kg CO₂-Äq. pro Fahrzeug und Woche ließe sich mit dem gegenwärtigen Deutschen Strommix realisieren, wenn das Lademanagement so programmiert ist, dass das Verhältnis von selbsterzeugtem PV-Ladestrom zu örtlichem Netzstrom maximiert wird.

In Modellrechnungen zu einer realen japanischen Gemeinde mit Stromnachfragespitzen bis 57 kW konnten Wang et al. (2023) zeigen, dass sich Lastspitzen mit einem ähnlichen Ansatz um rund 43% reduzieren lassen. Erzeugungs- und Verbrauchseinheiten werden als **virtuelles Kraftwerk** zusammengefasst, in dem dezentrale Speicher bedarfsgerecht entweder eine zeitweise lokale Vorhaltung oder Rückeinspeisung von PV-Strom ermöglichen. Die dadurch erzielte Reduzierung von THG-Emissionen beträgt rund 16% unter den dortigen Bedingungen (Japanischer Strommix). Die vorgeschlagene Lösung ermöglicht eine vollständige Selbstversorgung der untersuchten Gemeinde mit auf lokalen Gebäudedächern erzeugtem PV-Strom. Die darin integrierte Installation digital vernetzter End- und Steuerungsgeräte ist mit einer positiven Investitionsrentabilität zudem betriebswirtschaftlich attraktiv – insbesondere für Wohngebäude. Die höchsten Energieeinsparungen liegen jedoch bei Gewerbe- und Bürogebäuden. Bei einem schrittweisen Rollout diverser „smarter“ Geräte innerhalb der Kommune amortisieren sich zuerst solche zur intelligenten Innenraumbeleuchtung.

Tabelle 11 Ausgewählte Studien für das Themenfeld Stadtentwicklung und urbane Mobilität

Autoren und Jahr	Titel	Erkenntnisse
Martin et al. 2022	Using rooftop photovoltaic generation to cover individual electric vehicle demand—A detailed case study	<ul style="list-style-type: none"> • Simulation algorithmisch gesteuerter Lademanagement-Paradigmen anhand realer Ladezyklen von 78 Elektroautos • Optimierung hinsichtlich maximalem Eigenanteil verbrauchten PV-Stroms von zugehörigen Wohngebäuden sowie Integration dezentraler elektrischer Energiespeicher • Durchweg positive Effekte: sinkender Energiebedarf sowie Treibhausgasemissionen (bis 10,8 kg CO₂-Äq. pro Fahrzeug und Woche) • Relevant für Smart City, Smart Grid und Smart Mobility
Wang et al. 2023	Techno-economic analysis of the transition toward the energy self-sufficiency community based on virtual power plant	<ul style="list-style-type: none"> • Modellierung eines virtuellen Kraftwerks in Japan mit digital optimierten Speicher- und Verbrauchseinheiten (z. B. Raumbeleuchtung) • Durchweg positive Effekte: Reduzierung von Lastspitzen um 43%, Reduzierung von THG-Emissionen um 16% (Strommix Japan) • Relevant für Smart City und Smart Grid, insbesondere für Büro- und Gewerbegebäude

Technopolis und IÖW, 2024

Chancen und Herausforderungen

In der Stadtentwicklung finden Studien zu Nachhaltigkeitseffekten der Digitalisierung meist auf Quartiers- oder kommunaler Ebene statt und hängen sehr häufig direkt oder indirekt mit der

Energieversorgung zusammen. Ein international präsenster Forschungsbereich besteht in der Analyse von Potenzialen zur **lokalen bzw. regionalen Selbstversorgung mit Strom aus erneuerbaren Energien**, die mit der zunehmenden Dezentralisierung des Energiesystems an Bedeutung gewinnt. Auch die mit der Digitalisierung ebenfalls voranschreitende Kopplung der Sektoren Energie und Mobilität rückt im urbanen Raum besonders eng zusammen. Digital gesteuerte Laderegimes können Strommärkte und -netze stabilisieren und dabei helfen, den Energieverbrauch des Gesamtsystems zu senken. Wissenschaftliche Studien zu intelligentem Lademanagement und virtuellen Kraftwerken zeigten in den letzten Jahren vielversprechende Ergebnisse mit Blick auf Kosten- und Energieeffizienz sowie Treibhausgasemissionen. Sehr häufig werden diese Effekte digital modelliert bzw. simuliert.

Die Anwendung von Künstlicher Intelligenz (insbesondere Methoden des maschinellen Lernens) spielt im Rahmen der hier untersuchten Studien im Bereich der Mobilität eine größere Rolle als in der Stadtplanung und -entwicklung. Beispielsweise lassen sich Fahrzeugrouten, Kolonnen oder Ampelschaltungen mit Hilfe maschineller Lernverfahren so verändern, dass **Straßen effizienter genutzt werden und Energieverbräuche von Fahrzeugen sinken** (Ballis & Dimitriou, 2020; Ye, 2019). Hier sind jedoch **gleichzeitig erhebliche Risiken** zu erwarten, dass Rebound-Effekte die zunächst positiven Auswirkungen nach einiger Zeit deutlich reduzieren oder sogar umkehren könnten. Beispielsweise bleibt auch mit zunehmender Digitalisierung die Herausforderung bestehen, den Umweltverbund (ÖPNV, Rad- und Fußverkehr) gegenüber dem motorisierten Individualverkehr zu stärken. Im Mobilitätsbereich scheint eine vergleichsweise starke Fokussierung der Forschung auf Effizienzsteigerungen innerhalb bestehender Systeme vorzuherrschen. Studien, die neben optimiertem Autoverkehr auch den öffentlichen Nahverkehr und die Förderung seiner Inanspruchnahme in den Blick nehmen (S. Zimmermann et al., 2023), bilden in der identifizierten Studienauswahl die Ausnahme.

Durch ihre hohe Populationsdichte bringen Städte viele Effizienzpotenziale mit sich, die in ländlichen Räumen nicht bestehen. Sie sollten daher unbedingt ausgeschöpft werden. Energie- und Mobilitätskonzepte sind durch die zunehmende Elektrifizierung zumindest in Modellstudien und Pilotprojekten bereits häufig eng verwoben (Calise et al., 2021; Martin et al., 2022; Mattoni et al., 2019). Dieser strukturelle Vorteil urbaner Umgebungen für die Sektorenkopplung sollte genutzt werden. Häufige Fragen scheinen zu sein, welche Daten hierfür jeweils benötigt werden, wie sie unter realen Bedingungen erhoben, verwaltet und ggf. kuratiert werden können, wer hierfür verantwortlich ist und wie sie bestmöglich genutzt und geteilt werden können.

3.3.2 Smart City (Cluster-Steckbrief)

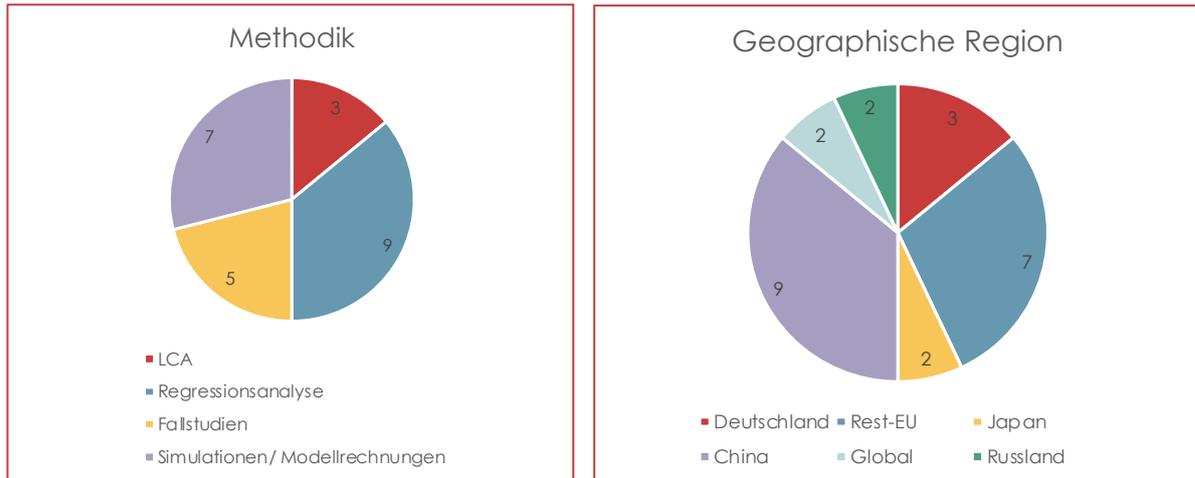
Eingrenzung des Clusters

Das Clusterthema „Smart City“ umfasst Aspekte der digital unterstützten oder ermöglichten Stadt- und Quartiersplanung, vernetzte Distrikte, urbane Ökosysteme sowie Anwendungsfälle im städtischen Wasser- und Abfallmanagement. Es wurde auf Basis von Studien entwickelt, die zuvor im Zuge von Recherchen in den Themenfeldern Stadtentwicklung und urbane Mobilität, Kreislaufwirtschaft, Energiesysteme sowie Klimaschutz und -anpassung identifiziert wurden. Der Fokus liegt auf der Anwendungsebene digitaler Technologien.

Übersicht der analysierten Studien

Thematische Schwerpunkte	Stadtplanung	5 Studien
	Luft, Wasser, Ökosysteme	5 Studien
	Abfallmanagement	2 Studien
	Energie	2 Studien

Abbildung 12 Methodik und geographische Region der Studien im Cluster Smart City



Technopolis und IÖW, 2024, n=24

Die identifizierten Studien zum Anwendungscluster „Smart City“ befassen sich überwiegend mit quantitativen Datengrundlagen, wobei sich jeweils in etwa gleich viele auf Primärquellen und Sekundärquellen stützen. Erstere nehmen vorwiegend eigene Messungen und Berechnungen vor, etwa als Bewertung verschiedener algorithmischer Lösungsansätze. Studien, die auf Sekundärdaten zurückgreifen, nutzen insbesondere Regressionsanalysen und andere statistische Auswertungen, es tauchen jedoch auch digital simulierte Lebenszyklusanalysen auf. Fast drei Viertel der Studien konnten faktische Effekte nachweisen.

Untersuchte Anwendungen und Schlüsseltechnologien

Abbildung 13 Digitale Anwendungen und Schlüsseltechnologien im Cluster Smart City

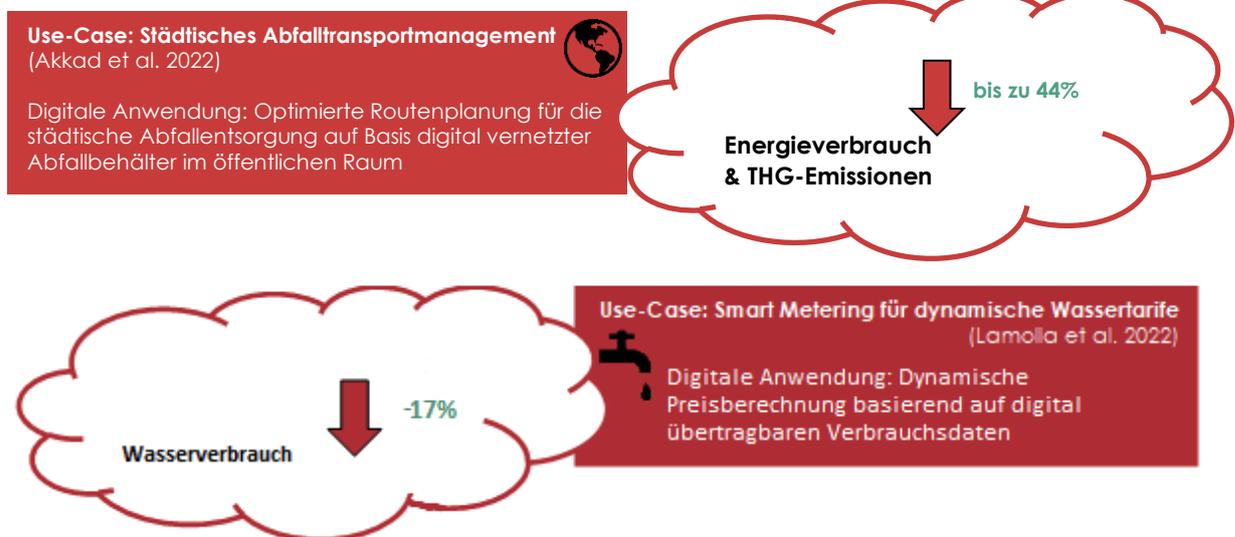
Stadtentwicklung	Abfallmanagement
Digitalisierung allgemein <ul style="list-style-type: none"> Folgen von Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum sowie steigendem Digitalisierungsgrad auf die Luftqualität Einfluss der Digitalwirtschaft und des "double carbon" Ziels auf die Stadt 	Digitalisierung allgemein <ul style="list-style-type: none"> Verringerung von Restabfällen und Ausweitung der Recyclingströme Internet of Things <ul style="list-style-type: none"> Sensorgestützte Effizienzsteigerung
Luft, Wasser, Ökosysteme	Stadtplanung
Digitalisierung allgemein <ul style="list-style-type: none"> Einfluss der Digitalwirtschaft auf industrielle Abwasserentsorgung 	Digitalisierung allgemein <ul style="list-style-type: none"> gezielte Stadtplanung für die Gestaltung einer Smart City mit sektorübergreifender Interdependenz

<ul style="list-style-type: none"> • Folgen von Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum sowie steigendem Digitalisierungsgrad auf die Luftqualität • Einfluss „Grüner Start-ups“ auf die Luftqualität <p>Smart Grid</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wasserverbrauch von Haushalten unter Einfluss von Time-of-use-Tarifen <p>Internet of Things</p> <ul style="list-style-type: none"> • IoT-Überwachung der Ökosystemleistungen von Stadtbäumen 	<ul style="list-style-type: none"> • Minimierung von Ineffizienzen und Modernisierung von Industriezweigen für positive Umwelteffekte • Planungstools für Kommunen, um die Umwelteffekte von Nachverdichtungsmaßnahmen zu kontrollieren • Einfluss der Digitalwirtschaft und des "double carbon" Ziels auf die Stadt <p>Digital Twin</p> <ul style="list-style-type: none"> • Building Information Modelling (BIM) für nachhaltiges Bauen
---	---

Technopolis und IÖW, 2024

Quantifizierte Effekte

Abbildung 14 Ausgewählte Umwelteffekte digitaler Technologien im Cluster Smart City



Technopolis und IÖW, 2024

- Fallstudien in Budapest zeigen, dass durch ein sensorgestütztes Monitoring und algorithmische Routenoptimierung für Entsorgungsfahrzeuge der Energieverbrauch und somit auch die entstehenden **Treibhausgasemissionen städtischer Abfallentsorgung drastisch reduziert** werden können (Akkad et al., 2022). Substanziellere Einsparungen wären mit emissionsfreien Antriebstechnologien möglich.
- Modellsimulationen aus Spanien zeigen, dass eine präzise digitale Erfassung des heimischen Verbrauchs die **genutzten Wassermengen deutlich reduziert** (Lamolla et al., 2022). Time-of-use-Tarife bewirken jedoch in niedrigen Einkommensgruppen die höchsten Einsparungen (25%), wobei diese gleichzeitig die geringsten finanziellen Einsparungen (9%) erzielen.

Art der analysierten Umwelteffekte

Tabelle 12 Direkte und indirekte Effekte im Cluster Smart City

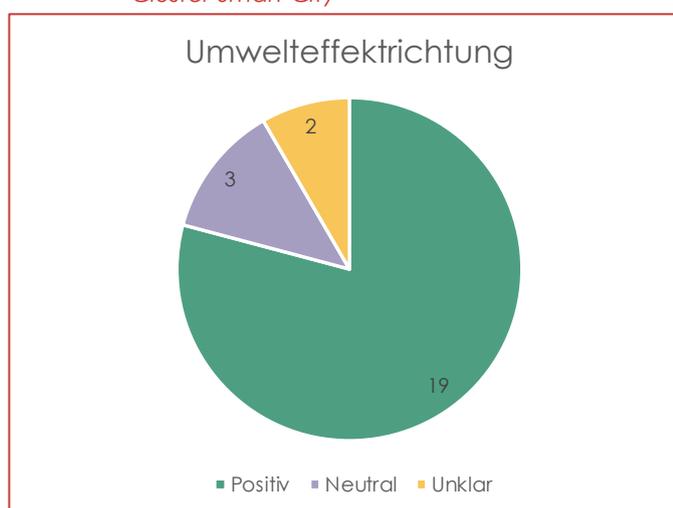
Direkte Effekte (Ressourcenaufwand für Produktion und Nutzung digitaler Technologien)	Indirekte Effekte durch die Nutzung digitaler Technologien	Weitere Indirekte Effekte (z. B. Rebound-Effekte)
<ul style="list-style-type: none"> Ressourcenersparnisse im Neubau in der Smart City im Fokus. Auch Energie- und Wasserverbrauch thematisiert. Müllvermeidung ebenfalls ein zentrales Thema. 	<ul style="list-style-type: none"> Stadtplanung, Vernetzung und intelligentes Monitoring als nachhaltige Wege zur Effizienzsteigerung in der Smart City. 	<ul style="list-style-type: none"> Rebound-Effekte werden kaum thematisiert.

Technopolis und IÖW, 2024

Übergeordnete Effektrichtung der untersuchten Studien

- 19 von 24 Studien finden positive Umwelteffekte der Digitalisierung im Bereich Smart City.
- 3 beziehungsweise 2 Veröffentlichungen berichten von neutralen beziehungsweise unklaren Effekten.

Abbildung 15 Effektrichtung der analysierten Studien im Cluster Smart City



Technopolis und IÖW, 2024

3.3.3 Smart Mobility (Cluster-Steckbrief)

Abbildung 16 Umweltauswirkungen im Verkehrsbereich



Technopolis und IÖW, 2024

Eingrenzung des Clusters

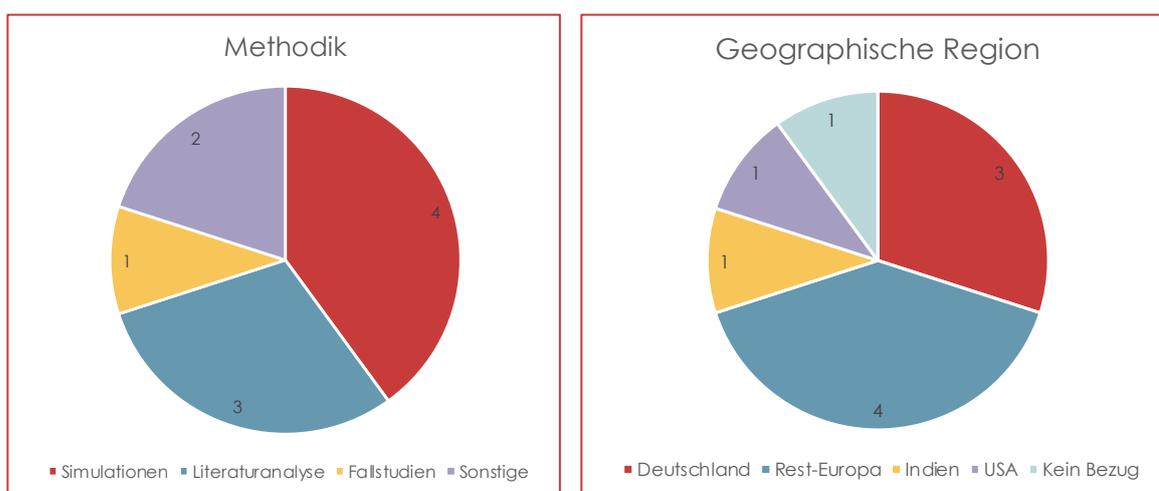
Das Clusterthema „Smart Mobility“ umfasst Aspekte zu Optimierungspotenzialen von Verkehrsflüssen. Dazu zählen neben der Routenplanung im engeren Sinne auch die Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur sowie die Optimierung des Modal Split. Es wird allerdings keine Betrachtung zur Integration von E-Autos im Energiesystem vorgenommen. Der Steckbrief wurde auf Grundlage von Studien entwickelt, die zuvor im Zuge von Recherchen in den

Themenfeldern Stadtentwicklung, urbane Mobilität und nachhaltiges Wirtschaften sowie Klimaschutz und -anpassung identifiziert wurden.

Übersicht der analysierten Studien

Thematische Schwerpunkte	Anzahl der analysierten Studien
Automobiler Verkehr	5 Studien
Logistik	2 Studien
IKT	1 Studie
Sonstige	2 Studien

Abbildung 17 Methodik und geographische Region der Studien im Cluster Smart Mobility

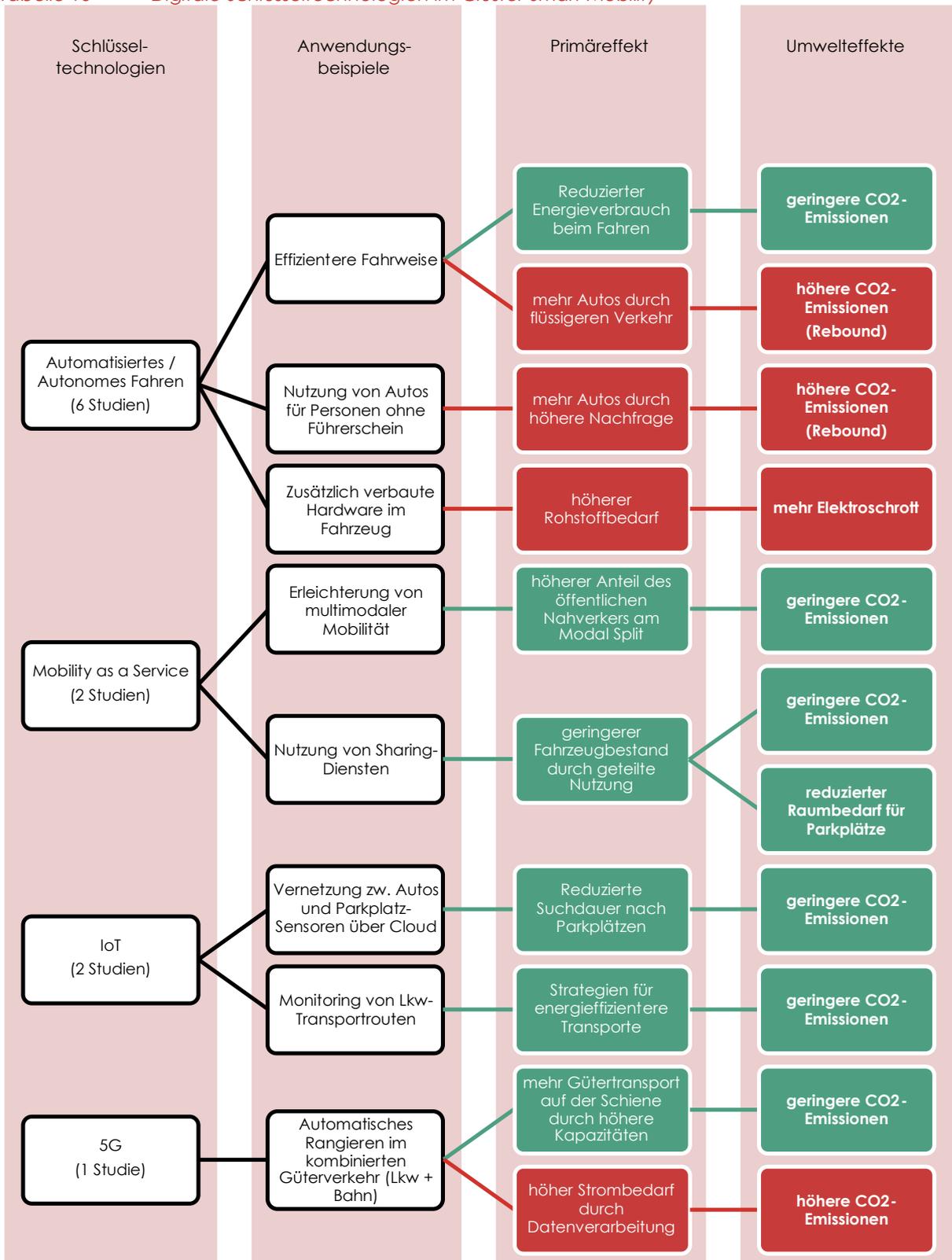


Technopolis und IÖW, 2024

Der überwiegende Teil der Studien beschreibt eine quantifizierte Erfassung von Umwelteffekten der Digitalisierung im Verkehrsbereich, wobei diese auf Simulationen und Literaturanalysen beruhen. Fast alle Studien weisen potenzielle Effekte auf, insbesondere solche, die sich mit dem autonomen Verkehr auseinandersetzen. Thematische Schwerpunkte bilden der automobiler Verkehr und die Logistik. Der öffentliche Personennahverkehr kommt nur vereinzelt vor.

Untersuchte Anwendungen und Schlüsseltechnologien

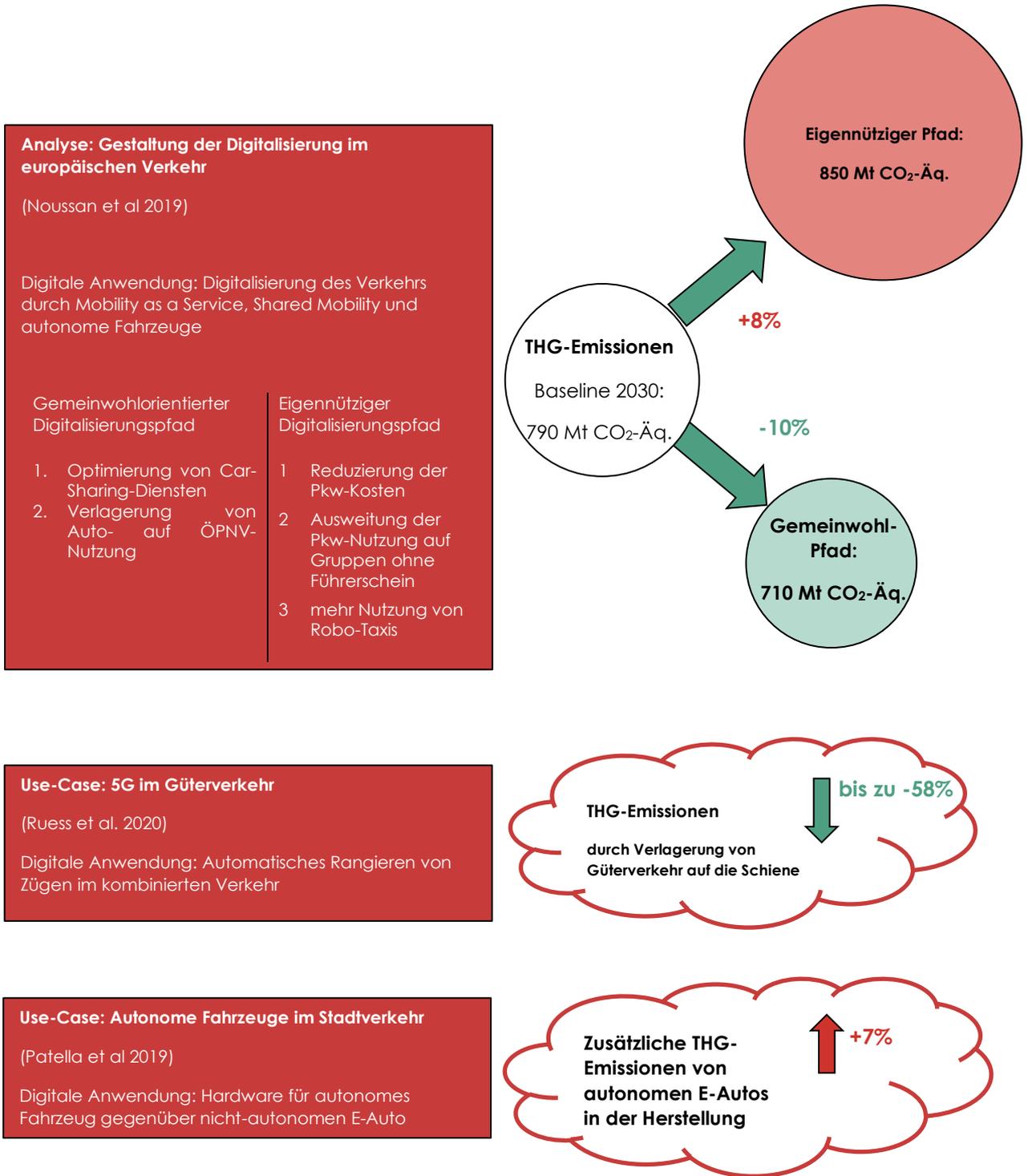
Tabelle 13 Digitale Schlüsseltechnologien im Cluster Smart Mobility



Technopolis und IÖW, 2024

Quantifizierte Effekte

Abbildung 18 Ausgewählte Umwelteffekte digitaler Technologien im Cluster Smart Mobility



Technopolis und IÖW, 2024

Die Studienlage weist darauf hin, dass insbesondere im automobilen Bereich **reine Effizienzgewinne** durch Digitalisierung durch **Rebound-Effekte** kompensiert werden. Emissionssenkende Effekte werden folglich dann erzielt, wenn Effizienzsteigerungen mit einem

veränderten Mobilitätsverhalten einhergehen. Wichtig ist demnach eine gleichzeitige Steigerung der Attraktivität von **Alternativen zum privaten Pkw**, z. B. **ÖPNV** und **Carsharing**. Dies gilt analog dazu auch für den Logistikbereich. So werden Einspareffekte durch eine Verlagerung von Gütertransporten **von der Straße auf die Schiene** erzielt.

Art der analysierten Umwelteffekte

Tabelle 14 Direkte und indirekte Effekte im Cluster Smart Mobility

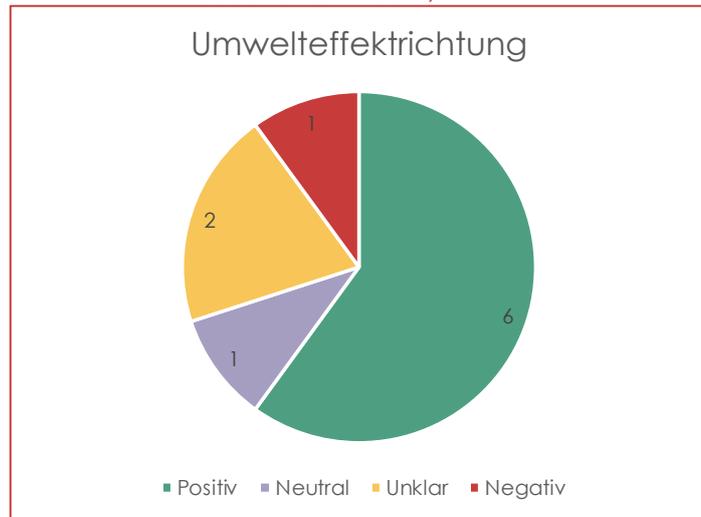
Direkte Effekte (Ressourcenaufwand für Produktion und Nutzung digitaler Technologien)	Indirekte Effekte durch die Nutzung digitaler Technologien (enabling effects)	Weitere Indirekte Effekte (z. B. Rebound-Effekte)
Die Umwelteffekte des Betriebs werden nur in wenigen Studien betrachtet. In nur einer Studie werden die Umwelteffekte der Hardware-Produktion einbezogen.	Der Einfluss der Digitalisierung auf das Verkehrsverhalten steht im Zentrum der analysierten Studien.	Zwei Studien berücksichtigen Rebound-Effekte. Um diesen zu begegnen, werden Anreize zur geteilten Nutzung von Transportmitteln, wie Car-Sharing oder die Nutzung der Bahn als notwendig erachtet.

Technopolis und IÖW, 2024

Übergeordnete Effektrichtung der untersuchten Studien

- Die untersuchten Studien kommen größtenteils zu einer positiven Einschätzung des Umwelteffekts von Digitalisierung im Verkehrsbereich, sofern Rebound-Effekte antizipiert werden. Diese sind auch der Grund für einige neutrale sowie unklare Einschätzungen zu möglichen Effekten.
- Negative Effekte werden in der Herstellung der benötigten Hardware für vollautomatisierte Fahrzeuge gesehen.
- Das Bild wird von der Einschätzung des Interviewpartners ergänzt, der potenziell hohe negative Effekte durch Leerfahrten vollautomatisierter Fahrzeuge sieht.

Abbildung 19 Effektrichtung der analysierten Studien im Cluster Smart Mobility



Technopolis und IÖW, 2024

3.3.4 Forschungslücken aus der Literaturanalyse

Eine positive Gesamtbilanz mit Blick auf digitale Technologien in städtischen Kontexten lässt einerseits auf diverse Anwendungen hoffen, die der Nachhaltigkeit dienen. Gleichzeitig sind die **Untersuchungsbereiche der analysierten Studien oft eng abgesteckt** und blenden mitunter wichtige Faktoren aus, etwa soziale Verhaltensmuster in sozio-technischen Systemen. Es drängt sich der Eindruck auf, dass Studien, die soziale Faktoren miteinbeziehen, im städtischen Kontext unterrepräsentiert sind. So zeigt etwa das Beispiel der dynamischen Wasserbepreisung (Lamolla et al., 2022), dass Anreize zur Einsparung von Ressourcen auch mit Verteilungsfragen

einhergehen können. Positive Nebeneffekte für die Stadt (Bevölkerung), etwa hinsichtlich Resilienz und Gesundheit, tauchen nur selten auf. Dies dürfte auch auf methodische Herausforderungen zurückzuführen sein, ebenso wie die Tatsache, dass längerfristige Substitutions- oder Rebound-Effekte in den analysierten Studien kaum berücksichtigt werden.

Meist wurden auch direkte negative Auswirkungen bereits im Forschungsdesign nicht abgebildet. Für eine kritische und umfassendere Einordnung der dargestellten Ergebnisse wären qualitativ orientierte Studien hilfreich, um effektive und akzeptierte digitale Anwendungen für die nachhaltige Stadt zu identifizieren. Quantitative Effekte können Wirkungszusammenhänge nur sehr begrenzt abbilden. Relevante städtische Regulierungs- und Verwaltungskontexte werden in den Forschungsarbeiten selten berücksichtigt. Von besonderem Wert wären hier integrierte Forschungsansätze: für **Gesamtkonzepte anstatt isolierter Einzelmaßnahmen und -technologien**. Besonders im Mobilitätsbereich fällt auf, dass selten transformative Ansätze untersucht werden, die strukturelle Veränderungen im Verkehrssystem in den Blick nehmen. Vielmehr wird häufig weitere Optimierung (Effizienzsteigerung) bestehender Systeme angestrebt (beispielsweise die Verkürzung von Staus anstatt der Vermeidung von Autofahrten).

Quantifizierungen haben im Allgemeinen eine begrenzte Aussagekraft, da keine Aussagen zur künftigen Verkehrsnachfrage möglich sind. Rebound-Effekte spielen im Mobilitätsbereich eine herausragende Rolle bei der Nachhaltigkeitsbewertung digitaler Technologien. Hier fehlt bislang eine Quantifizierung durch die mögliche Entstehung zusätzlicher ÖPNV-Nutzung. **Schwerpunkt der Untersuchungen sind Pkw-, Lkw- und Bahn-Anwendungen**, flankiert von einzelnen Betrachtungen des Fußverkehrs. Potenziale im Busverkehr wurden in den erfassten Arbeiten nicht untersucht. Intermodale Mobilitätsansätze sind in den erfassten Forschungsarbeiten unterrepräsentiert. Weiterhin fällt auf: Während im Bereich der Stadtentwicklung etwa drei Viertel der identifizierten Studien in wissenschaftlichen Zeitschriften publiziert wurden, traf dies im Falle der urbanen Mobilität wesentlich seltener zu.

Ein gewinnbringender Forschungsschwerpunkt könnte beispielsweise im systematischen Ermitteln von Anwendungsfällen und -bereichen digitaler Technologien liegen, in welchen **Optima ökonomischer und ökologischer Effizienz** nicht kongruent sind. Fälle dieser Art wurden in mehreren Studien sichtbar und sind mit Blick auf politische Steuerungsinstrumente hochrelevant. Inwiefern direkte negative Effekte digitaler Informations- und Kommunikationstechnologien möglichen Energie- und Ressourceneinsparungen entgegenwirken, wird in diesem Themenfeld aktuell kaum erforscht.

3.3.5 Ergebnisse der Fokusgruppe „Stadtentwicklung und urbane Mobilität“

Für einen vertieften Einblick in das Themenfeld „Stadtentwicklung und urbane Mobilität“ wurde eine zweistündige Online-Fokusgruppe durchgeführt (vgl. Kapitel 2). Es nahmen sechs Personen aus Politik, Verwaltung, Zivilgesellschaft und Forschung teil, wobei letztere Akteursgruppe am stärksten repräsentiert war. Urbane Mobilität stand auf Grund des Kompetenzprofils der Gruppe stärker im Vordergrund als andere Fragen der Stadtentwicklung. Dieser Abschnitt fasst die Ergebnisse zusammen und ordnet sie im Lichte der Literaturanalyse (0 bis 3.3.4) ein.

Wichtige Technologien und Anwendungen und damit verbundene Chancen

Mit Blick auf besonders relevante Potenziale wurde den Expert*innen die Frage gestellt: „Was sind die wichtigsten digitalen Technologien und Anwendungen für eine umweltfreundliche Stadtentwicklung und Mobilität?“. Eine mehrheitlich bekräftigte Antwort lässt sich zusammenfassen in der Feststellung, dass ein **„Ranking“ einzelner Technologien für die Forschungsförderung nicht zielführend** sei. Vielmehr verdienten die Rahmenbedingungen ihres Einsatzes verstärkte Aufmerksamkeit, um Fragen der Implementierung und Umsetzung besser verstehen und praktisch adressieren zu können. In anderen Worten: Welche Technologie

positive Nachhaltigkeitseffekte ermöglichen, sei weniger entscheidend als die Frage, wie diese Technologie eingesetzt wird. Um den Nutzen der Digitalisierung für nachhaltige Städte auszuschöpfen, sei insbesondere anzuerkennen, dass sie Werkzeuge bereitstellt, die das Erreichen von Zielen unterstützen können. Diese Ziele müssen jedoch (politisch) klar definiert sein, um in der Folge digitale Technologien effektiv einsetzen zu können.

Für den Kontext städtischer Entwicklung und Mobilität als besonders wichtig hervorgehoben wurden **Digitale Zwillinge und Plattformen sowie digitale Geo- und Fernerkundungsdaten**, etwa zu Baumbeständen, die die Planung nachhaltiger und klimaresilienter urbaner Strukturen ermöglichen. Hier könne und solle, wenn möglich, mittels Crowdsourcing-Ansätzen auch die Stadtbevölkerung einbezogen werden, um Partizipation und Teilhabe zu erhöhen. Digitale Mobilitätsplattformen für **intermodale Routenplanung und -buchung sowie Mobility-as-a-Service-Geschäftsmodelle** wurden in der Fokusgruppe mehrheitlich als vielversprechend eingeschätzt, umweltfreundlicheren öffentlichen Nahverkehr gegenüber dem Individualverkehr zu stärken. Als weitere digitale Anwendungen von hoher Relevanz wurden Chancen des mobilen Arbeitens (verringertes Verkehrsaufkommen) sowie „persuasive Designs“ (digital gestütztes Nudging zu umweltfreundlichem Verhalten) genannt.

Umweltrisiken der Digitalisierung

Um potenzielle Risiken der Digitalisierung zu erfassen, wurde gefragt: „Was sind relevante Umweltrisiken durch digitale Technologien und Anwendungen in Stadtentwicklung und urbaner Mobilität?“. Eine besondere potenzielle Gefahr stellen den Expert*innen zufolge Rebound-Effekte dar – z. B. im Verkehrssystem, jedoch auch generell im Zuge der urbanen Digitalisierung. Auch **könnten ungenutzte Potenziale bleiben, wenn urbane Systeme und Prozesse mit digitalen Lösungen lediglich automatisiert werden**, ohne sie mit Blick auf ihre Nachhaltigkeitseffekte eingehend zu hinterfragen und ggf. entsprechend anzupassen. Beide Risiken gehen den Teilnehmenden zufolge mit einer Form von Technikoptimismus einher, welche die Entwicklung und Förderung „smarter“ Anwendungen für die Stadt der Zukunft häufig präge. Hierbei würden soziale (Verhaltens-)Aspekte nicht immer hinreichend berücksichtigt, was das Potenzial technischer Lösungen unter Umständen dramatisch senken könne. Digitale Lösungen, die „individuell billig“ erscheinen, könnten hohe ökosystemische Kosten externalisieren. Auch die Degradierung von Naturräumen durch digitalen Infrastrukturausbau könne relevante Umweltrisiken bergen, etwa beim Glasfaser- oder 5G-Ausbau.

Als zentrale Herausforderung wurde die Schwierigkeit erwähnt, bereits in frühen, konzeptionellen Entscheidungen die Auswirkungen einer digitalen Lösung auf die Nachhaltigkeit abzuschätzen bzw. zu simulieren. Digitale Technologien würden demzufolge mitunter bereits eingesetzt, ohne gesichertes Wissen darüber zu haben, ob sie ökologisch vorteilhaft sind oder nicht. Hierfür **mangele es neben erforderlichen Daten häufig an geeigneten Methoden**. Besonders im Bereich der städtischen Mobilität zeigten und zeigen sich hier große Unsicherheiten (z. B. fehlende Nutzungsdaten zu E-Scootern). Hinzu kommt laut einer Expertin der Umstand, dass die nachhaltige Mobilitätsentwicklung im ländlichen Raum durch ein strukturell begründetes Überangebot an neuen Lösungen für Städte zunehmend den Anschluss verlieren könnte.

Als riskante Technologie wurde von einem Innovations- und Software-Experten die Blockchain eingeschätzt, da ihr Nutzen (für die Umwelt) in keinem Verhältnis zu ihrem immanent hohen Energieverbrauch stehe. Zudem sei in digitalen Ökosystemen die Abhängigkeit von großen Konzernen problematisch, da Lösungen und deren Designs oft vorgegeben würden. Dies habe nicht selten zur Folge, dass Kommunen auf große Anbieter angewiesen sind, was sie mitunter daran hindert, eigenständig an der Entwicklung von Lösungen zu arbeiten sowie anzupassen und zu administrieren. Dass Einzellösungen und -maßnahmen nicht ausreichen, um Städte

nachhaltig zu machen, werde durch Förderpolitiken nicht immer hinlänglich adressiert. Um tiefgreifende, strukturelle Trendwenden zu nachhaltigen Praktiken in Städten zu erwirken, müssten **gezielte Anreize gesetzt werden, die die Rahmenbedingungen städtischen Lebens spürbar verändern** (etwa über die Attraktivität der Nutzung unterschiedlicher Verkehrsträger). Dies könne durchaus schwierig sein, stoße in Kommunen jedoch zunehmend auf Veränderungsbereitschaft.

3.3.6 Forschungslücken und Handlungsempfehlungen aus der Fokusgruppe „Stadtentwicklung und urbane Mobilität“

Besonders wichtige Erkenntnisgewinne kann den Expert*innen zufolge konkrete Anwendungsforschung in Form von Reallaboren erzeugen. Digitale Anwendungen, die in ganzheitliche Nachhaltigkeitskonzepte eingebettet sind, ließen sich hiermit in der Praxis pilotieren. Ein wichtiger Baustein, der in Förderprogrammen bislang nicht ausreichend berücksichtigt wird, ist die **Evaluierung solcher Reallabore**, die in jedem Fall mitgedacht und gefördert werden sollte – umfassend und über ausreichend lange Zeiträume hinweg. Diese Anforderung stehe in einem Spannungsverhältnis mit der üblichen Förderung von Projekten über nur wenige Jahre. Besonders dringlich sei momentan die Erweiterung der Daten- und Erkenntnislage zu Mobility-as-a-Service-Angeboten, Micro Mobility und Sharing-Konzepten unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen. Dabei seien, wie oben erwähnt, auch qualitative Effekte und die soziale Nachhaltigkeitsdimension von hoher Bedeutung. Zudem sollten die **Kommunen selbst in Reallaboren stärker einbezogen** und mit entsprechenden Ressourcen ausgestattet werden.

Ein weiteres Feld, in dem bestehende Forschungslücken indirekt adressiert werden könnten, eröffne sich den Expert*innen zufolge im Bereich der Aus- und Fortbildung. In der Lehre sollten innovative Ansätze erprobt und ausgebaut werden, damit ein nachhaltiger Kompetenzaufbau für die Nutzung digitaler Technologien im urbanen Raum und anderswo gelingen könne. Neue Ansätze zur Untersuchung und Bewertung der komplexen Zusammenhänge in Stadtentwicklung und urbaner Mobilität könnten einer **verstärkten Methodenforschung** entspringen, die gezielt auf die Entwicklung adäquater Konzepte, Instrumente und Indikatoren abzielt. Möglichkeiten der Green IT und Wege zu datensparsamen Lösungen würden noch nicht ausreichend untersucht. Auch ist einem Experten zufolge in der Entwicklung von Softwaresystemen weitgehend ungeklärt, wie die Berücksichtigung der Umwelt in praktische Entwicklungsprozesse eingebunden werden kann, etwa durch eine formale Repräsentanz, die sich gegenüber Entwicklungsteams nicht nur als Einschränkung äußert, sondern als Stakeholder „Umwelt“ bezüglich des zu entwickelnden Systems.

3.4 Kreislaufwirtschaft

Die Kreislaufwirtschaft ist ein Konzept, das auf eine Reduzierung des Ressourcenverbrauchs abzielt; realisiert durch Instandhaltung, Reparatur, Wiederverwendung, Wiederaufbereitung und Recycling von Materialien und Produkten. Im Themenfeld wird beleuchtet, wie mit Hilfe digitaler Technologien Produkte und Geschäftsmodelle entlang der Wertschöpfungsketten optimiert und in Richtung Zirkularität gelenkt werden können. IKT für die Produktverfolgung und -überwachung sowie für den Datenaustausch zwischen Akteuren, aber auch Geräten, Anlagen und Produktionsstätten etc. spielt hier eine Schlüsselrolle. Ein Überblick über die wichtigsten Schlüsseltechnologien, Anwendungsbeispiele, Umweltchancen und -risiken sowie eine Einschätzung zur Studienlage im Themenfeld Kreislaufwirtschaft ist in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15 Digitale Schlüsseltechnologien im Themenfeld Kreislaufwirtschaft

Relevante Schlüsseltechnologien 	IoT & KI 	Digitale Zwillinge 
Funktionsweise 	Planungs- und Entscheidungshilfen durch umfangreiche Datenerfassung und -auswertung	Virtuelle Modellierung , Simulation, Gestaltung und Evaluierung anhand digitaler Kopien
Ausgewählte Anwendungsbeispiele 	<ul style="list-style-type: none"> • Vielfältig einsetzbar in Rohstoffgewinnung, Produktentwicklung und -design sowie Herstellung, Handel und Konsum • Breite und detaillierte Informations-erfassung für effiziente Prozessgestaltung • Erkundung leicht recyclebarer Werkstoff-kombinationen • Bildererkennung für Sortier-, Demontage- und Recyclingprozesse 	<ul style="list-style-type: none"> • Effiziente Design-, Simulations- und Planungsprozesse • Produktentwicklung und -analyse mit geringem Ressourcenaufwand • Vorausschauende Wartung dank Simulationsmodellen (Predictive Maintenance)
Umweltchancen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringerer Ressourceneinsatz in der Produktion durch Vermeidung von Ausschuss • Verringerte Stoffströme durch Monitoring und Tracking • Optimierte Nutzung von Konsumgütern durch digital unterstütztes Teilen 	<ul style="list-style-type: none"> • Schlanke und kreislauffähige Produktdesigns durch Abbildung und Optimierung von Lebenszyklen (z. B. PV-Module) • Geringerer Ressourceneinsatz in der Produktion durch Vermeidung von Ausschuss • Umweltfreundlichere Produkte durch transparente Wertschöpfungsketten (digitaler Produktpass)
Umweltrisiken 	<ul style="list-style-type: none"> • Überschätzung potenzieller Anwendungen durch schwer abschätzbare Rebound-Effekte und gleichzeitige Verzögerung notwendiger Transformationen • Steigender direkter Ressourcenverbrauch durch unverhältnismäßige Anwendung (z. B. Edge AI) und etwaige Lock-in-Effekte 	<ul style="list-style-type: none"> • Nur geringe Verbesserung der Kreislaufführung bei gleichzeitig hohem Energieaufwand für Datenverarbeitung und Simulationen oder gesteigerter Produktion (Rebound-Effekte)
Effekte auf THG-Emissionen 	 <p>Unklarer Effekt, einerseits Reduktion durch Material- und Abfallmanagement, gleichzeitig werden Rebound- und Lock-in-Effekte begünstigt, wenn Effizienzsteigerungen nicht mit systemisch-transformativen Maßnahmen flankiert werden</p>	 <p>Positiver Effekt durch gesteigerte Lebensdauer, verringerten Ressourceneinsatz oder bessere Recyclingfähigkeit von Produkten</p>
Studienlage: Quantifizierungen von Umweltwirkungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Wenige Studien von unabhängigen wissenschaftlichen Forschungseinrichtungen • Direkte negative Umweltauswirkungen sowie Rebound-Effekte unterbelichtet 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativ wenige Studien, insgesamt etwa gleich viele mit faktischen (empirische) und potenziellen Nachhaltigkeitseffekten • Klare Mehrheit der Studien weist auf positive Nachhaltigkeitswirkungen hin

3.4.1 Literaturanalyse

Überblick

In diesem Themenfeld wurden Suchanfragen mit jeweils 22 Kombinationen deutscher und englischer Suchbegriffe durchgeführt, die charakteristisch für den Anwendungsbereich Kreislaufwirtschaft sind. Hierzu zählen beispielsweise Begriffe im Zusammenhang mit Abfall, Recycling, Reparatur, Sharing, Wiederaufbereitung und Wiederverwendung, zirkuläre Wertschöpfungs- und Lieferketten sowie produktbezogenes Lebenszyklusmanagement. Als politisch relevantes Konzept wurde beispielsweise der digitale Produktpass miteinbezogen.

Insgesamt wurden 17 Studien als besonders relevant für das Themenfeld „Kreislaufwirtschaft“ identifiziert. Fast zwei Drittel finden sich auch im Themenfeld „Nachhaltiges Wirtschaften“ wieder. Etwa zwei Drittel der Studien beziffern Umwelt- bzw. Klimaeffekte anhand von CO₂-Äquivalenten. Ähnlich viele Studien kommen zu dem Schluss, dass sich die Digitalisierung bzw. einzelne digitale Technologien positiv auf die Kreislaufwirtschaft auswirken. Am häufigsten bedienen sich Forschungsarbeiten methodisch der Lebenszyklusanalyse sowie diversen Simulationsverfahren. 15 der 17 analysierten Studien wurden in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht.

Identifizierte Effekte und Effektgrößen

Jüngste Forschungsarbeiten weisen mehrheitlich auf potenzielle (meist simulierte oder anderweitig abgeschätzte) Effekte durch die Digitalisierung hin. Faktische, das heißt, empirisch gemessene Effekte arbeiten lediglich gut die Hälfte der analysierten Studien heraus. Im Zentrum stehen die miteinander verschränkten Trends „Internet der Dinge“ und „Big Data“. Eine sowohl breitere als auch detailreichere Erfassung von Informationen schafft häufig Potenziale zur **effizienteren Gestaltung von Prozessen in Rohstoffgewinnung, Produktentwicklung, Planung und Design, Herstellung, Handel und Konsum**. Auch die durch hohe Datenverfügbarkeit begünstigte bzw. ermöglichte Schlüsseltechnologie des Digitalen Zwillings schlägt sich inhaltlich im erfassten Forschungsstand nieder. Am stärksten werden Einsparungen von Treibhausgasemissionen in den Blick genommen. Positive Effekte überwiegen in den analysierten Studien sehr deutlich.

Die jeweiligen Forschungsgegenstände konkretisieren sich auf der Anwendungsebene insbesondere in Bereichen des digital gestützten Monitorings und intelligenten Abfallmanagements, aber auch in Bezug auf Privathaushalte (z. B. Beeinflussung des Abfallsortier- und Recyclingverhaltens). In der industriellen Fertigung ermöglichen Simulationen mit **digitalen Zwillingen** Produktdesigns, die den Ressourcenaufwand in der Fertigung mindern, die Lebensdauer verlängern und die Recyclingfähigkeit erhöhen. Insgesamt sind die Effektarten und dafür genutzte Indikatoren, der Weitläufigkeit des Themenfeldes entsprechend, recht vielfältig. Dasselbe gilt für die eingesetzten Schlüsseltechnologien, mit deren Hilfe diese Effekte erzielt werden (könnten).

Eine Forschungsgruppe um Jørgensen et al. (2023) untersuchte in Norwegen gemeinsam mit einem städtischen Entsorgungsunternehmen und einem Start-up die **Auswirkung von Pay-as-you-throw-Systemen auf das Recyclingverhalten** in Norwegischen Kommunen. Der Ansatz versucht somit die Quellen von Abfall nach dem Verursacherprinzip in die Verantwortung zu nehmen und die Sortierung sowie Wiederverwertung entsorgter Abfälle zu verbessern. Eine digitale Infrastruktur ermöglicht die Erfassung und Rückverfolgung physischer Stoffströme, z. B. anhand von Sensoren, vernetzten Untergrundcontainern und Transportfahrzeugen. Ein Vergleich der Resultate mit Kommunen, die das genannte System nicht nutzen, ermöglicht die Bewertung seiner Effektivität. Das Restmüllaufkommen sank im Untersuchungszeitraum um 20% stärker als in der Kontrollgruppe. Die Reduzierung von Papier- und Kartonabfällen fiel um rund 18% höher aus, während Glasrecycling in beiden Gruppen leicht anstieg. Es wurde doppelt so

viel Plastik recycelt wie in der Kontrollgruppe. Eine Replikation des Quasi-Experiments sieben Jahre später zeigte teils unterschiedliche Ergebnisse. Die Effekte sind daher nicht eindeutig und werden von generellen Trends überlagert (politische Rahmenbedingungen, technische Entwicklungen, Umweltbewusstsein, Konsumanstieg). Das entscheidende Element des Ansatzes besteht im ökonomischen Anreiz des Pay-as-you-throw-Ansatzes und nicht in hochentwickelten digitalen Technologien.

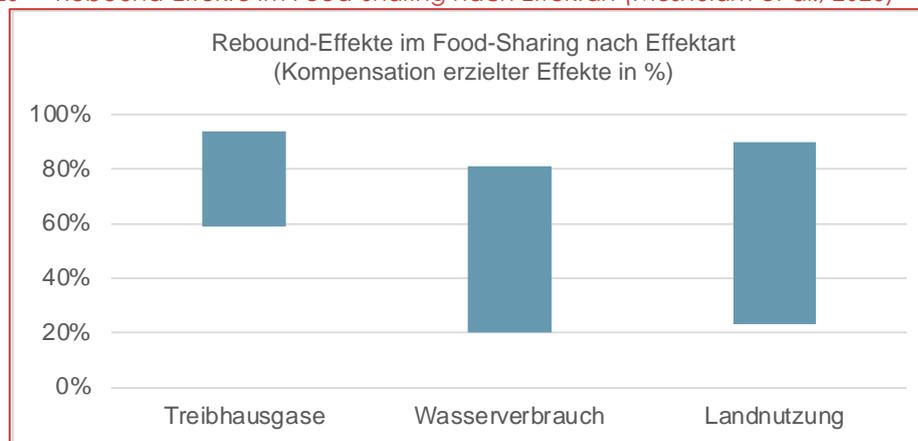
In einer britischen Studie simulieren Meshulam et al. (2023) mögliche Konsequenzen von **Praktiken des Teilens von Lebensmitteln** (Food Sharing). Anhand von Daten, die über den Vermittlungsdienst einer realen Online-Plattform getauscht wurden, stellen sie Szenarien auf, in denen die durch den Bezug überschüssiger Lebensmittel erreichten, monetären Einsparungen sich wiederum in anderen Konsumententscheidungen niederschlagen. Je nach Produkt(gruppe) können somit Umweltbelastungen entstehen, die zuvor erwirkte Entlastungen (durch die Vermeidung von Lebensmittelverschwendung) teilweise aufheben. Auf Basis standardisierter Szenarien, die verschiedene Ausgabe- und Sparverhalten ausdrücken, schätzen sie entstehende Rebound-Effekte ab. Im jeweils positivsten Szenario bleiben demnach bis zu 41% der eingesparten CO₂-Emissionen, bis zu 77% der vermiedenen Landnutzung sowie bis zu 80% des reduzierten Wasserverbrauchs gegenüber einer Entsorgung der über die digitale Plattform „geretteten“ Lebensmittel bestehen. Im ungünstigsten Szenario hingegen werden durch anschließendes Kaufverhalten große Teile der erzielten Entlastungen zunichte gemacht: 94% der eingesparten CO₂-Emissionen, 90% der Reduktion verbrauchter Landflächen sowie 81% des eingesparten Wasserverbrauchs. Auch wenn in allen untersuchten Wirkungsbereichen positive Nettoeffekte erwartet werden, sind die potenziellen Aufhebungseffekte teilweise sehr hoch. Die Studie lässt sich als Sensitivitätsanalyse zum durchschnittlichen Ausgabeverhalten der britischen Bevölkerung interpretieren. Die Anteile der monetären Ausgaben in unterschiedlichen Konsumbereichen (z. B. Textilien oder Mobilität) wurden gegenüber den realen Durchschnittswerten variiert, um Veränderungen bei den resultierenden Umweltauswirkungen zu untersuchen. Auch wenn Tauschplattformen keine digitale Hochtechnologie erfordern, ist ihre digitale Umsetzung essenziell, um starke Effekte zu ermöglichen. Da ihre Attraktivität mit der Anzahl der Nutzenden steigt, sind relevante Nutzungszahlen nur auf digitalen Plattformen zu erwarten, was ihre wichtige Rolle für die Sharing Economy begründet.

Tabelle 16 Ausgewählte Studien für das Themenfeld Kreislaufwirtschaft

Autoren und Jahr	Titel	Erkenntnisse
Jørgensen et al. 2023	Resource accounting for a circular economy: evidence from a digitalised waste management system	<ul style="list-style-type: none"> • Quasi-Experiment zur Abfallvermeidung durch einen Pay-as-you-throw-Ansatz mit ca. 170.000 Norwegischen Haushalten, kombiniert mit qualitativen Interviews und historischen Daten zum Abfallaufkommen • Die Recyclingmengen pro Kopf und Monat verhielten sich gegenüber der Kontrollgruppe wie folgt: -0,87 kg Restmüll, +0,23 kg Papier, +1,4 kg Glas und Metall und +0,15 kg Plastik. • Effekte in unterschiedliche Richtungen sind schwer zu interpretieren, da sie nicht frei von anderen, z. B. sozio-ökonomischen, politischen oder kulturellen Einflussfaktoren sind. • Relevant für Smart City, Smart Factory
Meshulam et al. 2022	Sharing economy rebound – The case of peer-to-peer sharing of food waste	<ul style="list-style-type: none"> • Szenario-Studie, in der das Konsumverhalten von Teilnehmenden einer digitalen Food-Sharing-Plattform in unterschiedlichen Ausprägungen modelliert wird, um Rebound-Effekte abzuschätzen • Rebound-Effekte können einen großen Teil der erzielten Einsparungen wieder aufzehren: 59–94% der eingesparten Treibhausgasemissionen, 20–81% des verringerten Wasserverbrauchs und 23–90% der geringeren Landnutzung • Der Fokus der Untersuchung liegt auf der Höhe der negativen Kompensation von positiven Effekten. Trotz Anteilen von bis zu 94% werden dabei ausschließlich positive Netto-Effekte ermittelt • Cluster-übergreifende Relevanz für Sharing-Plattformen und Rebound-Effekte

Technopolis und IÖW, 2024

Abbildung 20 Rebound-Effekte im Food-Sharing nach Effektart (Meshulam et al., 2023)



Technopolis und IÖW, 2024

Chancen und Herausforderungen

Insgesamt zeichnen die untersuchten Forschungsbeiträge ein positives Bild. Digitale Technologien können den Zugang zu Informationen und deren Auswertung erleichtern, um sie für die Reduzierung von Belastungen zu nutzen und Stoffströme gezielter zu steuern. Das **herausragende Motiv ist die Effizienzsteigerung**, die von der Produktentwicklung bis zur Entsorgung reicht (Rohstoffe und Materialien, Zeit und Kosten, Energie und Emissionen). Dass kein Sektor als Untersuchungsgegenstand eindeutig dominiert, spricht dafür, dass sich aktuell untersuchte Konzepte und Anwendungen für vielfältige Wirtschaftsbereiche eignen. Soziale

Faktoren spielen häufig eine Rolle und sollten in Kreislaufkonzepten früh mitgedacht werden, um ihre Wirksamkeit zu fördern.

Herausforderungen im Sinne von **negativen Umwelt- und Klimaeffekten werden gelegentlich angeschnitten, aber nur selten eingehend behandelt**. Eine explizite Auseinandersetzung damit erfolgt punktuell, beispielsweise mit Blick auf Verpackungsabfälle durch den Onlinehandel (Zimmermann & Bliklen, 2020) oder auf Rebound-Effekte in der Sharing Economy (Meshulam et al., 2023). Ein Beitrag beschäftigt sich mit dem Risiko, das zentrale Effizienzversprechen von IoT-Konzepten durch zunehmende Anwendung von Edge AI teilweise wieder aufzuheben (Fraga-Lamas et al., 2021). Ein häufiges praktisches Problem scheint die fehlende oder lückenhafte Verfügbarkeit von Primärdaten zu sein. Es werden hauptsächlich Sekundärdaten genutzt, was Ungenauigkeiten und Verzerrungen in den Forschungsergebnissen verstärken kann.

In der Praxis scheint die digitalisierte Kreislaufwirtschaft schwach entwickelt zu sein, was jedoch weniger an unzureichenden technologischen Entwicklungen liegt, sondern an ungelösten Fragen der **Governance und politischer Rahmenbedingungen**. Für verschiedene Konzepte und Produktarten sind im industriellen Bereich geeignete Standards zu entwickeln, die Transparenz, Sicherheit und Interoperabilität gewährleisten. In Bereichen der Kreislaufwirtschaft, die sich auf das Teilen und Reparieren von Konsumgütern beziehen, können relativ starke Rebound-Effekte auftreten, wenn daraus folgende Ersparnisse einzelner Personen wiederum in andere Konsumgüter investiert werden. Das britische Beispiel legt jedoch nahe, dass die Nettoeffekte einer dortigen großen Lebensmittel-Sharing-Plattform Umweltbelastungen vermindern.

Die Sammlung und Auswertung digitaler Informationen entlang von Produktlebenszyklen und Wertschöpfungsketten erfordert immer auch die Bereitschaft oder Verpflichtung aller involvierten Akteure, die nötigen Daten in angemessener Qualität (z. B. standardisiert) bereitzustellen. Wenn dies gelingt, können kreislaforientierte Maßnahmen darauf aufbauen. **Transparenz ermöglicht die gezielte Entwicklung von Anreizsystemen** (vgl. Jørgensen et al., 2023) und die Durchsetzung von Rechenschaftspflichten. In manchen Fällen erscheinen digitaltechnische Lösungen jedoch auch als zweifelhaft: Um die Lebensdauer von Lebensmitteln zu erhöhen, könnte auch auf verantwortungsvolleres Kaufverhalten abgezielt werden (vgl. Meshulam et al., 2023), anstatt ihre Lagerung im Smart Home robotisch zu optimieren (vgl. Mezzina et al., 2023).

3.4.2 Forschungslücken aus der Literaturanalyse

Politische Implikationen und Handlungsempfehlungen werden in den gesichteten Literaturbeiträgen eher selten formuliert. Auch Studien, die ausgehend von einer einzelnen Anwendung multiple Effektarten auf die Nachhaltigkeit untersuchen, sind selten. Eine integrierte Betrachtung von beispielsweise Schadstoffausstößen, Wasserverbrauch, Produktlebensdauer und verursachten Treibhausgasemissionen wären jedoch besonders hilfreich, um komplexe Mechanismen verstehen und adressieren zu können. Insgesamt wurden **im Vergleich zu anderen Themenfeldern relativ wenige Studien** identifiziert, die sich aus den genutzten Suchbegriffen ergaben und gleichzeitig den erweiterten Kriterien (z. B. Quantifizierung von Effekten und hohe wissenschaftliche Qualität) entsprachen. In mehreren Untersuchungen scheinen soziale und wirtschaftliche Faktoren von hoher Bedeutung für das Gelingen von kreislaforientierten Ansätzen zu sein. Auch mögliche Spannungsverhältnisse der digitalisierten Kreislaufwirtschaft mit dem Datenschutz sind zu berücksichtigen, werden aber in den analysierten Studien kaum thematisiert.

3.4.3 Ergebnisse der Fokusgruppe „Kreislaufwirtschaft“

Um einen vertieften Einblick in das Themenfeld „Kreislaufwirtschaft“ zu erhalten, wurde eine zweistündige Online-Fokusgruppe durchgeführt (vgl. Kapitel 2). Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse der Fokusgruppe dargestellt und ins Verhältnis zu den literaturbasierten

Ergebnissen gesetzt. An der Fokusgruppe nahmen sieben Personen aus Politik, Wirtschaft, Zivilgesellschaft und Forschung teil, wobei letztere Akteursgruppe am stärksten repräsentiert war.

Wichtige Technologien und Anwendungen und damit verbundene Chancen

Mit Blick auf besonders relevante Potenziale und Chancen wurden die Expert*innen nach den wichtigsten digitalen Technologien und Anwendungen für die Kreislaufwirtschaft befragt. Insgesamt betonten die Expert*innen, dass der Fokus auf Einzeltechnologien sowohl für die Forschungsförderung als auch in der Praxis nicht zielführend sei. Die Technologien und Anwendungen könnten in der Regel nicht isoliert voneinander betrachtet werden, sondern seien vielmehr häufig eng miteinander verknüpft. Weiterhin seien die **Rahmenbedingungen für die erfolgreiche Implementierung von digitalen Technologien und Anwendungen entscheidend**. Digitale Anwendungen seien wichtige Hilfsmittel („Enabler“), sie dürften jedoch nicht als Lösung an sich betrachtet werden.

In diesem Sinne wurde die horizontale Vernetzung entlang der Wertschöpfungskette – vom Sourcing über die Nutzung bis zur Entsorgung und zurück – von den Expert*innen als zentraler Hebel herausgestellt. Dafür sind unabhängig von den Technologien zentrale Fragen des Daten- und Informationsaustauschs zu beantworten. Um diesen Austausch zu verbessern, müssten Anreize oder Verpflichtungen für Akteure geschaffen werden, um die zentralen Herausforderungen für die Umsetzung zu adressieren (z. B. Geheimhaltungsanforderungen, Datensicherheit, Medienbrüche). Als Beispiel dafür wurde der **Digitale Produktpass** angeführt, der rechtliche Rahmenbedingungen für Informationspflichten setzen soll. Für den Konsumbereich wurde außerdem betont, dass die Digitalisierung zwar die Reparatur von Endgeräten erleichtern kann (z. B. durch Informationsbereitstellung), aber auch dafür die Rahmenbedingungen u.a. durch entsprechende Produktdesigns und Fehlercodes in Reparaturanleitungen erstmal flächendeckend geschaffen werden müssen.

Neben den Rahmenbedingungen wurden in der Fokusgruppe auch konkrete Technologien und Anwendungen genannt. Im Vergleich zu den Rahmenbedingungen zeigte sich bei den Expert*innen allerdings ein deutlich weniger klares Bild in Bezug auf deren Relevanz und Potenzial. Im Bereich Recycling und Refurbishing wurden die **KI-basierte Bilderkennung** für Sortier- und Demontageprozesse sowie kognitive Robotik zur Automatisierung des Recyclingprozesses diskutiert. Im Bereich Instandhaltung wurden die Chancen durch 3D-Druck für die bedarfsorientierte Ersatzteil- und Produktbereitstellung eingebracht sowie Simulationsmöglichkeiten zur vorausschauenden Wartung über **digitale Zwillinge**. Außerdem wurde das Potenzial von digitalen Zwillingen betont, auf Basis von Simulationsergebnissen die Reparierbarkeit und Recyclingfähigkeit zu verbessern. Weiterhin könnte laut den Expert*innen im Produktdesign KI genutzt werden, um neue, leicht recyclebaren Werkstoffkombinationen zu finden. Für den Konsumbereich wurde das Potenzial einer weiteren Verbreitung von Smart Bins betont, um eine bedarfsgerechte Abholung von Müll zu ermöglichen und die Logistikwege zu optimieren.

Im Vergleich zur Fokusgruppe standen in der analysierten Literatur Rahmenbedingungen weniger im Fokus. Zwar wurden ungelöste Fragen der Governance und politischer Rahmenbedingungen in der Literatur häufig als hemmende Faktoren für die Umsetzung genannt, allerdings wurden diese – vermutlich auf Grund des Fokus auf quantitative Effekte – in der Regel nicht explizit untersucht. Ein Unterschied zeigt sich auch im Bereich der Daten. Während die Expert*innen in der Fokusgruppe den **verbesserten Austausch von Daten** zwischen Akteuren als zentrale Chance betonten, wurde in der Literatur stärker die Erfassung und Auswertung von Daten mittels IoT und KI-Anwendungen untersucht, um eine breitere und auch detailreichere Erfassung von Informationen zur effizienteren Gestaltung von Einzelprozessen zu ermöglichen. Unter den konkreten Anwendungen wurde in der Fokusgruppe sowie in der

Literatur insbesondere der digitale Zwilling mit seinen Potenzialen für die industrielle Fertigung hervorgehoben.

Umweltrisiken der Digitalisierung

Um potenzielle Risiken der Digitalisierung zu erfassen, wurde die Fokusgruppe nach relevanten Umweltrisiken durch digitale Technologien und Anwendungen im Bereich Kreislaufwirtschaft gefragt. Hierbei zeigte sich ein recht deutliches Bild.

Das erste große Risiko wird in der **Verzögerung notwendiger gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Transformationsprozesse** durch das Setzen auf zukünftige digitale Hoffnungen als Problemlöser gesehen. Anknüpfend an den bereits ausgeführten Aspekt der Rahmenbedingungen wurde betont, dass diese die entscheidende Voraussetzung sind, damit die Technologien im ökologischen Sinne wirken können. Dazu wurde problematisiert, dass mit der Digitalisierung häufig nur die Effizienzsteigerung von bestehenden Prozessen verfolgt wird und nur selten die eigentlich notwendige radikale Dematerialisierung und neue Geschäftsmodelle im Fokus stehen. Hierdurch könnten gefährliche Pfadabhängigkeiten und Lock-in-Effekte entstehen.

Als zweites großes Risiko wurde der **ökologische Fußabdruck von digitalen Technologien** und komplexen Anwendungen (insbesondere KI) selbst genannt. Die dafür notwendigen Infrastrukturen verbrauchen nicht nur Energie, sondern auch wertvolle Ressourcen. Außerdem müssten sie mit der Zeit gehen und auf Grund der dynamischen Technologieentwicklung häufig schnell ausgetauscht werden. Teilweise würden nach Aussage der Expert*innen auch Problemstellungen, die gesamtgesellschaftliche keine außerordentliche ökologische Relevanz haben, mit überdimensionierten, ressourcenintensiven High-Tech-Lösungen adressiert. Der steigende Anteil von E-Waste, der mit dem Einsatz der digitalen Technologien einhergeht, sei hierbei ebenfalls zu berücksichtigen.

In der analysierten Literatur wurden die Umwelteffekte der Digitalisierung meist positiv betrachtet und bewertet. Folglich sind die in der Fokusgruppe genannten Risikobereiche dort vergleichsweise wenig beleuchtet, insbesondere, wenn es um quantitative Forschungsergebnisse geht. So werden der steigende direkte Energie- und Ressourcenverbrauch durch digitale Anwendungen sowie die schwer abschätzbaren Rebound-Effekte nur in sehr wenigen Studien untersucht.

3.4.4 Forschungslücken und Handlungsempfehlungen aus der Fokusgruppe „Kreislaufwirtschaft“

Forschungslücken und Implikationen für die Forschungsagenda wurden in Bezug auf Themenschwerpunkte und Forschungsmethoden diskutiert. Als Themenschwerpunkt wurde besonders empfohlen, weiter an der Integration des Leitprinzips Modularität in das Produktdesign zu forschen, um die **Lebensdauer von Produkten** zu verlängern. In vielen Produkten sei es schon Status quo, dass es Module mit festen Funktionen gibt, die man für längeren Zeitraum verwenden und austauschen kann, ohne das Produkt bis zum Werkstoff zu zerlegen. Es sollte untersucht werden, wie digitale Technologien dazu einen stärkeren Beitrag leisten können bzw. welche Rahmenbedingungen dafür notwendig sind.

Eine starke Empfehlung wurde von den Expert*innen auch dafür ausgesprochen, nicht nur rein technologiefokussierte Forschung im Bereich Kreislaufwirtschaft zu betreiben, sondern die Schnittstellen in den Blick zu nehmen. Hier wurde insbesondere der Bereich **Regulatorik** genannt, um den Grundhemmnissen für die Bereitschaft des Datenaustausches entgegenzuwirken. Die Frage, unter welchen Bedingungen selektive Transparenz ein sinnvoller Weg ist und wie diese erreicht werden kann, sei hier zentral. Auch die Möglichkeiten des digital unterstützten Rechteaustauschs (z. B. Geschäftsgeheimnis vs. Gemeinwohlinteresse an Daten)

sollten stärker in den Blick genommen werden. Neben der Schnittstelle zur Regulatorik wurden auch die Verknüpfungen zu Geschäftsmodellinnovationen sowie verhaltensbasierter und soziologischer Forschung hervorgehoben.

Weiterhin empfahlen die Expert*innen den Fokus der Forschung unbedingt auf eine **zielgerichtete Digitalisierung zu legen, die Nachhaltigkeitseffekte priorisiert**. Dafür müssen die Einsparungspotenziale durch digitale Technologien und Anwendungen ihrer Ressourcen- und Energieintensität bilanziell gegenübergestellt werden, und zwar über den gesamten Lebensweg. Nur so könne eine belastbare Kosten-Nutzen-Abwägung zum Einsatz von digitalen Anwendungen für die Kreislaufwirtschaft erfolgen. Die Expert*innen waren sich einig, dass es zur Schaffung der dafür notwendigen Datengrundlage noch weiterer Forschung und ein verbessertes Monitoring bedarf. Weiterhin wurde auch für diesen Bereich die Bedeutung der Rahmenbedingungen betont. So sei insbesondere Szenarioforschung gefragt, um zu beleuchten, welche Wirkung bestimmte Technologien unter welchen Rahmenbedingungen (z. B. politisch, regulatorisch) haben können.

In der Literaturanalyse wurden selten Forschungsempfehlungen ausgesprochen, die über einen konkreten Anwendungsfall hinausgehen. Zwar wurde die Bereitschaft oder Verpflichtung aller involvierten Akteure, die nötigen Daten in angemessener Qualität bereitzustellen, häufig als eine wichtige Voraussetzung genannt. Allerdings wurde die Fragestellung in den quantitativen Studien kaum untersucht und auch nur selten als konkrete Forschungslücke benannt. Im Sinne der Fokusgruppe zeigte sich auch in der Literaturanalyse, dass die fehlende oder **lückenhafte Verfügbarkeit von Primärdaten** ein häufiges forschungspraktisches Problem darstellt und hier weiterer Forschungsbedarf besteht. Durch mangelhafte Datenverfügbarkeit werden hauptsächlich Sekundärdaten genutzt, was Ungenauigkeiten und Verzerrungen in den Forschungsergebnissen verstärken kann.

Übergreifend wurde in der Fokusgruppe als Forschungsmethode außerdem noch der Reallaboransatz als besonders erfolgversprechend empfohlen. Hier könnten in einem geschützten Raum technologische Forschung, aber auch regulatorische Ansätze getestet und pilotiert werden.

3.5 Nachhaltiges Wirtschaften

Das Themenfeld umfasst die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle, die (industrielle) Produktion und das dazugehörige Lieferkettenmanagements sowie den Konsum von Produkten und Dienstleistungen. Im Themenfeld wird beleuchtet, wie digitale Technologien und Anwendungen in diesen Teilbereichen zur Reduktion von Umweltbelastungen beitragen können.

Im Themenfeld Nachhaltiges Wirtschaften wurde im Anschluss an die Literaturanalyse (3.5.1) ein Steckbrief für das Cluster Smart Factory (3.5.2) erstellt. Die Ergebnisse des Steckbriefs wurden durch Experteninterview validiert. Abschließend wurden die Ergebnisse zu bestehenden Forschungslücken zusammengeführt (3.5.3).

Tabelle 17 stellt eine Übersicht bezüglich der wichtigsten Schlüsseltechnologien, Anwendungsbeispiele, Umweltchancen und -risiken sowie eine Einschätzung zur Studienlage im Bereich des Nachhaltigen Wirtschaftens dar.

Tabelle 17 Digitale Schlüsseltechnologien im Themenfeld Nachhaltiges Wirtschaften

Relevante Schlüsseltechnologien 	IoT & KI 	Digitale Zwillinge 
Funktionsweise 	Effizienzsteigerungen durch Vernetzung und Automatisierung sowie optimierte Überwachung und Steuerung von Produktionsprozessen	Auswertung von Produkt- und Produktionsdaten sowie Simulation von alternativen Szenarien
Ausgewählte Anwendungsbeispiele 	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz und Optimierung von Robotik in der Produktion • Smart Monitoring & Predictive Maintenance 	<ul style="list-style-type: none"> • Nachhaltigkeitsbewertung und -optimierung in Designphase • Smart Monitoring & Predictive Maintenance
Umweltchancen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringerer Material- und Energieverbrauch durch intelligente Überwachung, Steuerung und Wartung • Effizienzgewinne durch Automation 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion des Energie- und Ressourcenverbrauchs von Produkten oder Produktionsanlagen im Betrieb sowie Feedback für ressourcen- und energieeffizientes Produktdesign
Umweltrisiken 	<ul style="list-style-type: none"> • Energie- und Ressourcenaufwand für KI- und IoT-Infrastrukturen • Fokus auf Optimierung bestehender Prozesse kann tiefergreifende ökologische Transformation verzögern 	<ul style="list-style-type: none"> • Energieaufwand für Datenverarbeitung und Simulationen
Effekte auf THG-Emissionen 	 Positiver Effekt durch Reduktion von Energieintensität und Ausschuss in der Produktion	 Positiver Effekt durch simulationsbasierte Effizienzverbesserungen von Produktionsmaschinen und Werkzeugen
Studienlage: Quantifizierung von Umweltwirkungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Viele Studien untersuchen die Digitalisierung der Produktion allgemein, selten werden Einzeltechnologien vertieft betrachtet. • Digitalisierung wird überwiegend als positiv bewertet, negative Effekte wie direkte Energie- oder Ressourcenverbräuchen und Rebound-Effekte werden kaum untersucht • Tatsächliche Einsparungen werden nur selten quantifiziert, häufig werden nur theoretische Potenziale berechnet 	<ul style="list-style-type: none"> • Wenige spezifische Studien zu Digital Twins • Simulationsergebnisse zeigen Einsparpotenziale auf. Ob sich die Potenziale auch praktisch so realisieren lassen, wird häufig nicht betrachtet

Technopolis und IÖW, 2024

Die Abbildung bezieht sich auf die (industrielle) Produktion. In der Literaturanalyse wurden für das Themenfeld „Nachhaltiges Wirtschaften“ auch weitere Bereiche wie Konsumverhalten und Geschäftsmodelle betrachtet. Da diese Bereiche allerdings in der Regel keinen oder nur einen geringen Technologiefokus aufweisen, sind sie nicht in der Abbildung enthalten.

3.5.1 Literaturanalyse

Überblick

Das Themenfeld umfasst englisch und deutschsprachige Suchbegriffe im Zusammenhang mit den wesentlichen Teilbereichen des Nachhaltigen Wirtschaftens: Geschäftsmodelle (inkl. Sharing Economy, Plattformökonomie), Produktion und unterstützende Prozesse (inkl. Smart Factory, Industry 4.0, remote work), Lieferkette und Konsum (inkl. Onlinehandel, Nudging).

Insgesamt wurden 55 Studien als besonders relevant für das Themenfeld identifiziert. Das breite Verständnis des Themenfelds wurde gewählt, um die Bandbreite des nachhaltigen Wirtschaftens abzudecken. Daraus resultiert, dass die Untersuchungsgegenstände von sehr technisch und spezifisch (insbesondere in der Produktion) bis verhaltensbasiert und abstrakt (insbesondere für die Bereiche Konsum und Geschäftsmodelle) reichen und sehr unterschiedlich sind. Außerdem haben sich Schnittmengen mit dem Themenfeld Kreislaufwirtschaft ergeben (20% der Studien) sowie in geringerem Maße mit den Themenfeldern Ressourcennutzung, Primärsektor, Klimaschutz und Energiesysteme, sofern dort wirtschaftliche Akteure im Fokus stehen.

Identifizierte Effekte und Effektgrößen

In fast der Hälfte der Studien werden **THG-Emissionen als Hauptindikator** genutzt, teilweise werden Energieverbrauch bzw. Stromverbrauch quantifiziert, die dann indirekt auf die THG-Emissionen einzahlen. Nur selten stehen andere Umweltmedien im Fokus, beispielsweise Materialverbrauch oder Abfälle.

Deutlich **weniger als die Hälfte** der berücksichtigten Studien **quantifiziert faktische Umwelteffekte**, d.h. gemessene direkte Einsparungen in CO₂ oder Material. Darin enthalten sind Studien, die diese Effekte auf Basis von Primärdaten und Messung quantifizieren, beispielsweise durch vergleichende Lebenszyklusanalysen zweier Systeme oder durch Experimente. Diese Untersuchungen setzen in der Regel in der Produktion an und nehmen Energie- und Ressourceneinsparungen durch den Einsatz diverser digitaler Anwendungen (z. B. Automatisierung von Prozessen, intelligentes Monitoring) in den Blick. Der **Fokus** liegt dabei auf **Effizienzsteigerungen**. Weiterhin sind darunter auch Studien, die direkte Umwelteffekte quantifizieren, dafür aber Sekundärdaten nutzen. In den meisten Fällen werden vorhandene Paneldaten durch statistische Analysen ausgewertet, um Zusammenhänge zwischen Digitalisierung und Umwelt empirisch zu belegen, ohne Umweltparameter tatsächlich zu messen. So wird beispielsweise der Zusammenhang zwischen THG-Emissionen und der Nutzung von Kryptowährungen (Polemis & Tsionas, 2021) sowie von Online-Drittanbieter Tracking (Pachilakis et al., 2023) untersucht.

Der **überwiegende Teil** der Studien identifiziert **potenzielle Effekte** der Digitalisierung auf die Umwelt. Häufig wird mit Hilfe von **Modellierungen oder Simulationen** potenzieller Anwendungsmöglichkeiten berechnet, welche Umweltauswirkungen die digitalen Technologien und Anwendungen haben können. Die Bandbreite der untersuchten Anwendungen reicht vom Einsatz von 3D-Druck oder Digital Twins bis hin zu intelligenten Monitoringsystemen, über welche potenziell Umweltauswirkungen reduziert werden können. Darüber hinaus wurden auch Studien berücksichtigt, die keine direkten Umwelteffekte quantifizieren, sondern **vorgelagerte Verhaltensänderungen** untersuchen, die wiederum mit **indirekten positiven Umweltauswirkungen** einhergehen. Analysiert werden beispielsweise die Wirksamkeit von digitalem Nudging für nachhaltigere Kaufentscheidungen (Guath et al., 2022; S. Zimmermann et al., 2023) oder der Einfluss von Digitalisierung auf die Umsetzung nachhaltiger Produktionsverfahren allgemein (Agrawal et al., 2023; Guaita Martínez et al., 2022; L. Wang et al., 2022).

Tabelle 18 Ausgewählte Studien für das Themenfeld Nachhaltiges Wirtschaften

Autoren und Jahr	Titel	Erkenntnisse
Kopp et al. 2019	The climate effect of digitalization in production and consumption in OECD countries	<ul style="list-style-type: none"> Die Studie analysiert die Beziehung zwischen dem Digitalisierungsgrad von Ländern und der Höhe ihrer Treibhausgasemissionen. Der Digitalisierungsgrad wird dabei durch die Investitionen in digitale Technologien eines Landes approximiert Für die Analyse werden vorhandene Paneldaten von 37 Volkswirtschaften genutzt (u.a. OECD, Weltbank, EuroStat, CO2-Indikator des Ecological Footprint Networks) Mit Hilfe eines Schätzmodells (Group Fixed Effects estimator) und Regressionsanalysen wird so der Zusammenhang zwischen IKT-Investitionen und der Entwicklung von THG-Emissionen untersucht Je nach Szenario ergeben sich THG-Emissionsreduzierungen von bis zu 5,6% bei einer Steigerung der IKT-Investitionen um 10% Mögliche Rebound-Effekte werden qualitativ diskutiert, aber nicht in die quantitative Analyse einbezogen
Kc et al. 2020	Lifecycle Assessment of Biomass Supply Chain with the Assistance of Agent-Based Modelling	<ul style="list-style-type: none"> Echtzeitmonitoring der Logistik von Forstbiomasse in einem Großkraftwerk in Finnland, um die Logistik nachhaltiger zu gestalten und CO2-Emissionen zu senken Das intelligente Monitoring wurde eingesetzt, um die Qualität der Biomasse (vor allem den Feuchtigkeitsgehalt) in Echtzeit zu überwachen. Mit Hilfe dieser Informationen konnten die Lieferanten bessere Biomassequalität (z. B. mit geringerem Feuchtigkeitsgehalt) an das Kraftwerk liefern. Methodenmix: Lebenszyklusanalyse kombiniert mit dynamischen Elementen von Geoinformationssystemen und agentenbasierter Modellierung, um die räumlichen und zeitlichen Aspekte der Lieferkette für forstliche Biomasse abzubilden Potenzial: 2% THG-Emissionsreduzierung durch das Echtzeitmonitoring der Biomassequalität in der gesamten Lieferkette

Technopolis und IÖW, 2024

Chancen und Herausforderungen

Die deutliche Mehrheit der Studien kommt zum Ergebnis, dass die **Digitalisierung positive Effekte auf die Umwelt** hat. Digitalisierung wird hauptsächlich als **ermöglicher Faktor (Enabler)** für mehr Nachhaltigkeit betrachtet. So wird am häufigsten untersucht, wie Vernetzung und Automatisierung zu Effizienzgewinnen führen können und wie ein intelligentes Monitoring über die optimierte Überwachung und Steuerung von Prozessen zu einer Reduktion von Emissionen und Stoffströmen genutzt werden kann. **IoT und KI** stehen dabei, häufig eng verknüpft, als **Schlüsseltechnologien** im Fokus. In vielen Studien wird allerdings auch auf die Digitalisierung eher allgemein Bezug genommen und eine Kombination von diversen Technologien und Anwendungen betrachtet, beispielsweise in der Produktion unter dem übergreifenden Konzept Industrie 4.0. Nur vereinzelt sind weitere spezifische Anwendungen wie 3D-Druck, Blockchain, Digital Twins, digitales Nudging oder Plattformen der alleinige Untersuchungsgegenstand.

Nur wenige Studien quantifizieren negative Umwelteffekte wie beispielsweise Emissionen durch den Betrieb von Kryptowährung (Polemias & Tsionas, 2021), durch Online-Drittanbieter Tracking (Pachilakis et al., 2023) und durch die Nutzung von Clouds (Pientka, 2023). Außerdem werden die Umwelteffekte digitaler Endgeräte in der Herstellung und Nutzung quantifiziert (Gröger, 2020). Eine weitere Studie betrachtet Rebound-Effekte bei der Nutzung von Foodsharing-

Plattformen (Meshulam et al., 2023). Viele andere Untersuchungen beschreiben die möglichen negativen Umwelteffekte der Digitalisierung qualitativ nur ganz am Rande oder gar nicht.

3.5.2 Smart Factory (Cluster-Steckbrief)

Abbildung 21 Umweltauswirkungen der industriellen Produktion



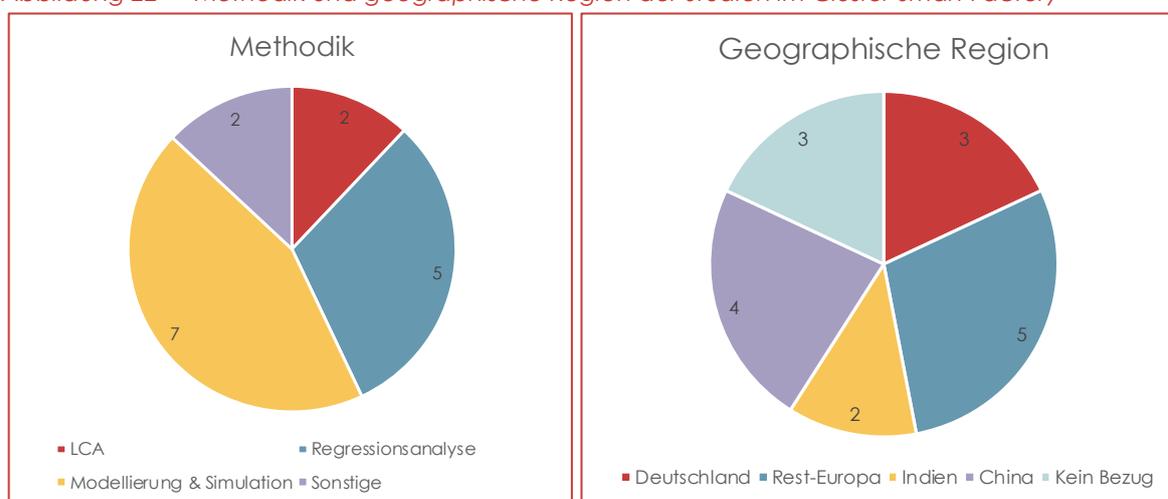
Technopolis und IÖW, 2024

Eingrenzung des Clusters

- Das Cluster Smart Factory bezieht sich auf die industrielle Produktion und stellt somit einen Teilbereich des Nachhaltigen Wirtschaftens dar.
- Eine Smart Factory ist durch die systematische Verknüpfung von Informationssystemen mit internen Betriebsanlagen, externen Komponenten und der äußeren Umwelt gekennzeichnet (Nikelowski, 2020).
- In dem hier angelegten engen Verständnis umfasst dies nur die Herstellung von Produkten und Dienstleistungen, jedoch nicht die Lieferketten und Logistiksysteme.

Anzahl und Eigenschaft der identifizierten und relevanten Studien

Abbildung 22 Methodik und geographische Region der Studien im Cluster Smart Factory



Technopolis und IÖW, 2024, n=17

- Am häufigsten werden **Modellberechnungen und Simulationen** sowie **Regressionsanalysen** durchgeführt.
- Die genutzte **Datenbasis** ist **sehr divers**:
 - Studien, die quantitative Primär- & Sekundärdaten erheben bzw. nutzen: LCA, Modellierung und Simulation, Auswertung von Paneldaten
 - Studien, die qualitative Daten quantitativ auswerten: Primärdaten aus Umfragen und Interviews oder Sekundärdaten aus vorhandenen Datenbanken und Literatur

Untersuchte Anwendungen und Schlüsseltechnologien

Tabelle 19 Digitale Schlüsseltechnologien im Cluster Smart Factory

	Intelligentes Monitoring	Automatisierung der Produktion	Spezifische Technologien	Digitalisierung mit diversen Anwendungen
Mögliche Umweltfreundliche Anwendungen der digitalen Technologien	<ul style="list-style-type: none"> Ermittlung von Energieeinsparoptionen bei verschiedenen Fertigungsprozessen Vermeidung von Lebensmittelabfällen in der Produktion durch sensorgestütztes Tracking 	<ul style="list-style-type: none"> Energieeinsparungen in einem Milchviehbetrieb (Fütterung, Melkung, Säuberung) Energieeffizienzsteigerung durch Vernetzung und Automatisierung Maschinelles Lernen zur Reduktion der Energieintensität und Fehlerquote in der Produktion von Thermoplasten 	<ul style="list-style-type: none"> 3D-Druck für Modellherstellung und personalisierte Produktion zur Reduzierung von Energie- und Materialverbrauch Einsatz von Blockchain zur Erhöhung der Kreislauffähigkeit Digitaler Zwilling im Werkzeugmaschinenbau zur Erhöhung der Ressourceneffizienz 	<ul style="list-style-type: none"> Zusammenhänge von Digitalisierung und einer nachhaltigen Produktion Treiber für die Einführung von grünen, digitalen Technologien Potenziale einer Smart Factory zur Reduktion von Umweltauswirkungen in Kühlschrankherstellung
Anzahl von untersuchten Studien	4 Studien	3 Studien	4 Studien	6 Studien

Technopolis und IÖW, 2024, n=17

- Sowohl für das intelligente Monitoring als auch für Automatisierung sind **IoT und KI** die **Schlüsseltechnologien**.
- Unter den spezifischen Technologien bietet der **digitale Zwilling** ein **großes Potenzial** zur Reduktion von Umweltauswirkungen, insbesondere im Zusammenhang mit komplexen Simulationstechnologien. Der **3D-Druck** kann für **spezifische Branchen** mit besonders hochwertigen und komplexen Produkten eine Chance zur Reduktion von negativen Umwelteffekten sein.

Quantifizierte Effekte

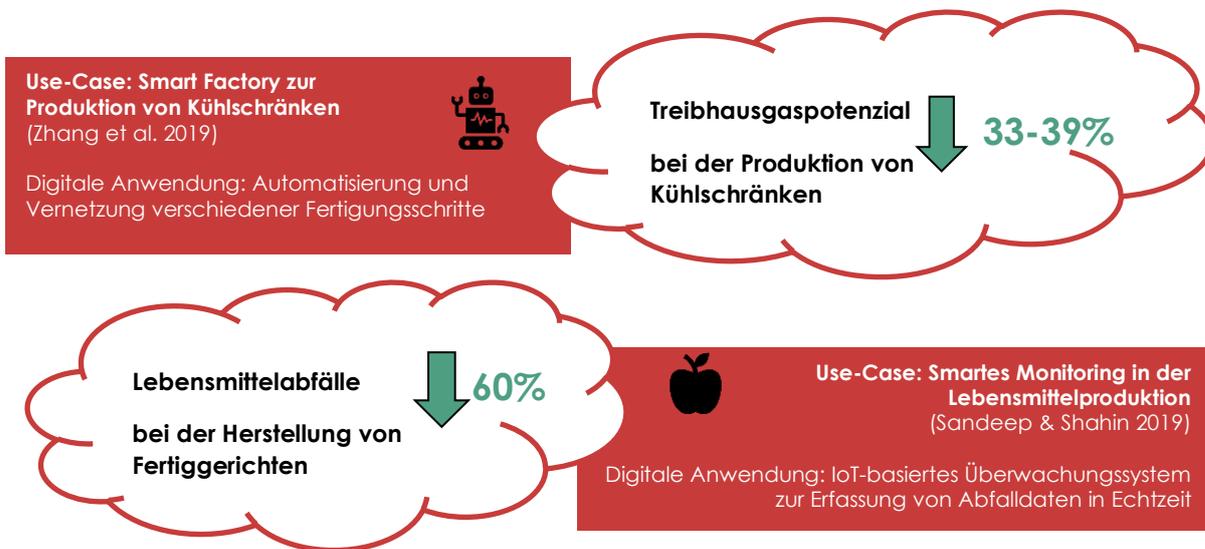


Abbildung 23 Ausgewählte Umwelteffekte digitaler Technologien im Cluster Smart Factory Technopolis und IÖW, 2024

- Mit Hilfe einer LCA werden die Umwelteffekte einer **intelligenten Kühlschrankfabrik** untersucht. Dafür werden die Umweltauswirkungen bei der Herstellung eines Kühlschranks in einer konventionellen Fabrik mit denen in einer Smart Factory verglichen. Die Smart Factory hat ihren größten Einfluss in der **Reduktion des Treibhausgaspotenzials** während der Produktion von Einzelteilen sowie der Fertigung und Montage. Neben der Automatisierung und Vernetzung ermöglicht die Smart Factory außerdem eine verbesserte Modularisierung und Standardisierung in der Produktion (W. Zhang et al., 2019).
- In einer Fallstudie aus dem Vereinigten Königreich wird untersucht, wie durch **ein intelligentes Monitoringsystem Lebensmittelabfälle** in einer Fabrik für Fertiggerichte **verringert** werden können. Das Design und die Architektur des IoT-basierten Trackingsystems liefert zuverlässige Daten für die Entstehung von Abfällen und erlaubt in der Fallstudie **in Kombination mit der Anpassung von Betriebsabläufen** sowie Schulung von Mitarbeitenden die Reduktion der Lebensmittelabfälle um 60%. Dies wiederum hat positive Umwelteffekte, deren Größe vom konkreten Fertiggericht und den enthaltenen Zutaten abhängig ist (Jagtap & Rahimifard, 2019).

Art der analysierten Umwelteffekte

Tabelle 20 Direkte und indirekte Effekte im Cluster Smart Factory

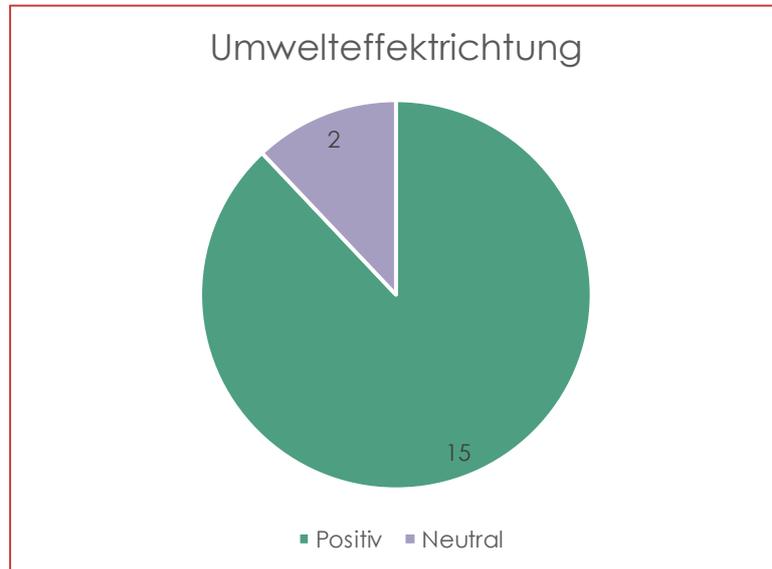
Direkte Effekte (Ressourcenaufwand für Produktion und Nutzung digitaler Technologien)	Indirekte Effekte durch die Nutzung digitaler Technologien	Weitere indirekte Effekte (z. B. Rebound-Effekte)
<ul style="list-style-type: none"> • Fast alle Studien beschreiben den Ressourcen- und Energieaufwand für die Herstellung und Nutzung der digitalen Technologien, wenn überhaupt, nur qualitativ 	<ul style="list-style-type: none"> • Großes Potenzial für Effizienzgewinne durch Technologien und Anwendungen der Smart Factory • Durch intelligentes Monitoring in der Produktion können erhebliche Energie- und Ressourceneinsparungspotenziale aufgedeckt werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Ob und wie sich das Unternehmensverhalten durch die Smart Factory umweltwirksam verändern könnte, wird nicht betrachtet (Substitutions- & Rebound-Effekte)

Technopolis und IÖW, 2024

Übergeordnete Effektrichtung der untersuchten Studien

- In der Literatur ist ein starker **Fokus auf die positiven Umwelteffekte** der Smart Factory festzustellen. Häufig werden dabei auch nur Potenziale abgeschätzt, ohne die Bedingungen für eine erfolgreiche Umsetzung in Unternehmen ausreichend einzubeziehen.
- **Nur wenige Studien** quantifizieren neben positiven Effekten auch **negative Umweltwirkungen**, beispielsweise in einer Studie zu den Umweltauswirkungen der Modellherstellung in der Metallindustrie. Beim Vergleich von konventionellen und 3D-Verfahren werden neben der Reduktion von THG-Emissionen um 31% auch negative Effekte in anderen Umweltkategorien festgestellt (Kumar Manupati et al., 2023).

Abbildung 24 Effektrichtung der analysierten Studien im Cluster Smart Factory



Technopolis und IÖW, 2024, n=17

3.5.3 Forschungslücken aus der Literaturanalyse

Zukünftige Forschung sollte die möglichen negativen Effekte der Digitalisierung auf die Umwelt noch stärker in den Blick nehmen. Der starke Fokus auf die positiven Effekte zeigt sich insbesondere für die Studien, die sich auf potenzielle Effekte beziehen. Hier lässt sich ein gewisser Technik-Optimismus erkennen. Häufig werden nur die theoretischen Potenziale berechnet, ohne die **Rahmenbedingungen** und mögliche hemmende Faktoren für eine Umsetzung im Feld ausreichend einzubeziehen. Eine Forschungslücke besteht darin, diese auf ihre faktische Effektrichtung und -größe in der Umsetzung zu prüfen. Um ein ganzheitlicheres Bild der Umwelteffekte der Digitalisierung im Themenfeld zu erhalten, sollten daher verstärkt Anwendungen im Feld, sowohl pilothaft als auch in der Breite, umgesetzt und wissenschaftlich begleitet sowie evaluiert werden. So können neben den direkten auch die indirekten Effekte innerhalb eines einheitlichen methodischen Rahmens untersucht werden. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass Aussagen sehr kontextspezifisch bleiben und auf Grund der dynamischen Technologieentwicklung auch schnell überholt sein können.

Neben den Rahmenbedingungen sollten auch **vor- und nachgelagerte Effekte** stärker einbezogen werden. Neben den vorgelagerten Umweltauswirkungen für die Herstellung digitaler Technologien und Anwendungen gilt es auch **mögliche Rebound-Effekte** durch Verhaltensanpassungen von Konsument*innen oder Unternehmen, beispielsweise ein vermehrter Konsum oder eine gesteigerte Produktion, zu berücksichtigen. Dazu könnte beispielweise untersucht werden, wie Unternehmen und Konsument*innen die finanziellen Einsparungen, die in der Regel mit Energie- und Ressourceneinsparungen verbunden sind, nutzen und welche umweltrelevanten Verhaltensänderungen sich daraus ergeben.

Weitere Forschung sollte außerdem die **Technologien und Anwendungen** der Digitalisierung im Themenfeld **differenzierter** untersuchen. Auch wenn viele Technologien und Anwendungen eng verknüpft sind, wird in vielen Studien die Digitalisierung recht allgemein betrachtet. In diesen Fällen wird die Digitalisierung häufig nicht anhand von spezifischen Technologien oder Anwendungen operationalisiert, sondern durch abstrakte Hilfsindikatoren, z. B. dem Umsetzungsgrad der Digitalisierung in einem Unternehmen/Sektor oder Ausprägung der Digitalwirtschaft in einer Region. Solche Hilfsindikatoren haben für bestimmte Forschungszwecke ihre Berechtigung, doch sie können auf Grund ihres hohen Abstraktionsgrades Unschärfen in die Ergebnisse und Schlussfolgerungen bringen.

Eine weitere Forschungslücke besteht außerdem bei der **sektorübergreifenden Betrachtung**. Es fehlen Studien, die komplexe Wertschöpfungsnetzwerke abbilden, miteinander verknüpfen und verschiedene Szenarien aufspannen. Gerade die gesamtheitliche Betrachtung unter der Einbeziehung von möglichen Sektorkopplungen könnte weitere Potenziale aufdecken.

3.6 Ressourcennutzung

Im Themenfeld Ressourcennutzung stehen die direkten Effekte der Digitalisierung auf die Ressourcennutzung im Fokus, die beispielsweise durch den Ressourcenbedarf bei der Herstellung und Nutzung digitaler Endgeräte sowie der benötigten digitalen Infrastruktur entstehen. Eng damit verbundene THG-Emissionen und der Energieverbrauch, die bei der Herstellung, dem Betrieb und der Entsorgung dieser digitalen Geräte anfallen, werden ebenfalls in diesem Themenfeld berücksichtigt.

Aufgrund der identifizierten Überschneidungen dieses Themenfelds mit den Bereichen Energiesysteme, Kreislaufwirtschaft und nachhaltiges Wirtschaften wurde keine separate zusammenfassende Abbildung für dieses Themenfeld erstellt. Die wichtigsten Technologien und Anwendungsfelder dieses Themenfeldes sind in Tabelle 3, Tabelle 15 und Tabelle 17 enthalten.

3.6.1 Literaturanalyse

Überblick

Die verwendeten Suchbegriffe für das Themenfeld Ressourcennutzung umfassten beispielsweise Variationen von „Ressourcen“ (-verbrauch, -nutzung usw.) und spezifische Ressourcen (z. B. Gold, Kupfer, seltene Erden, Wasser, Boden) in Kombination mit Begriffen wie „digitale Infrastruktur“ und „Digitalisierung“. Auch der „Energieverbrauch digitaler Infrastruktur“ wurde in diesem Themenfeld recherchiert.

Die indirekten Effekte auf den Ressourcenverbrauch, die durch digitale Transformation entstehen, werden in weiteren, anwendungsspezifischen Themenfeldern betrachtet. Zum Beispiel wird Literatur, die Materialeinsparungspotenziale in der Industrie durch die Anwendung von Digital Twins thematisiert, unter „Nachhaltiges Wirtschaften“ behandelt, während Düngereinsparungspotenziale in der Landwirtschaft durch Precision Farming im Themenfeld

„Primärsektor und BioTech“ erörtert werden. „Ressourcennutzung“ ist demnach, zusammen mit Klimaschutz und -anpassung, ein übergreifendes Themenfeld.

Insgesamt wurden 22 Studien analysiert, wobei die Hauptüberschneidungen in den Bereichen Energiesysteme (8 Studien), Klimaschutz (6 Studien) und nachhaltiges Wirtschaften (6 Studien) festgestellt wurden. In den Studien wurde ein sehr heterogenes Spektrum an Technologien beobachtet. Eine Technologie, die in vielen methodologisch robusten Studien untersucht wird, ist Smart Meters/Smart Grid. Weitere erwähnte Technologien sind Digitalisierung und Internet allgemein, inklusive IKT-Geräte, KI, Cloud-Computing, IoT, 5G und Blockchain.

Identifizierte Effekte und Effektgrößen

Die Mehrheit der Studien (16) beschäftigt sich spezifisch mit den **CO₂-Emissionen, die durch den Betrieb digitaler Infrastrukturen für digitale Anwendungen oder Dienstleistungen entstehen** (z. B. Smart Meters, KI, Cloud-Computing, Blockchain u.Ä.). Die betrachteten Technologien sind sehr heterogen. Eine große Anzahl von Studien (14) untersucht den Ressourcenverbrauch und THG-Emissionen, die bei der Herstellung von Geräten anfallen, welche für die Digitalisierung benötigt werden (z. B. digitale Endgeräte, Rechenzentren, Smart Meter). Vier Studien befassen sich sowohl mit der Herstellung als auch mit dem Betrieb der digitalen Infrastruktur. Neben der Quantifizierung von THG-Emissionen werden für die quantifizierten Effekte auch andere Indikatoren verwendet, wie z. B. für Ressourcenverbrauch m³ Wasser, Tonnen Metalle oder das Abiotic Resources Depletion Potential (ADP)¹⁰.

Die **Effektrichtungen** in den in diesem Themenfeld berücksichtigten Studien sind recht **ausgewogen**: 10 Studien beschreiben positive Effekte, 8 negative Effekte, während die restlichen (4 Studien) eine neutrale oder unklare Richtung aufzeigen.

Die Mehrheit der analysierten Studien verwendet eine Lebenszyklusanalyse (LCA)¹¹ oder eine darauf basierende Methodik (z. B. CO₂-Fußabdruck) und untersucht die direkten Auswirkungen bestimmter digitaler Technologien auf die Umwelt. Bei den übrigen Studien handelt es sich um Fallbeispiele (3), statistische Auswertungen (2) und Modellierungen (2).

Alle analysierten Studien im Themenfeld Ressourcennutzung betrachten die vorgelagerten Effekte der Digitalisierung. Nur wenige Studien (4) untersuchen sowohl die direkten als auch die indirekten Effekte, die aus spezifischen Anwendungen resultieren.

¹⁰ ADP steht für "Abiotisches Erschöpfungspotenzial" und bezieht sich auf eine Methode zur Bewertung der Auswirkungen der Erschöpfung abiotischer Ressourcen in der Lebenszyklusanalyse (LCA). Es handelt sich um Kennzahlen, die das Verhältnis zwischen der jährlichen Produktion und den ultimativen Reserven einer Ressource im Vergleich zu einer Referenzressource darstellen. So wie das Treibhauspotenzial (GWP) verschiedener Schadstoffe in CO₂-Äq. umgerechnet wird, werden die ADP-Werte in der Regel in Antimon- oder Sb-Äquivalente umgerechnet (Van Oers et al., 2020).

¹¹ Laut [UBA](#) ist die Lebenszyklusanalyse (im Deutschsprachigem Raum häufig auch Ökobilanz genannt) ein Verfahren zur Erfassung und Bewertung umweltrelevanter Vorgänge. Diese Methodologie wurde ursprünglich zur Bewertung von Produkten entwickelt, wird heute aber auch auf Verfahren, Dienstleistungen und Verhaltensweisen angewendet. Sie berücksichtigt alle relevanten Umweltauswirkungen auf Boden, Luft und Wasser sowie alle Stoffströme, die mit dem betrachteten System verbunden sind. Normen zur Ökobilanzierung sind in internationalen ISO-Standards festgelegt. Die Ergebnisse von Ökobilanzen können zur Prozessoptimierung und bei Produktbewertungen verwendet werden, um umweltfreundliche Entscheidungen zu unterstützen.

Tabelle 21 Ausgewählte Studien für das Themenfeld Ressourcennutzung

Autoren und Jahr	Titel	Erkenntnisse
Bieser et al. (2023)	Opportunities of 5G Mobile Technology for Climate Protection in Switzerland	<ul style="list-style-type: none"> • Die Studie nimmt sowohl die vorgelagerten Effekte der 5G-Netzwerkinfrastruktur als auch die potenziell positiven Effekte ihrer Nutzung in drei Szenarien (optimistisch, erwartet, pessimistisch) in den Blick • Scope/Gegenstand: Vergleich der direkten und indirekten Effekte (ausgedrückt als CO₂-Äq.) pro übertragene GB von 5G (2030) Netzwerkinfrastruktur im Vergleich zu den von 2G-4G-Netzwerken (Baseline 2020). Exemplarische Anwendungen in bestimmten Sektoren (u.a. Smart Mobility, Smart Farming, Smart Grids) zur Erfassung potenzieller indirekter Effekte • Effekt: Richtung, Ausmaß <ul style="list-style-type: none"> – Die THG-Vermeidungspotenziale der vier untersuchten Anwendungsfälle (0,1-2,1 Mio. t CO₂-Äq.) sind deutlich größer als die direkten Effekte der 5G-Netzinfrastuktur (ca. 0,018 Mio. t CO₂-Äq.) sowie der zusätzlichen Nicht-5G-Geräte (0,03-0,16 Mio. t CO₂-Äq.) im Jahr 2030 – 85% Reduktion im Vergleich zu 2G/3G-Netzwerken (2020) und 44% Reduktion im Vergleich zu 4G-Netzwerken (2030). Die gesamten THG-Emissionen pro Jahr liegen jedoch 20% höher im Jahr 2030 als 2020 aufgrund gestiegener Nachfrage • Rebound-Effekte: Die Gesamtdatenübertragung wird voraussichtlich schneller zunehmen als die Netzwerkeffizienz. Dennoch könnte die Anwendung in Smart Grids etwa 200 kt CO₂-Äq. im Jahr 2030 einsparen (erwartetes Szenario). Bei einem schweizerischen Emissionsziel von etwa 29 Mt CO₂-Äq. für das Jahr 2030 sind die entsprechenden Einsparungen vergleichsweise gering. Dennoch könnte die Bedeutung dieser Einsparungen erheblich steigen, wenn man den kumulativen Effekt mehrerer Anwendungen von 5G (außerhalb des Smart Grids) oder den Einsatz in anderen Ländern berücksichtigt. Diese Aspekte wurden jedoch in dieser Studie nicht berücksichtigt. • Methodik/Indikatoren: LCA, Einsatz von Primärdaten (von Swisscom, ausschließlich relevant für die Schweiz) und Ökobilanzdatenbanken
Wohlschläger et al. (2020)	Ökologische Bewertung digitaler Energieinfrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> • Die Studie untersucht den Ressourcenverbrauch intelligenter Messsystemen im Kontext der Energiewende auf Haushaltsebene (direkte Effekte) • Scope/Gegenstand: Es werden drei Anwendungsfälle betrachtet: Consumer (beziehen Strom aus dem Netz), Prosumer (speisen Strom ins Netz ein) und Flexumer (kombinieren beides) • Effekte der Stromzählerinfrastruktur pro Haushalt und Jahr (Consumer/Prosumer/Flexumer): <ul style="list-style-type: none"> – Wasserverbrauch [m³]: 0,12/0,25/0,31 – Metallverbrauch [kg Fe-Äq.]: 2,67/16,3/17,69 – THG-Emissionen [kg CO₂-Äq.]: 29,23/51,57/63,28 • Die Effekte der digitalen Stromzählerinfrastruktur für Prosumer und Flexumer sind deutlich höher als für Consumer. Diese werden jedoch insgesamt durch die Energieeinsparpotenziale, die durch diese Technologien entstehen, überkompensiert. Diese Potenziale betragen 3,7% des jährlichen Stromverbrauchs eines durchschnittlichen 4-Personenhaushalt in Deutschland (mit jährlichem Stromverbrauch von rund 4.500 kWh, Daten von 2017), das entspricht 92,7 kg CO₂-Äq. • Bei den indirekten Effekten werden lediglich Emissionseinsparpotenziale erfasst, jedoch keine Auswirkungen auf den Ressourcenverbrauch • Rebound-Effekte: Geschätzt auf Basis von Literaturangaben (ca. 10–30%) • Methodik/Indikatoren: LCA, Verwendung von Daten aus Ökobilanzdatenbanken

Chancen und Herausforderungen

Die **Auswirkungen der Digitalisierung auf die Ressourcennutzung können erheblich sein, sowohl positiv als auch negativ**. Für eine übergeordnete Bewertung ist es entscheidend, diese **direkten Effekte immer im Verhältnis zu den indirekten Effekten** der Nutzung von digitalen Geräten und Anwendungen zu betrachten. Es gibt aktuell zu wenige Studien, die diese umfassende Perspektive einnehmen, was auf Forschungslücken hinweist.

Die Effekte der Digitalisierung auf die Umwelt sind gemischt. Einige Technologien wie zum Beispiel 5G, digitale Messsysteme für Energie und Cloud-Computing weisen ein erhebliches Potenzial für positive Auswirkungen auf Ressourceneffizienz auf. Es gibt jedoch auch potenziell große Risiken im Zusammenhang mit der Digitalisierung, wie beispielsweise **Kryptowährungen** und **Blockchain**. Die Literatur zu diesen Themen ist jedoch begrenzt und bietet nur wenige quantitative Daten. Die vorhandenen Daten basieren oft auf statistischen Analysen aus Daten wie z. B. Anzahl von Transaktionen am Tag oder Abschätzungen des Umfangs von Kryptowährungsbergbau. Es bedarf daher weiterer robuster quantitativer Studien, bspw. LCA, Input-Output-Analysen oder Stoffstromanalysen-/Modelle, um das Potenzial und die Risiken besser zu bewerten.

Insgesamt hängen die Auswirkungen der Digitalisierung stark vom **Nutzungsverhalten** ab, einschließlich möglicher **Rebound-Effekte**. Daher ist eine Sensibilisierung für den verantwortungsvollen Umgang mit digitalen Technologien und, sofern möglich, eine gezielte Adressierung des Nutzerverhaltens zur Verringerung von Rebound-Effekten, von großer Bedeutung.

3.6.2 Forschungslücken aus der Literaturanalyse

Generell ergab unsere Recherche **keine Literatur**, die die **Effekte der Digitalisierung im Ressourcenextraktionssektor** untersucht. Lediglich eine identifizierte Publikation beschrieb qualitativ, dass die Nutzung digitaler Anwendungen zu Effizienzsteigerungen im Bergbau führen könnte (Barteková & Börkey, 2022). Dennoch werden mögliche Rebound-Effekte erwähnt, wie zum Beispiel die Reduzierung der Anreize für eine Transformation hin zur Kreislaufwirtschaft durch diese Effizienzgewinne. Dennoch wurden keine Studien identifiziert, die quantitative Daten zu diesen Potenzialen und Risiken liefern.

Die Mehrheit der Studien im Themenfeld Ressourcennutzung basieren auf LCA. LCA-Methodologien können stark voneinander abweichen, was die **Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschwert**. Deshalb ist es wichtig, weiterhin an der **Vereinheitlichung der Methoden** zur Lebenszyklusanalyse für verschiedene digitale Geräte und Anwendungen zu arbeiten¹². Trotz der Heterogenität in den angewandten Methodologien halten die meisten Studien in diesem Themenfeld einem hohen wissenschaftlichen Standard stand.

Es wurde nur sehr **wenig Literatur mit quantitativen Ergebnissen zu den Auswirkungen der Blockchain-Technologie** gefunden. Es bleibt unklar, ob dies an der angewandten Suchmethode liegt oder ob das Thema bisher generell wenig erforscht wurde. Eine gefundene Studie (Ramesohl et al., 2021) zitiert 8 Studien, die sich speziell mit den Umweltauswirkungen von Blockchain befassen, insbesondere in Bezug auf den Energieverbrauch der Kryptowährungen Bitcoin und Ethereum. Laut dieser Studie gibt es unterschiedliche Schätzungen zum Energiebedarf von Bitcoin, wobei die Schätzungen des digiconomist-Blogs

¹² Es gibt bereits erste Bemühungen, um die Methodologien von LCA mit IKT-Bezug zu harmonisieren. Ein wichtiges Beispiel davon sind die Standards der „European Framework Initiative for Energy & Environmental Efficiency in the ICT Sector“. Siehe <https://ictfootprint.eu/en/ict-standards>

von de Vries¹³ in weiten Kreisen als Referenz zitiert werden. Dies deutet darauf hin, dass es noch viel Entwicklungspotenzial gibt, um die Auswirkungen dieser digitalen Anwendungen genauer zu erfassen. Besonders im Bereich der Kryptowährungen sind die Berechnungen der direkten Auswirkungen sehr hoch (Ramesohl et al., 2021). Daher ist weiterführende, systematischere Forschung in diesem Bereich wichtig, insbesondere weil die Mehrheit der untersuchten Studien auf erhebliche negative Auswirkungen von Blockchain aufgrund des sehr hohen Energieverbrauchs hinweist.

Es mangelt zudem an Studien, die sich **sowohl mit den direkten Effekten digitaler Technologien als auch mit den indirekten Effekten ihrer Nutzung quantitativ auseinandersetzen**. Die meisten Beispiele stammen aus dem Energiebereich, wie etwa Smart Meter. Generell ist es schwierig, die Relevanz der in diesen Studien berechneten (negativen) direkten Effekte der Digitalisierung (z. B. Ressourcenverbrauch und THG-Emissionen bei der Herstellung von IKT-Geräten) zu ermitteln, ohne diese den Potenzialen und möglichen Rebound-Effekten ihrer Nutzung (beides indirekte Effekte) gegenüberzustellen. Obwohl es viele Studien gibt, die diese indirekten Effekte adressieren, sind die Ergebnisse aufgrund ihrer methodischen Unterschiede meist schwer vergleichbar. Zukünftige Forschungsdesigns könnten daher stärker eine übergreifende Perspektive verfolgen, die sowohl direkte als auch indirekte Effekte innerhalb eines einheitlichen methodologischen Rahmens integriert. Auch Rebound-Effekte digitaler Messsysteme in Haushalten sind bisher wenig erforscht, unter anderem, weil sie stark vom Nutzungsverhalten abhängen. In diesem Kontext können Methoden zur Analyse von Rebound-Effekten weiterentwickelt werden, die beispielsweise Verhaltensänderungen systematisch erfassen, z. B. anhand der Nutzung von speziell dafür konzipierten Befragungen.

3.7 Primärwirtschaft und BioTech-Verfahren

Der Sektor der Primärwirtschaft umfasst alle digitalen Technologien, die im Bereich Agrar- und Forstwirtschaft und Fischerei Anwendung finden. Auch biotechnologische Verfahren fallen in dieses Kapitel, da sie vor allem im Feld des Precision Framings oder Farming 4.0 genutzt werden. Trotz intensiver Recherche wurden keine einschlägigen Publikationen zu den Themen Digitalisierung, Umwelteffekten und BioTech-Verfahren identifiziert. Dieser Abschnitt fokussiert sich daher auf digitale Innovationen in der Primärwirtschaft. Neben einer systematischen Literaturanalyse wurde eine anwendungsbezogene und tieferegehende Analyse mithilfe eines Cluster-Steckbriefs zum Thema Smart Agriculture (Kap. 3.7.2) vorgenommen.

Tabelle 22 gibt einen Überblick über die wichtigsten Schlüsseltechnologien, Anwendungsbeispiele, Umweltchancen und -risiken sowie eine Einschätzung zur Studienlage im Bereich Primärwirtschaft.

¹³ Bitcoin Energy Consumption Index, siehe <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>

Tabelle 22 Digitale Schlüsseltechnologien im Themenfeld Primärwirtschaft

Relevante Schlüsseltechnologien 	IoT 	KI & Big Data 
Funktionsweise 	Bereitstellung und Integration relevanter Daten und optimierter Einsatz von Ressourcen in der Landwirtschaft durch digitale Sensorik und Drohnen	Erfassung und Analyse relevanter Daten für smartes Management und Erleichterung effektiver Entscheidungen im Primärsektor
Ausgewählte Anwendungsbeispiele 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensorik und Drohnen für automatisierte Landmaschinensysteme und zur Bereitstellung von Daten für die Präzisionslandwirtschaft 	<ul style="list-style-type: none"> • KI-gestützte Datenanalysen ermöglichen bessere Handlungsempfehlungen, z. B. in der Präzisionslandwirtschaft und beim Schädlingsmonitoring in der Forstwirtschaft • Farm-Management-Informationssysteme, unter anderem mit mobilen Endgeräten
Umweltchancen 	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierter Einsatz von Ressourcen wie etwa Boden, Energie und Wasser • Schonung der Umwelt und Wildtierschutz, z. B. durch eine geringe Bodenversauerung • Geringerer Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden durch präzises Monitoring und darauf basierend eine Minderung von THG-Emissionen oder Luftverschmutzung • Optimierung und Automatisierung der Erntevorgänge 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserte Land- und Ressourcennutzung ähnlich wie für IoT • Verbesserung der Klimaanpassung von Wäldern und anderen Räumen des Primärsektors • Optimierung des Datenmanagements
Umweltrisiken 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Energie- und Ressourcenbedarf durch den gesteigerten Gebrauch von IoT-Technologie • Rebound-Effekte können Ressourceneinsparungen entgegenwirken 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Energie- und Ressourcenbedarf durch den gesteigerten Gebrauch von KI • Rebound-Effekte können Ressourceneinsparungen entgegenwirken
Effekte auf THG-Emissionen 	 Positiver Effekt durch den effizienteren Gebrauch von Ressourcen und damit einhergehend eine potenzielle Minderung von THG-Emissionen	 Positiver Effekt durch effektivere Entscheidungen , da alle relevanten Daten berücksichtigt werden und die besten Optionen von KI-basierten Algorithmen dargestellt werden
Studienlage: Quantifizierungen von Umweltwirkungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Im Bereich Landwirtschaft und Tierhaltung vor allem Case Studies außerhalb Deutschlands • Häufig keine Berücksichtigung der Auswirkungen der Produktion und Nutzung von IoT-Technologien (direkte Effekte) oder Rebound-Effekten 	<ul style="list-style-type: none"> • Im Bereich Landwirtschaft und Forstwirtschaft vor allem Case Studies außerhalb Deutschlands • Keine Berücksichtigung der Auswirkungen der Produktion und Nutzung von KI-Technologien (direkte Effekte) oder Rebound-Effekte

Technopolis und IÖW, 2024

3.7.1 Literaturanalyse

Überblick

Für dieses Themenfeld wurden systematisch Studien nach dem im Methodenteil beschriebenen Kriterien recherchiert, die an der Schnittstelle von Primärwirtschaft und BioTech, Nachhaltigkeit und Digitalisierung liegen. Die Primärwirtschaft beinhaltet in dieser Suche die Bereiche Landwirtschaft inklusive Tierzucht, die Forstwirtschaft und die Fischerei. Der Bergbau ist nicht beinhaltet. Die hierfür in einem Workshop erarbeiteten Suchbegriffe sind beispielhaft Smart Farming, Aquakultur, Forestry 4.0 und Pharma 4.0.

In diesem Themenfeld wurden 14 Studien identifiziert, die der Methodik der Recherche dieser Metastudie im Hinblick auf die Eigenschaft „quantifizierte Ergebnisse“ entsprechen. Aufgrund dieser im Vergleich zu anderen Themenfeldern geringen Zahl wurden 13 weitere Studien mit qualitativen Analysen hinzugezogen, um eine ganzheitlichere Analyse zu ermöglichen und Forschungslücken besser aufzuzeigen. In allen Analysen, die Effektgrößen und Effektrichtungen behandeln, wird sich nur auf die 14 quantifizierten Studien bezogen. Insgesamt wurden damit 27 Veröffentlichungen als für diesen Bereich relevant identifiziert.

Von den 27 Veröffentlichungen stammen 24 aus dem Bereich der Landwirtschaft, zwei aus der Forstwirtschaft und eine aus dem Bereich BioTech. Trotz einer weiten Suche konnte an der Intersektion von Digitalisierung, Umwelteffekten und BioTech-Verfahren keine quantitative Studie identifiziert werden. Aufgrund dieses Mangels an Studien beschränkt sich die Analyse im Themenfeld auf den Primärsektor. Auf das Fehlen von Studien zu BioTech wird im letzten Absatz dieses Kapitels eingegangen. In den Studien im Bereich Primärsektor wurden insbesondere folgende Technologien analysiert: der Einsatz von Sensoren zur präzisen und teils Echtzeit-Ermittlung von landwirtschaftlichen Daten, automatisierte Landmaschinensysteme und Farm-Management-Informationssysteme.

Identifizierte Effekte und Effektgrößen

Bei den Studien mit quantifizierten Ergebnissen handelt es sich in dem Themenfeld vorwiegend um Analysen, die Umwelteffekte des Einsatzes von digitalen Technologien in der Agrarwirtschaft und Tierproduktion empirisch messen und dann im Rahmen von LCAs oder einer eigenen Methodik quantifizieren (9 von 13).

Konkrete Technologien, die dabei betrachtet werden, sind digitale Landmaschinensysteme, die die **Automatisierung** von Prozessen erlauben (in 5 von 9 Studien betrachtet), Sensoren die Daten generieren, die den **präziseren Einsatz von Ressourcen** (Präzisionslandwirtschaft) in der landwirtschaftlichen Produktion ermöglichen (6 von 9 Studien) und zuletzt Farm-Management-Informationssysteme (2 von 9 Studien), welche durch **Datenanalysen** optimierte Entscheidungshilfen für Landwirte entwickeln.

Gemessen werden ausschließlich Umwelteffekte, die durch eine **Verbesserung der Effizienz durch Digitalisierung** in der landwirtschaftlichen Produktion erzielt wurden. Die Indikatoren der Studien sind hierbei zum einen Ressourceneinsparungen, die durch Effizienzgewinne erzielt wurden, etwa Düngemittel oder Energie, in Form der Menge oder des Geldwerts, der gespart wurde. Zum anderen wurden Umwelteffekte bemessen, die sich durch die Ressourcenminderung ergeben, etwa die Minderung von Treibhausgasen oder Luftverschmutzung durch eine verminderte Anwendung von Düngemitteln.

In einer Studie zum Einsatz von Smart Farming-Technologien auf mehreren Gehöften in Griechenland konnten durch Sensortechnologie und darauf basierenden Handlungsempfehlungen der Einsatz von Düngemittel sowie Methanemissionen um bis zu 38% und der Treibstoffverbrauch bis zu 31% gesenkt werden (Fragkou et al., 2023). Auf Gehöften auf

Zybern konnte durch Nutzung desselben Dienstleisters und Technologie der Wasserverbrauch bis zu 22% reduziert werden (Adamides et al., 2020).

Auch in der **Tierzucht** bestehen Potenziale zur Treibhausgasminderung. Durch eine sensorgestützte Erhebung von Tierdaten und denen daraus von einem Supercomputer abgeleiteten Handlungsempfehlungen konnten in einem industriellen spanischen Ziegenmilchbetrieb durch Effizienzgewinne 11% Treibhausgase weniger emittiert werden als zuvor (Pardo et al., 2022). Auch konnte die Eutrophierung von Süßwasser um 14%, die Bodenversauerung um 9% und die Landnutzung um 15% verringert werden.

Im **deutschen Kontext** wurden innerhalb der ausschließlich quantifizierten Studien nur zwei Studien ermittelt. Diese Studien validieren, dass der generelle Wirkungsmechanismus durch Ressourcenminderung und die positive Effektrichtung auch unter deutschen geographischen und wirtschaftlichen Bedingungen gilt (Fuchs et al., 2021; Knierim et al., 2019). Diese Veröffentlichungen nutzen aber entweder einen nicht geeigneten Indikator oder eine ungeeignete Methodik, um die vorgenannten Größenordnungen der Effekte zu validieren.

Eine Systematic Review von 2019, welche Studien außerhalb des genutzten Literaturrasters zusammenträgt, zeigt ähnliche Effektgrößen auch im deutschen Kontext auf (R. Liu et al., 2019). So zitieren die Autor*innen eine Studie zum Maisanbau in Deutschland, die zeigt, dass durch digitale Anwendungen in der Landwirtschaft eine Stickstoffdünger-Einsparung von 34% erzielt werden konnte (Finger et al., 2019). Nichtsdestominder bleibt die Höhe der quantifizierten Einsparungen stark fallabhängig (Finger et al., 2019).

Die restlichen quantifizierten Studien (3 aus 13) betrachten potenzielle Effekte der Digitalisierung im gesamten Sektor Landwirtschaft durch Extrapolieren von Einschätzungen von Expert*Innen und Einzelfallstudien auf den Gesamtsektor. Die Indikatoren dieser Studien sind Umweltkosten und Energieeinsparung durch Digitalisierung.

Auf Basis dieser Methodik finden diese meist große Einsparungspotenziale für den gesamten Sektor. Laut einer Bitkom Studie (2021) kann durch Digitalisierung in einem Best-Case Szenario in der Landwirtschaft 12% der Emissionen bis 2030 eingespart werden.

Des Weiteren ist bei allen Studien, auf die sich hier bezogen wird, zu beachten, dass diese hauptsächlich **indirekte Effekte** analysieren. Direkte Effekte im Betrieb werden nur teils betrachtet, die Produktion der IKT wird in keiner Veröffentlichung adressiert. Genauso werden andere indirekte Effekte, etwa Rebound-Effekte, größtenteils nicht in die Rechnungen mit einbezogen. Durch diese einseitigen Betrachtungen entsteht ein sehr einheitliches positives Bild (10 von 13 Studien identifizieren positive Effekte) in der Einschätzung der Auswirkung in der Landwirtschaft.

Für ein vollständigeres Bild müssen diese bisher nicht analysierten Effekte betrachtet werden. In einer qualitativen Studie beschreibt Ahlefeld (2019) etwa, wie Ressourceneinsparungen, besonders von Land und Wasser, durch Rebound-Effekte teils oder sogar gänzlich wegfallen können. Weitere Evidenz hierfür zeigen Bieser et al. (2023). In einer Betrachtung der Umwelteffekte der 5G-Technologie im Sinne einer Einsparung von CO₂-Äq. zeigen sie unter Einbezug aller genannten Effekte, einschließlich Betrieb und Produktion der IKT-Technologie, dass abhängig von verschiedenen starken Rebound-Effekten die absoluten Einsparungen sehr gering ausfallen können.

In der **Forstwirtschaft** liegen keine quantifizierten Studien vor. Aus den Studien mit qualitativen Ergebnissen lässt sich aber ableiten, dass dieselbe Technologiewirkung wie in der Landwirtschaft auch in der Forstwirtschaft beobachtet werden kann. So beschreibt die Studie von Müller et al. (2022), wie durch eine digital gestützte Datensammlung und einer anschließenden maschinellen Auswertung die Anfälligkeit von Wäldern für Borkenkäfer besser

vorhergesagt werden kann. Auf Basis dieser Analyse kann man diesen dann besser und präziser vorbeugen.

Tabelle 23 Ausgewählte Studien für das Themenfeld Primärwirtschaft und BioTech-Verfahren

Autoren und Jahr	Titel	Erkenntnisse
(Fragkou et al., 2023)	Quantifying the impact of a smart farming system application on local-scale air quality of smallhold farms in Greece	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie: Landwirtschaftliche Datenerfassung durch Sensorik von einem Smart Farming-Dienstleister • Scope/Gegenstand: Mehrere Gehöfte in Griechenland und Zypern wurden vor und nach der Digitalisierung analysiert
Adamides et al., (2020)	Smart farming techniques for climate change adaptation in Cyprus	<ul style="list-style-type: none"> • Effekt: Positive Umweltwirkung, Ressourceneinsparung zwischen ~20-40% • Methodik: Erhebung der Ressourceninputs vor und nach der Digitalisierung, Berechnung von Emissionen von Treibhausgasen auf Basis von Ressourcenverbrauch, Schadstoffmessung in der Luft • Indikatorik: Stickstoffdüngerverbrauch, Wasserverbrauch, Schadstoffemission (NO₂, NO_x, VOC, PM₁₀, NH₃)
Pardo et al. (2022)	Influence of precision livestock farming on the environmental performance of intensive dairy goat farms	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie: Durch Sensortechnik sowie mobile Endgeräte wurden Tierdaten gesammelt, auf Basis derer ein Supercomputer Handlungsempfehlungen für die Landwirt*innen entwickelt hat • Scope/Gegenstand: Industrielle Ziegenmilch Farmen in Spanien • Effekt: Durch Effizienzsteigerung in der Milchproduktion konnten positive Umwelteffekte erzielt werden • Methodik: Erhebung der Ressourceninputs vor und nach der Digitalisierung, Berechnung von Umwelteffekten anhand vom Ressourcenverbrauch und anderen Farm-Inputs • Indikatorik: Emission von CO₂-Äq., Ozonabbau, Bodenversauerung, Eutrophierung von Süßwasser, Landnutzung, Wasserverbrauch, Energieverbrauch

Technopolis und IÖW, 2024

Chancen und Herausforderungen

Die Studien verdeutlichen das **erhebliche Potenzial der Präzisionslandwirtschaft**, das sich durch den Einsatz von Sensoren und möglicherweise nachgelagerten Farm-Management-Informationen-Systemen eröffnet. Ressourceneinsparungen, insbesondere bei Stickstoffdüngemitteln in der Größenordnung, die in den Studien ermittelt wurden (~30%), würden einen bedeutenden Schritt hin zu einer nachhaltigeren Landwirtschaft darstellen. Diese Technologien zeigen auch in der Tierhaltung Einsparpotenziale auf. Die Technologie der Automatisierung landwirtschaftlicher Maschinen bietet die Möglichkeit zur Energieeinsparung sowohl im Ackerbau als auch in der Tierhaltung.

Interessanterweise zeigt sich in vielen Studien, dass die Integration von Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) in Kombination mit anderen klimafreundlichen Anwendungen und landwirtschaftlichen Praktiken, die auf Klimaschutz und Anpassung ausgerichtet sind, eine vielversprechende Herangehensweise ist.

Ein Blick in die **qualitativen Studien** in dem Themenfeld (Ali et al., 2023; Javaid et al., 2023; Marvin et al., 2022) lässt darauf schließen, dass die Analyse der von Sensoren erfassten Daten durch KI und Machine Learning eine immer wichtigere Rolle in der Landwirtschaft spielen wird. Diese Technologien ermöglichen eine noch präzisere und datengesteuerte Bewirtschaftung von

Feldern und Tierbeständen, was zu einer nachhaltigeren und effizienteren Landwirtschaft beitragen kann.

Eine Herausforderung, die mehrere Studien hervorheben, ist das Auftreten von **Rebound-Effekten**, die die möglichen Ressourceneinsparungen mindern können. Diese Effekte werden in Studien wie Ahlefeld (2019) und Liu et al. (2023) untersucht, und es wird betont, dass Umweltgesetze im Bereich der Primärwirtschaft eingesetzt werden können, um diesen Rebound-Effekten entgegenzuwirken.

Darüber hinaus wird in vielen Studien auf die beträchtlichen **Investitionssummen** hingewiesen, die für die Digitalisierung der Landwirtschaft erforderlich sind. Dies stellt eine große Herausforderung für die Implementierung dar. Ebenfalls wird auf den Bedarf an **Schulungen** für Landwirt*innen im Umgang mit digitalen Technologien hingewiesen, da ihnen oft die Expertise fehlt, um diese Technologien effektiv zu nutzen. Ohne angemessene Schulung könnten die Vorteile der Digitalisierung nicht vollständig realisiert werden.

Mit zunehmendem Einsatz von KI-Technologien und Maschinellem Lernen zur Datenauswertung in der Landwirtschaft wird es besonders relevant, die **Umwelteffekte im Zusammenhang mit dem Betrieb von IKT** zu berücksichtigen.

3.7.2 Smart Agriculture (Cluster-Steckbrief)

Tabelle 24 Umweltauswirkungen der Landwirtschaft

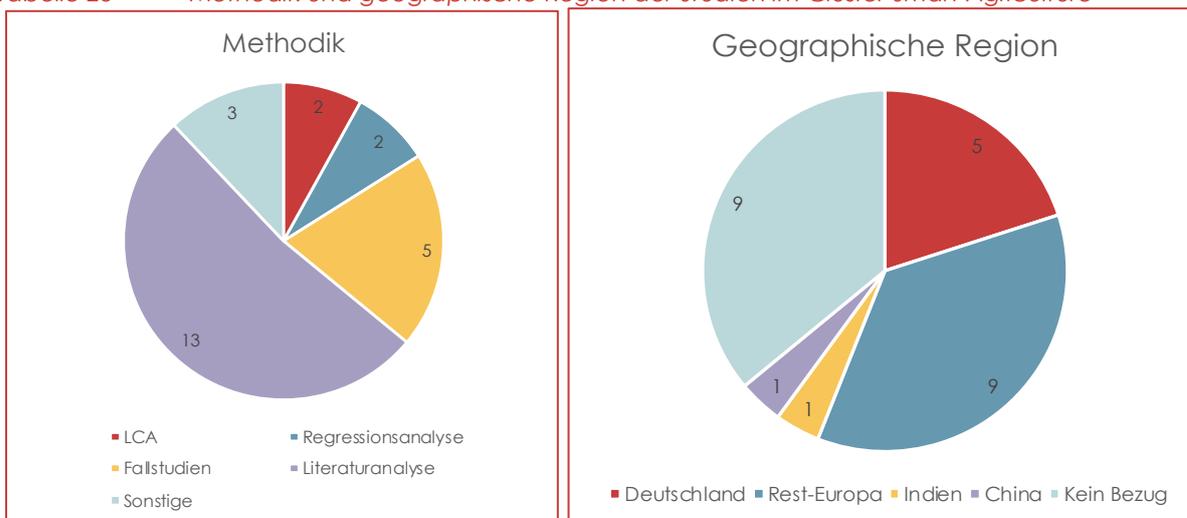
Umweltauswirkung der Landwirtschaft	
Verantwortlich für 8.3% der Gesamtemissionen Deutschlands 2022 , davon stammen 69.5% aus der Tierhaltung (UBA, 2023b)	 
Die Landwirtschaft ist weltweit primär für Desertifikation und Degradation von Böden verantwortlich (EC JRC, 2018)	 
Der Landwirtschaftssektor ist für 50% der Umweltbelastungen von Luft und Wasser in der EU verantwortlich (European Environment Agency, 2020)	

Technopolis und IÖW, 2024

Eingrenzung des Clusters

- Veröffentlichungen zu Umwelteffekten der Digitalisierung im Bereich Landwirtschaft
- Kein Einbezug von Forstwirtschaft

Tabelle 25 Methodik und geographische Region der Studien im Cluster Smart Agriculture



Technopolis und IÖW, 2024, n=25

- Die qualitative Einordnung der Umweltpotenziale digitaler Landwirtschaft in Form von Literaturanalysen ist sehr umfassend
- Im Bereich der quantifizierten Erfassung von Umwelteffekten der Digitalisierung in der Landwirtschaft dominieren Einzelfallstudien und LCAs für einzelne (digitalisierte) landwirtschaftliche Betriebe/Bauernhöfe und es **mangelt an größeren für den Gesamtsektor aussagekräftigen Studien**
- Trotz expliziter Suche nach Studien im deutschen Kontext gibt es kaum (zumal **quantitative**) **Veröffentlichungen** zu Umwelteffekten von Digitalisierung in der **deutschen Landwirtschaft**

Untersuchte Anwendungen und Schlüsseltechnologien

Tabelle 26 Studienlage nach digitalen Schlüsseltechnologien

	Digitale Landmaschinen-systeme	Sensoren und Robotik	Drohnen	Farm-Management-Informationssysteme	Digitale Nachschlagewerke und Citizen Science
Mögliche Umweltfreundliche Anwendungen der digitalen Technologien	Optimierung der Flächenbewirtschaftung /Reduktion von Düngemitteln	Reduktion von Pflanzenschutz-/ Düngemitteln Datenerfassung und -auswertung Wildtierschutz Unkrautregulierung Optimierung der Flächenbewirtschaftung und Erntevorgänge	Reduktion von Pflanzenschutzmitteln Wildtierschutz Datenerfassung und -auswertung	Optimierung der Flächenbewirtschaftung Optimierung von Datenmanagement	Erfassung der Flora und Fauna
Anzahl untersuchter Studien	5 Studien	8 Studien	0 Studien	1 Studien	0 Studien

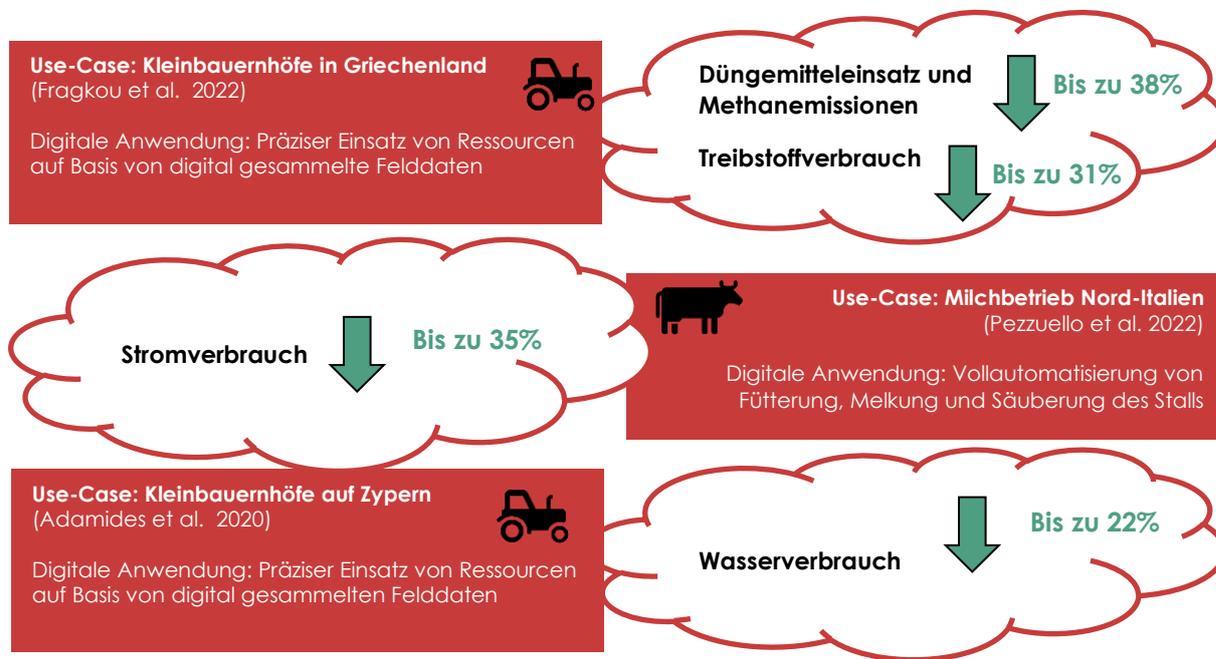
Technopolis und IÖW, 2024 (in Klassifizierung nach Kliem et al. 2022)

- Der positive Effekt von Digitalen Landmaschinen sowie von Präzisionsfarming durch Sensorik ist bereits gut quantitativ erfasst.

- Mehr Auswertungen im Bereich des Einsatzes von Drohnen, Farm-Management-Informationssystemen und Digitale Nachschlagewerke und Citizen Science sind nötig.

Quantifizierte Effekte

Abbildung 25 Ausgewählte Umwelteffekte digitaler Technologien im Cluster Smart Agriculture



Technopolis und IÖW, 2024

- Case Studies bei einzelnen Kleinbauernhöfen zeigen ein substantielles Potenzial für Effizienzgewinne durch den Einsatz einzelner digitaler Technologien.
- Keine Berücksichtigung der Auswirkungen des Betriebs und der Produktion von IKT-Technologien (direkte Effekte) oder Rebound-Effekte.

Art der analysierten Umwelteffekte

Tabelle 27 Direkte und indirekte Effekte im Cluster Smart Agriculture

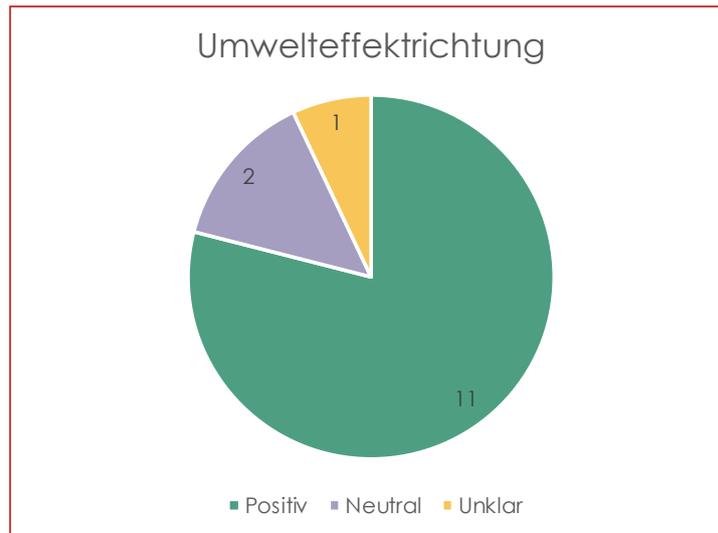
Direkte Effekte (Ressourcenaufwand für Produktion und Nutzung digitaler Technologien)	Indirekte Effekte durch die Nutzung digitaler Technologien (enabling effects)	Weitere Indirekte Effekte (z. B. Rebound-Effekte)
Die Umwelteffekte des Betriebs der IKT werden in den meisten Studien mit einbezogen, in keiner Studie werden die Umwelteffekte der Produktion der IKT-Technologien betrachtet.	Der Einfluss der Digitalisierung auf den agrarwirtschaftlichen Produktionsprozess ist das Hauptaugenmerk der analysierten Studien.	Innerhalb der quantifizierten Fallstudien keine Betrachtung der Rebound-Effekte. Gesonderte qualitative Betrachtungen des Rebound-Effekts zeigen im Bereich der Agrarwirtschaft (Ahlefeld, 2019) als auch in der Tierzucht (Liu et al. 2023) Gesetzgebung als nötig an, damit Effizienzgewinne durch Digitalisierung nicht eine umweltbelastende Intensivierung der Landwirtschaft zur Folge haben. Laut Ahlefeld (2019) unterscheiden sich in der Landwirtschaft Rebound-Effekte je nach Ressource : Bei Wasser können diese hoch sein (über 100%), bei Landnutzung mittel, und bei Pflanzenschutzmitteln und Dünger gering.

- Keine Betrachtung der Umwelteffekte der Produktion von digitaler Infrastruktur und Technologien im Bereich Smart Farming in bestehenden Studien
- Ohne Gesetzgebung drohen Rebound-Effekte in der Landwirtschaft, einen Teil der Potenziale für Ressourcenschonung nichtig zu machen oder sogar überzukompensieren (Wasser).

Übergeordnete Effektrichtung der untersuchten quantifizierten Studien

- **Größtenteils positive Einschätzung** des Umwelteffekts von Digitalisierung in der Landwirtschaft
- Neutrale sowie unklare Effekte entstehen durch qualitative Potenzial- und Risikobetrachtungen sowie Analysen von möglichen Rebound-Effekten

Abbildung 26 Effektrichtung der analysierten Studien im Cluster Smart Agriculture



Technopolis und IÖW, 2024, n=14

3.7.3 Forschungslücken aus der Literaturanalyse

Im Bereich der Landwirtschaft und Umweltauswirkungen der Digitalisierung gibt es einige wichtige Aspekte, die noch weiter erforscht werden müssen:

Umwelteffekte der Produktion von IKT-basierten Technologien: Es ist von großer Bedeutung, die Umweltauswirkungen der Herstellung von IKT in Studien mit einzubeziehen, um ein ganzheitlicheres und damit akkurateres Ergebnis der Quantifizierung von Umwelteffekten zu erzielen.

Quantifizierte Betrachtungen des möglichen Rebound-Effekts und anderer indirekter Effekte: Eine quantitative Analyse des Rebound-Effekts in Bezug auf die Digitalisierung der Landwirtschaft ist von großer Bedeutung, um empirisch einordnen zu können, wie groß der Rebound-Effekt in diesem Sektor ist.

Quantifizierte Betrachtungen des Effekts bestimmter Technologiegruppen: Die digitalen Technologien Drohnen, digitale Nachschlagewerke und Citizen Science sind laut Zusammenfassung von Kliem et al. (2023) in der Landwirtschaft etabliert, wurden aber bisher hinsichtlich ihrer Umwelteffekte noch nicht quantifiziert bewertet. Auch werden in den betrachteten Studien Farm-Management-Informationssystemen nur in Verbund mit Sensoren Technologien betrachtet. Eine gesonderte Analyse dieser Technologien ist wünschenswert, um das Potenzial dieser besser einordnen zu können.

Quantifizierte Betrachtungen von Fischerei und Forstwirtschaft: Es ist wichtig, nicht nur die Auswirkungen der Digitalisierung in der Landwirtschaft zu untersuchen, sondern auch in den

Sektoren Fischerei und Forstwirtschaft, da diese Bereiche ebenfalls erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt haben und von digitalen Technologien profitieren könnten.

Größer angelegte Studien im deutschen Kontext: Da der Effekt von Digitalisierung im Landwirtschaftsbereich aufgrund von verschiedenen Anbauarten, Umweltbedingungen und Industrialisierungsgraden sehr unterschiedlich sein kann, sind für valide Aussagen für den deutschen Kontext, gerade zu den Effektgrößen einzelner Technologien, Studien mit größeren Stichproben aus Deutschland vonnöten. Die fragwürdige Übertragbarkeit individueller Case Studies in den deutschen Kontext wurde vor allem im Steckbrief ersichtlich.

Erfassung des kompletten Lebenszyklus und tiefergehende Analyse von potenziellen Effizienzgewinnen: Im Rahmen des Steckbriefs wurde ersichtlich, dass die Umwelteffekte der Produktion und des End-of-Life der digitalen Anwendungen im Bereich Landwirtschaft tiefer analysiert werden sollten. Zudem sollten diese Erkenntnisse mit den Potenzialen für Effizienzsteigerungen in diesem Bereich verglichen werden.

Im Bereich BioTech ließ sich nur eine Übersichtsstudie finden (Krüger et al., 2020). Eine kurze Nachrecherche zeigt, dass es digitale Technologien im Bereich BioTech gibt, dass diese auch umweltrelevant sind (etwa in der Genomsequenzierung oder im Biomaterial 3D-Druck), aber dass die Umwelteffekte dieser Technologien nicht quantifiziert werden. In Anbetracht des Potenzials für positive wie negative Umwelteffekte im Bereich BioTech wären Analysen sehr lohnenswert, um diese Forschungslücke füllen zu können.

3.8 Forschungsinfrastrukturen

Im Themenfeld Forschungsinfrastrukturen wurden die Effekte der Digitalisierung im Kontext des wissenschaftlichen Arbeitens und der dabei benötigten Infrastrukturen analysiert. Gerade energieintensive Struktureinheiten wie wissenschaftliche Großgeräte, Labore oder Rechenzentren sollten dabei im Fokus stehen. Zu den Nachhaltigkeitseffekten der Digitalisierung in diesem Bereich konnten jedoch keine relevanten Studien identifiziert werden. Dieser Abschnitt fokussiert sich daher auf digitale Anwendungen im Wissenschaftssystem insgesamt, außerhalb solcher großen Infrastrukturen. Beispielsweise können digitale Anwendungen die Präzision und Geschwindigkeit der Datenerhebung verbessern und den Umfang der Datensammlung erheblich erhöhen. Darüber hinaus können mit digitalen Werkzeugen Muster erkannt werden, die andernfalls unentdeckt blieben. Praktische Beispiele umfassen die Analyse großer Datenmengen mittels Big Data oder den Einsatz von Künstlicher Intelligenz zur Harmonisierung von Datensätzen (Franzen, 2019; Gilch et al., 2019; Martins et al., 2021). Der Gebrauch digitaler Infrastruktur könnte sowohl in positiven als auch negativen Umwelteffekten resultieren, zum Beispiel durch eine gesteigerte Energieeffizienz und Ressourcennutzung oder aber durch einen Anstieg benötigter Energie und Ressourcen.

Tabelle 28 stellt die wichtigsten Schlüsseltechnologien, Anwendungsbeispiele, Umweltchancen und -risiken sowie eine Einschätzung zur Studienlage für das Themenfeld Forschungsinfrastrukturen dar.

Tabelle 28 Digitale Schlüsseltechnologien im Themenfeld Forschungsinfrastruktur

Relevante Schlüsseltechnologien 	Video-Kommunikation & digitale Plattformen 	KI & Big Data 
Funktionsweise 	Effektive Vernetzung und Kommunikation Integration und Vernetzung von Bürger*innen in Klimaforschung	Algorithmische Verarbeitung großer Mengen an Daten z. B. für Prognosen in der Klimaforschung
Ausgewählte Anwendungsbeispiele 	<ul style="list-style-type: none"> • Digitale Durchführung von Besprechungen und Konferenzen • Bürger*innenforschung durch Verwendung digitaler Plattformen und Apps 	<ul style="list-style-type: none"> • KI-Nutzung zur Modellierung und Simulation in der Klimaforschung
Umweltchancen 	<ul style="list-style-type: none"> • Verringerung von Emissionen durch das Vermeiden von Flugreisen und anderer Formen von Mobilität • Größere und tiefergehende Datenakquise durch Bürger*innenforschung 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Klimaforschung, validere Prognosen von Klimaereignissen • Aufklärung, Informationsvermittlung & Wissenstransfer
zUmweltrisiken 	<ul style="list-style-type: none"> • Mögliches Risiko von Rebound-Effekten durch einen starken Anstieg in der Nutzung dieser Technologien 	<ul style="list-style-type: none"> • Evtl. hoher Energiebedarf und Emissionsausstoß von KI etc. in der Forschung
Effekte auf THG-Emissionen 	 Positiver Effekt durch das Vermeiden von Flugreisen , Nutzung weiterer Infrastruktur (Autofahrten, Hotel- und Veranstaltungsräume)	 Indirekter positiver Effekt durch eine verbesserte Klimaforschung
Studienlage: Quantifizierungen von Umweltwirkungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Studienlage zur Quantifizierung des Einsparpotenzials von Emissionen durch Online- und dezentrale Konferenzen in der Wissenschaft • Keine Betrachtung von Rebound-Effekten 	<ul style="list-style-type: none"> • KI als potenziell disruptive Technologie im Bereich der Klimaforschung, Ausmaß der Umwelteffekte aber noch unklar

Technopolis und IÖW, 2024

3.8.1 Literaturanalyse

Überblick

Um die relevante Literatur im Themenbereich Forschungsinfrastrukturen zu identifizieren, haben wir neben den Suchbegriffen zu Digitalisierung und Nachhaltigkeit die folgenden, in einem Workshop identifizierten Schlagworte in deutscher und englischer Sprache gewählt: Forschungsinfrastruktur, Simulationen, Klimaforschung und Bürgerforschung.

Insgesamt wurden sieben Studien identifiziert und als relevant eingestuft. Überschneidungen in diesem Themenfeld ergaben sich mit dem Bereich Klimaschutz (4 Studien). Im Fokus dieses Themenfeldes finden sich digitale Plattformen (z. B. für Video-Konferenzen) als wichtigste identifizierte digitale Technologie.

Identifizierte Effekte und Effektgrößen

Bereits die **überschaubare Anzahl an identifizierten und relevanten Studien** verdeutlicht, dass die Nachhaltigkeitseffekten der Digitalisierung im Bereich der Forschungsinfrastrukturen in den letzten vier Jahren nicht substanziell untersucht wurden. Nur vier Studien untersuchte, inwieweit sich digitale Tools in der wissenschaftlichen Praxis direkt oder indirekt auf Nachhaltigkeitsaspekte auswirken. Es fehlt insbesondere an quantifizierten Ergebnissen, die beispielsweise die Einsparung von CO₂-Äq. durch effizientere Rechenmodelle und ähnliche Faktoren erforschten.

Lediglich vier Studien analysierten die **faktische Einsparung von THG-Emissionen**, wenn eine **wissenschaftliche Konferenz** statt als physischen Präsenzveranstaltungen **online oder dezentral abgehalten** wird (Batool et al., 2021; Bousema et al., 2020; Lichter et al., 2022; van Ewijk & Hoekman, 2021). Batool und Kollegen (2021) berichteten etwa von einer CO₂-Einsparung von insgesamt 1157 Tonnen durch den Verzicht auf Flugreisen im Rahmen einer virtuellen Konferenz. Lichter und Kollegen (2022) berechneten eine Einsparung von 565 Tonnen CO₂-Äq. pro Person durch die Vermeidung von Flugreisen und der Bereitstellung relevanter Hotel- und Konferenzräume. In dieser Untersuchung wurden die verursachten Emissionen der virtuellen Teilnehmenden durch ihre Internetnutzung in der Kalkulation der CO₂-Einsparungen berücksichtigt. Eine Studie von Bousema et al. (2020) kam zu dem Schluss, dass durch die Verringerung der Flugdistanz eine Emissionsreduktion von 58% erzielt werden kann, wenn eine internationale Konferenz dezentral auf verschiedenen Kontinenten parallel durchgeführt wird. Bei diesen Untersuchungen handelt es sich um Veröffentlichungen, die in medizinischen und nicht in Fachzeitschriften zum Thema Digitalisierung oder Nachhaltigkeit erschienen sind. Dabei wurden einzelne aus dem eigenen fachlichen Bereich stammende Konferenzen und ihre individuellen Einsparungspotenziale betrachtet. Eine weitere Studie, die von Autoren im Bereich der Industriellen Ökologie durchgeführt wurde, berichtet eine Reduktion der Emissionen zwischen 46% bis 75% bei einer dezentralen im Vergleich zu einer zentral durchgeführten Konferenz (van Ewijk & Hoekman, 2021). Neben diesen Studien wurde eine Metaanalyse identifiziert, die im Rahmen eines systematischen Reviews aufzeigte, wie wissenschaftliche Konferenzen im Allgemeinen nachhaltiger gestaltet werden können, wobei keine integrierten Daten zur Emissions-Einsparung berechnet wurden (Leochico et al., 2021). Digitale Videotelefonie scheint demnach ein wichtiger Bestandteil der wissenschaftlichen Infrastruktur zu sein und bisherige Studien zeigen ein substanzielles Potenzial, um in diesem Bereich Emissionen zu vermeiden. Virtuelle Konferenzen stellen einen **einfachen Hebel dar, um einen vermeidbaren Anteil an Emissionen in der Wissenschaft und Forschung zu reduzieren**, etwa im Vergleich zum Energieverbrauch von Rechenzentren, der schwerer zu begrenzen ist. Allerdings wird sich oft zugunsten der besseren Vernetzung und des leichteren informellen Austausches für Präsenzveranstaltungen entschieden. Hier können dezentrale Veranstaltungen, die teilweise ohne Flugzeug zu erreichen sind, einen wertvollen Kompromiss darstellen. Zudem sind in einigen Fällen Aufenthalte vor Ort nötig, um die Forschungsinfrastruktur zu nutzen.

Die weiteren Studien beschrieben **rein potenzielle und indirekte Umwelteffekte der Digitalisierung durch eine Verbesserung der Forschungsstruktur und des Wissenstransfers** (third-order Effekte). Zwei Studien untersuchten, inwieweit die Nutzung digitaler Plattformen zu einer Verbesserung der Klimaforschung beitragen kann, indem **Bürgerinnen und Bürger in den Forschungsprozess integriert** werden. Hier zeigte sich, dass die Verwendung interaktiver digitaler Apps und Web-Plattformen die Einbindung von Bürgerinnen und Bürgern begünstigt. Durch die digitale Mitarbeit der Zivilgesellschaft waren die Forschenden in der Lage eine größere Anzahl an Daten zu sammeln und dadurch auch validere Aussagen zu treffen. Zudem wurde der damit einhergehende Bildungs- und Aufklärungsaspekt für die Teilnehmenden betont (Batsaikhan et al., 2020; Killen et al., 2022). Die digitale Optimierung der Forschungs- und vor allem der Dateninfrastruktur kann sich indirekt positiv auf Nachhaltigkeitsaspekte auswirken, da

sie zu einem vertieften Wissensstand und einem breiteren Forschungsverständnis beiträgt. Außerdem stellte eine Studie dar, wie interaktive digitale Tools den Wissenstransfer im Bereich der ökologischen Nachhaltigkeit von der Wissenschaft hin zur Öffentlichkeit verbessern können. Durch eine niederschwellige Vermittlung wissenschaftlicher Erkenntnisse können Nutzerinnen und Nutzer informierte Entscheidungen treffen, sodass negative Umwelteffekte potenziell vermieden werden können (Preuschmann et al., 2022). Indirekte Umwelteffekte von Digitalisierung im Bereich der Forschungs- und Dateninfrastruktur kommen demnach vor allem durch den Umgang mit Bürgerinnen und Bürgern in der Datenakquise und der Verbreitung bereits gefestigten Wissens zustande.

Die oben genannten Studien zum Thema wissenschaftliche Online-Konferenzen stellen die einzigen Arbeiten dar, die in diesem Themenfeld quantifizierte Resultate durch CO₂-Bilanzierungen beschrieben haben. Die weiteren Studien beziehen sich auf qualitative Indikatoren im Rahmen durchgeführter Fallstudien mit Primärdaten oder auf Basis qualitativer Methoden wie Literaturrecherche oder Experteninterviews. So wurde beispielsweise die Anzahl an Dateneinsendungen durch Bürgerinnen und Bürgern als Indikator für eine verbesserte Datenakquise erfasst.

Prinzipiell können auch solche Studien dem Themenfeld der digitalen Forschungsinfrastrukturen zugeordnet werden, die die Effekte der Digitalisierung auf die Forschungsmethodik untersuchen. Da sich diese Studien jedoch nicht primär auf die Forschungsinfrastrukturen beziehen und bereits den Themenfeldern Klimaschutz und/oder Klimaanpassung zugeordnet sind, soll nur exemplarisch auf diese Arbeiten und deren Effekte eingegangen werden. (Irrgang et al., 2021) zeigten beispielsweise, dass der Einsatz Künstlicher Intelligenz zu einer besseren Modellierung des Erdsystems beitragen kann. Barteit et al. (2023) stellten fest, dass die Nutzung intelligenter und umfassender Technologien, wie Sensoren, 3-D gedruckte Wetterstationen und tragbare digitale Geräte die Vorhersage negativer Umweltauswirkungen des Klimawandels verbessern. Dies wiederum wirkt sich positiv auf Herausforderungen der Klimaanpassung gerade im Bereich Hitzeschutz und Gesundheit aus. Die Studie von Dewitte et al. (2021) kam zu ähnlichen Ergebnissen: die Integration von Künstlicher Intelligenz kann die Forschung im Bereich der Wettervorhersage, des Klima-Monitorings und der dekadentbasierten Vorhersage verbessern. Vor diesem Hintergrund kann argumentiert werden, dass die durch KI befähigte Klimaforschung besser in der Lage ist, negative Folgen des Klimawandels zu adressieren. Damit ergeben sich **indirekt positive Umwelteffekte durch ein verbessertes wissenschaftliches Verständnis und Monitoring**. Durch Effizienzgewinne im Einsatz von digitalen Ressourcen besteht zudem das Potenzial eines direkten positiven Einflusses auf die Nachhaltigkeit.

Chancen und Herausforderungen

Auf Basis der vorliegenden Literatur kann **keine eindeutige Beurteilung der Rolle der Digitalisierung im Bereich der Forschungsinfrastrukturen** erfolgen. Einerseits besteht das Potenzial, dass digitale Anwendungen zu einer Reduzierung von Treibhausgasen innerhalb wissenschaftlicher Strukturen führen können. Andererseits bleibt unklar, inwiefern eine durch Digitalisierung gestärkte Forschungsinfrastruktur und -kapazität zu einer Verringerung der tatsächlichen Umweltbelastung beitragen kann. Noch kann ausgehend von den beschriebenen Potenzialen der Digitalisierung nur vermutet werden, dass sich diese auch faktisch positiv ausprägen werden. In diesem Zusammenhang gilt es besonders mögliche **Rebound-Effekte** zu berücksichtigen, die potenzielle positive Auswirkungen wieder aufheben könnten. Ein Beispiel hierfür wäre, dass eine **erhöhte Energieeffizienz** bei wissenschaftlichen Modellierungen möglicherweise zu einer **vermehrten Nutzung der neuen Rechenkapazität** führt, wodurch schlussendlich genauso viel oder mehr Energie verbraucht wird. Genauso könnte die Option Online-Meetings durchzuführen zu einer Steigerung der Anzahl an Meetings

führen, was ebenfalls einen erhöhten Energiebedarf und Emissionsausstoß zur Folge haben könnte.

3.8.2 Forschungslücken aus der Literaturanalyse

Aus der analysierten Literatur lassen sich **zwei Hauptimplikationen** ableiten: Erstens braucht es intensivere Forschung, die sich mit der Intersektion aus Digitalisierung, Forschungsinfrastrukturen und Nachhaltigkeit beschäftigt. Die bisherige Datenlage sollte um Studien erweitert werden, die genauer analysieren, welche **Potenziale** die Digitalisierung im Bereich der Forschungsinfrastrukturen besitzt, um **direkt und indirekt die Umweltbelastung** zu verringern, die durch das wissenschaftliche Arbeiten entsteht. **Konkrete Infrastruktureinheiten** von Forschungseinrichtungen, etwa **Rechenzentren, Labore, Teilchenbeschleuniger** könnten hier wichtige Anhaltspunkte bieten, da sie sehr klimaintensiv sind. Eine Studie des Verbands der Internetwirtschaft untersuchte beispielsweise das allgemeine Potenzial von Rechenzentren in Europa zur Verringerung des Energiebedarfs und der Emissionen und fand vielversprechende Ansätze. So kann eine Optimierung der Software, IT oder Architektur positive Wirkungen im Sinne einer THG-Reduktion erzielen (Hintemann et al., 2020). Solche Studien bedarf es auch explizit im Bereich der Forschungsinfrastruktur. Zweitens sollten im nächsten Schritt gerade **Substitutions- und Rebound-Effekte** bei der Nutzung digitaler Forschungsinfrastruktur vertieft untersucht werden, um tatsächliche Potenziale zu erfassen und zu ermöglichen.

4 Handlungsempfehlungen: Implikationen für Forschung und Forschungsförderung aus Themenfeldern, Clustern und Fokusgruppen

Die vorliegende Metastudie ordnet den aktuellen Wissensstand zu den Umweltauswirkungen der Digitalisierung anhand jüngster Forschungsergebnisse ein. Die Ausrichtung auf quantitative Ergebnisse war dadurch motiviert, einen möglichst fundierten Eindruck von den Größenordnungen der Umwelteffekte in verschiedenen Anwendungskontexten der Digitalisierung zu erhalten. Die folgenden Empfehlungen, die aus der Bestandsaufnahme abgeleitet sind, beziehen sich auf diesen Bedarf. Sie zielen aber nicht nur auf die **Wissenslücken**, also, wo das Ausmaß von Umwelteffekten noch nicht hinreichend erforscht ist, sondern sie reflektieren auch die **Grenzen der Quantifizierung** und verweisen auf die Forschungsbedarfe jenseits der bloßen Messung von Effekten. Denn die kluge Interpretation, Einordnung und Bewertung quantitativer Ergebnisse hängt von inneren und äußeren Kontextfaktoren der Forschung ab, die die Forschungsförderung ebenfalls angemessen adressieren sollte. In diesem Sinne helfen die festgestellten Lücken im Forschungsstand dabei, weitergehende Empfehlungen für Verschiebungen, Erweiterungen und neue Schwerpunktsetzungen abzuleiten.

4.1 Vernachlässigte Themen(felder) adressieren

Infolge des Studiendesigns mit der vorgegebenen Einteilung in acht Themenfelder zeigen sich in Bezug auf die Anzahl der Studien und die Ergebnisse zu quantitativen Effekten deutliche Diskrepanzen zwischen den Themenfeldern. Während im Energiebereich die Studienlage vergleichsweise umfangreich ist und Kenntnisse zu quantitativen Effekten in verschiedenen Anwendungsbereichen vorliegen, erscheinen in Themenfeldern wie **Primärwirtschaft und BioTech-Verfahren, Forschungsinfrastruktur** und **Klimaanpassung** die Forschungslücken besonders groß. Aber auch für die breiten sektorübergreifenden Themenfelder **Kreislaufwirtschaft** und **Nachhaltiges Wirtschaften** kann auf Basis der Literaturanalyse keine aussagekräftige – zumal quantitative – Einordnung zu den Potenzialen und Risiken der Digitalisierung gegeben werden. Hier besteht großer Forschungsbedarf, der adressiert werden sollte. Entscheidend ist dabei allerdings, wie innerhalb der einzelnen Themenfelder der Untersuchungsgegenstand und der Forschungsfokus (neu)definiert werden.

4.2 Den Forschungsfokus in fünf Perspektiven neu ausrichten

4.2.1 Sektorale Perspektive

Innerhalb bestimmter sektoral definierter Forschungsfelder hat die Analyse gezeigt, dass es teilweise **einseitige Schwerpunktsetzungen** gibt und unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten wichtige Bereiche unterbelichtet sind. Beispielsweise im Verkehrsbereich fokussieren die Forschungsarbeiten deutlich auf den Individualverkehr, während Studien zu den Potenzialen digitaler Technologien im Busverkehr fehlen. Sektoral ausgerichtete Forschungsförderung sollte künftig darauf achten, dass **innerhalb einzelner Sektoren vernachlässigte Anwendungsfelder** berücksichtigt werden, vor allem wenn sie ein transformatives Potenzial besitzen. Darüber hinaus ist zu empfehlen, über rein sektorale Forschungsansätze hinauszugehen und die **Synergiepotenziale digitaler Vernetzung** explizit **sektorenübergreifend** anzugehen. Wie etwa in der Verschmelzung von Mobilitäts- und Energiesystemen, die in urbanen Umgebungen häufig Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten ist, so sollten die Möglichkeiten digitaler Sektorkopplungen in möglichst vielen Anwendungskontexten genauer untersucht werden. Eine Schlüsselrolle kommt dabei der digitalen Kreislaufwirtschaft zu, weil Stoffkreisläufe nicht per se an Sektorengrenzen halt machen.

4.2.2 Wirkungsperspektive

Interessiert man sich für das Ausmaß der Wirkungen, die die Digitalisierung auf die ökologische Umwelt hat, so ist eine **Brutto-Rechnung** anzustellen, die nach Möglichkeit alle relevanten direkten und indirekten Effekte einbezieht. Aussagen zu quantitativen Effekten, die nur Teilbereiche oder Ausschnitte des Wirkungskomplexes soziotechnischer Systeme berücksichtigen, haben nur eine sehr eingeschränkte Gültigkeit und können in die Irre führen. Vor diesem Hintergrund ist der hier erfasste Forschungsstand nicht zufriedenstellend. In verschiedenen Themenfeldern wie Energiesysteme, Mobilität und Primär-/Landwirtschaft liegt der Schwerpunkt quantifizierter Studien auf einer bestimmten Form indirekter Effekte, nämlich auf positiven Enabling-Effekten. **Direkte Effekte von digitalen Technologien** dagegen, also die Umweltauswirkungen, die aus Produktion und Betrieb der digitalen Geräte und Infrastrukturen resultieren, werden in der Regel nicht einbezogen. Nur im Bereich der Ressourcennutzung liegt der Fokus naturgemäß auf direkten (negativen) Effekten. Die zweite Form indirekter Effekte – die systemischen Effekte – spielen ebenfalls eine untergeordnete Rolle in quantitativen Bewertungen digitaler Technologien. Insbesondere **negative Rebound-Effekte** werden zwar teils in ihrer Relevanz erwähnt, doch äußerst selten quantitativ bemessen. Dabei können diese im Extremfall die positiven Enabling-Effekte überwiegen: Bei der verstärkten Nutzung von Homeoffice z. B. stehen den Einsparungen von Emissionen durch verringerte Mobilität der mögliche Bedarf nach größeren Wohnräumen und entsprechende Heizenergiebedarfe gegenüber.

Weitere Forschung sollte sich daher wesentlich stärker um ganzheitliche Bilanzierungen bemühen, die direkte und systemische Effekte besser einbeziehen. Gleichzeitig sind die Möglichkeiten der Quantifizierung von Rebound-Effekten begrenzt. Künftige Forschung zu Rebound-Effekten und anderen systemischen Effekten der Digitalisierung sollte daher – neben forschungsmethodischen Fragen – statt (schwer) messbarer Effekte verstärkt **erwartbare Risiken** in den Blick nehmen. Natürlich müssen neben den Risiken auch weiterhin die Potenziale im Fokus der Forschung stehen. Doch im Hinblick auf die verbreiteten Enabling-Effekte ist zu empfehlen, neben der Ermittlung positiver Potenziale (v.a. Effizienzsteigerungspotenziale) verstärkt auch **faktische, also empirisch gemessene Wirkungen** der Nutzung digitaler Technologien zu erforschen.

4.2.3 Soziotechnische Perspektive

Es wurden zahlreiche Studien gefunden, deren Untersuchungen und Umweltbewertungen sich dezidiert auf **einzelne technische Anwendungen** konzentrieren. In der Gesamtschau erscheint es nicht sinnvoll, einzelne Technologien zu „gewichten“, also die Umweltbilanz einer Technologie der einer anderen gegenüberzustellen, um die vermeintlich umweltfreundlichste Digitaltechnologie zu identifizieren. Bestimmte Studien haben gezeigt und die Fokusgruppen haben betont, dass es in der Praxis einen **Technologiemix** braucht und dass es vor allem auf die **soziale Kontextualisierung von Technologie** ankommt. Dazu gehört zunächst anzuerkennen, dass digitale Lösungen von Menschen mit Menschen für Menschen in Organisationen angewendet werden. Keine Implementierung oder Umsetzung lässt sich durch Daten allein lösen. Daher empfiehlt sich mehr Forschung, die im Sinne einer soziotechnischen Perspektive die sozialen Voraussetzungen für die Anwendung von Technologie berücksichtigt. Solche Untersuchungen beziehen in die Bewertungen von Umwelteffekten stärker auch Entscheidungsprozesse, Organisationsstrukturen und viele weitere soziale Kontexte ein.

4.2.4 Nachhaltigkeitspolitische Perspektive

Die **politischen Rahmenbedingungen** sind ein bzw. häufig wohl der wesentliche Kontextfaktor, der darüber entscheidet, inwieweit der Einsatz digitaler Technologien größere oder kleinere Umweltauswirkungen hat und ob sie positiv oder negativ ausfallen. Politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen können einen entscheidenden Einfluss auf die

Akzeptanz und Nutzung digitaler Technologien haben und damit auch auf die Realisierung der Klimaschutzpotenziale. Konkret sind es die politischen Ziele und Strategien, die im jeweiligen Anwendungsfeld darüber entscheiden, welche Umweltauswirkungen eine gegebene Digitaltechnologie haben kann. Beispielsweise macht es beim Autoverkehr einen erheblichen Unterschied, ob digitale Technologien zur Effizienzoptimierung des herkömmlichen privaten Individualverkehrs genutzt werden oder zur Förderung neuer Formen des Car-Sharings. Ob nur die Effizienz bestehender Systeme optimiert wird oder innovative Geschäftsmodelle zur Dematerialisierung geschaffen werden, hängt von **nachhaltigkeitspolitischen Strategieentscheidungen** ab. Diese müssen in Forschungsdesigns zur ökologischen Bewertung von Digitaltechnologien künftig viel größere Berücksichtigung finden. Daher ist der Forschungsförderung zu empfehlen, die Untersuchung politischer Rahmenbedingungen als empirisch wirksamen Kontextfaktor anzuregen, aber auch die eigene forschungspolitische Agenda klar an nachhaltigkeitspolitische Transformationsstrategien zu knüpfen.

4.2.5 Systemperspektive

Umweltauswirkungen betreffen letztlich immer das ökologische Gesamtsystem des Planeten Erde, das es in seiner Stabilität und Lebensdienlichkeit zu schützen gilt. Vor diesem Hintergrund sind die einzelnen Digitaltechnologien, die sozialen Rahmenbedingungen ihrer Anwendung wie auch die faktischen und potenziellen Effekte in einer größeren systemischen Perspektive zu bewerten. Selbst in dem übergreifenden Themenfeld Klimaschutz und -anpassung fehlt vielen der betrachteten Studien eine Systemperspektive, die versucht die **Wechselwirkungen und Überschneidungen verschiedener Effekte** im Zusammenhang zu verstehen. Stattdessen liegt der Fokus häufig auf Effekten, die in Einzelbetrachtungen identifiziert werden. Vermehrte Forschung mit einer (globalen) Systemperspektive zu fördern, würde nicht bedeuten, auf die Untersuchung von konkreten Anwendungsfällen zu verzichten. Aber der Fokus sollte stärker auf der systemischen Einbettung dieser Fälle und auf den **Transfer- und Skalierungsperspektiven** liegen: Was würde die großflächige Ausbreitung einer bestimmten Digitallösung im globalen Maßstab bedeuten? Eine nachhaltigkeitsorientierte Forschungsförderung steht in der Verantwortung, bevorzugt solche Untersuchungen anzuregen, die einen **transformativen Ansatz** verfolgen – transformativ in dem Sinne, dass bestehende technische und ökonomische Systeme, die erwiesenermaßen nicht nachhaltig sind, umgebaut oder ersetzt werden durch solche, die mit den planetaren Grenzen vereinbar sind.

4.3 Implikationen für Forschungsmethoden und -designs

Die vorgeschlagenen Perspektivenerweiterungen haben weitreichende Implikationen für die Methoden und Designs künftiger Forschung zu den Umweltauswirkungen der Digitalisierung. Sie reichen von den Methoden zur Bewertung der Umwelteffekte über den Typus von Forschungsvorhaben bis zu den Konstellationen der beteiligten Akteure.

4.3.1 Ganzheitliche Bewertungsmethoden

Die Auswertung der Studien über die verschiedenen Themenfelder hinweg hat gezeigt, dass umfassende **Lebenszyklusanalysen (LCA)** in manchen Bereichen zwar eine gängige Methodik sind, um die direkten Auswirkungen digitaler Technologien auf die Umwelt zu bewerten (bspw. im Feld Ressourcennutzung). Doch gleichzeitig konnte festgestellt werden, dass in anderen wichtigen Bereichen (z.B. Energiesysteme und Kreislaufwirtschaft) die Umweltbewertung in der Dimension Treibhausgasemissionen deutlich dominiert. Daher sollten Anreize geschaffen werden, dass künftige Forschung zunehmend **auch weitere Wirkungskategorien** wie Ressourcenverbrauch, Wasserverbrauch, Toxizität und Auswirkungen auf die Biodiversität in ihre Umweltbewertungen aufnimmt. Auch innerhalb der **Klimabilanzierung** gibt es Veränderungsbedarfe: Für die kommende Forschung gilt es, Fragen der Operationalisierung von Digitalisierung genauer in den Blick zu nehmen. Das bedeutet nicht bloß bessere

Messmethoden und eine genauere Differenzierung der Entstehungsfaktoren für Emissionen (z.B. produkt- vs. konsumbasierte Emissionen). Eine ganzheitliche Betrachtung bei der Emissionsbilanzierung heißt auch, mögliche Auslagerungen von CO₂-Emissionen in Länder des globalen Südens und damit das Risiko ihrer systematischen Untererfassung zu berücksichtigen. Es ist mehr Forschung zur korrekten Erfassung der *gesamten* Emissionen digitaler Technologien notwendig.

4.3.2 Interdisziplinäre Forschungszusammenarbeit

Die Stärkung einer soziotechnischen Perspektive und die Anerkennung der sozialen Einbettung von Technologie verlangen mehr Interdisziplinarität in Forschungsvorhaben zur Bewertung der Umwelteffekte digitaler Technologien. Selbst in der Literatur zu stark technisch ausgerichteten Feldern (wie Energiesystemen) wird mitunter eine stärkere interdisziplinäre Zusammenarbeit vorgeschlagen, etwa indem LCA mit Methoden aus der Sozialforschung und Umweltpsychologie kombiniert werden. Auch wenn die klassische technologieorientierte Forschung dadurch nicht ihre Berechtigung verliert, sollte mehr dafür getan werden, dass **Forschung an den Schnittstellen** gestärkt wird: Digitalisierung und Regulierung, Digitalisierung und soziale oder Geschäftsmodellinnovationen, Digitalisierung und Verhaltensforschung. Mit den interdisziplinären Ansätzen rücken politische, rechtliche, soziologische, ökonomische und psychologische Dimensionen stärker in den Fokus. Die Forschungsförderung sollte dazu beitragen, dass interdisziplinäre Perspektiven auf Technologie bessere, weil **umfassendere Bewertungen der Umwelteffekte** der Digitalisierung ermöglichen.

4.3.3 Reallabore in transdisziplinärer Kollaboration

Das Interesse daran zu ermitteln, wie groß die ökologischen Effekte der Digitalisierung sind, basiert auf der umweltpolitischen Motivation, mit diesem Wissen die schädlichen Auswirkungen minimieren und Strategien für eine nachhaltige Digitalisierung umsetzen zu können. Deswegen braucht es eine Art von Forschung, die mögliche Lösungsstrategien bereits im konkreten Entwicklungs- und Anwendungsprozess auf ihre Wirkungen hin untersucht. Dazu müssen die realen Auswirkungen unter komplexen Anwendungsbedingungen empirisch erfasst und bewertet werden. Darüber hinaus ist auch für Transfer- und Skalierungsprozesse eine vorausschauende Bewertung der Umweltauswirkungen vorzunehmen. Für solche Ziele sind **Reallabore** geeignete Instrumente. Sie können einen geschützten Raum bieten, um technologische Forschung und regulatorische bzw. strategische Ansätze im Zusammenspiel zu pilotieren und zu evaluieren.

Forschungspraktisch bedarf es dazu **transdisziplinärer und kollaborativer Settings** unter Einbeziehung vielfältiger Akteure und Berücksichtigung der jeweiligen institutionellen Kontexte. Diese helfen dann etwa dabei, über Wertschöpfungsketten hinweg die relevanten Daten für die ganzheitliche Bewertung zu erfassen. Oder mit der Einbeziehung von Entscheidungsträgern und Usern sorgen sie dafür, dass die tatsächlichen Auswirkungen einer digitalen Anwendung gemessen werden können. Entscheidend für den Erfolg solcher transdisziplinären Ansätze in Digitalisierungskontexten ist die **Bereitschaft der Akteure ihre Daten mit anderen zu teilen** und von den Forschungspartnern auswerten zu lassen. Eine Forschungsförderung, die solche Projekte ermöglichen will, sollte Anreize schaffen, damit die relevanten Akteure partizipieren und ihre Daten zur Verfügung stellen und untereinander austauschen.

Transdisziplinäre Reallabore sollen nicht nur eine angemessene Erfassung faktischer und potenzieller Nachhaltigkeitseffekte ermöglichen, sondern auch einen Beitrag zur Gestaltung einer umweltverträglichen Digitalisierung leisten. Angesichts dieses Anspruchs ist abschließend darauf hinzuweisen, dass die Forschungsförderung ihre kurzfristigen Projektförderzyklen von in der Regel drei Jahren überdenken und zugunsten **längerfristiger Forschungssettings** ergänzen sollte.

5 Fazit

Die vorliegende Studie analysiert den aktuellen Forschungsstand zu den Nachhaltigkeitseffekten der Digitalisierung auf Basis einer systematischen Literaturrecherche. Der Fokus liegt dabei auf acht Themenfeldern, die im Kontext der Nachhaltigkeitseffekte der Digitalisierung von besonderer Bedeutung sind: Energiesysteme, Klimaschutz und -anpassung, Stadtentwicklung und urbane Mobilität, Kreislaufwirtschaft, Nachhaltiges Wirtschaften. Die Literaturanalyse fokussiert Studien, die mögliche Nachhaltigkeitseffekte nicht nur qualitativ diskutieren, sondern auch quantifizieren. Teil der Analyse waren relevante Veröffentlichungen aus dem Zeitraum von 2019 bis 2023. Von den ca. 6000 Studien der Literaturrecherche wurden ca. 200 als relevant identifiziert, d. h. diese Studien enthalten quantifizierte Umwelteffekte der Digitalisierung, die auf den deutschen bzw. europäischen Kontext übertragbar sind. Neben der systematischen Literaturanalyse wurden zu ausgewählten Themen vertiefende Steckbriefe erstellt und interdisziplinäre Fokusgruppen mit Expert*innen vor allem aus der Wissenschaft für die Themenfelder Klimaschutz, Stadtentwicklung und urbane Mobilität sowie Kreislaufwirtschaft durchgeführt.

In dieser Studie werden eine Vielzahl an Anwendungsfällen mit besonders hohen Potenzialen für positive Umwelteffekte identifiziert. Insbesondere im Energiebereich gibt es eine Vielzahl von vergleichsweise gut erforschten Anwendungsfällen. Hierzu zählt beispielsweise der Einsatz von Smart Metering und preisdynamischen Tarifen im Energiebereich. Auch Automatisierung und Monitoring in der Gebäudeautomatisierung können den Energieverbrauch deutlich verringern. Durch Digitalisierung im Energiesektor kann außerdem das Abregeln erneuerbarer Energien vermieden werden. Im Bereich Verkehr können Technologien wie IoT und 5G z. B. die THG-Emissionen im Güterverkehr deutlich senken. Auch durch Technologien und Anwendungen der Smart Factory besteht großes Potenzial für Effizienzgewinne: Durch intelligentes Monitoring in der Produktion können z. B. erhebliche Energie- und Ressourceneinsparungspotenziale realisiert werden.

Die positiven Umweltpotenziale der Digitalisierung sind jedoch nicht auf das Einsparen von CO₂-Emissionen beschränkt. In der Landwirtschaft können z. B. durch den Einsatz von Precision Farming durch digital gestütztes Monitoring der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und Bewässerung reduziert werden. In vielen Studien dominieren dennoch THG-Emissionen als Indikator für Umweltwirkungen. Für zukünftige Forschungsvorhaben empfiehlt sich eine ganzheitliche Betrachtung der Umwelteffekte mit weiteren Wirkungskategorien wie Ressourcenverbrauch, Wasserverbrauch, Toxizität und Auswirkungen auf die Biodiversität.

Die vorhandenen quantifizierten Studien konzentrieren sich meist auf die Potenziale digitaler Technologien durch positive indirekte Umweltauswirkungen. Für eine umfassende Bewertung ist jedoch die Einbeziehung sowohl der relevanten direkten als auch negative indirekte Effekte wie Rebound-Effekte entscheidend.

Die Forschungslücken erscheinen in Themenfeldern wie Primärwirtschaft und BioTech-Verfahren, Forschungsinfrastruktur und Klimaanpassung besonders groß. Aber auch für die breiten sektorübergreifenden Themenfelder Kreislaufwirtschaft und Nachhaltiges Wirtschaften kann auf Basis der Literaturanalyse keine aussagekräftige – zumal quantitative – Einordnung zu den Potenzialen und Risiken der Digitalisierung gegeben werden. Es ist insgesamt zu empfehlen, über rein sektorale Forschungsansätze hinauszugehen und explizit sektorenübergreifend die Synergiepotenziale digitaler Vernetzung anzugehen, um die digitale Sektorkopplung voranzutreiben. In diesem Kontext können digitale Anwendungen wie Smart Charging und Smart Metering eine wichtige Rolle einnehmen. Künftige sektoral ausgerichtete Forschungsförderung sollten außerdem darauf achten, dass innerhalb einzelner Sektoren vernachlässigte Anwendungsfelder berücksichtigt werden, vor allem wenn sie ein transformatives Potenzial besitzen.

Das transformative Potenzial der Digitalisierung wird maßgeblich durch politische Ziele und Strategien geprägt, Diese entscheiden im jeweiligen Anwendungsfeld darüber, welche Umweltauswirkungen eine gegebene Digitaltechnologie haben kann. Ob nur die Effizienz bestehender Systeme optimiert wird oder innovative Geschäftsmodelle zur Dematerialisierung geschaffen werden, hängt von nachhaltigkeitspolitischen Strategieentscheidungen ab. Vor diesem Hintergrund ist eine Förderung interdisziplinärer Forschungsvorhaben zu empfehlen, die beispielsweise rechtliche, sozial-psychologische und ethische Fragestellungen miteinbezieht.

Referenzen

- Accenture. (2021). *Klimaeffekte der Digitalisierung – Studie zur Abschätzung des Beitrags digitaler Technologien zum Klimaschutz*. <https://www.accenture.com/content/dam/accenture/final/a-com-migration/r3-3/pdf/pdf-148/accenture-bitkom-studie-klimaeffekte-der-digitalisierun.pdf#zoom=40>
- Adamides, G., Kalatzis, N., Stylianou, A., Marianos, N., Chatzipapadopoulos, F., Giannakopoulou, M., Papadavid, G., Vassiliou, V., & Neocleous, D. (2020). Smart Farming Techniques for Climate Change Adaptation in Cyprus. *Atmosphere*, 11(6), 557. <https://doi.org/10.3390/atmos11060557>
- AGEB. (2023). *Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken*.
- Agrawal, R., Priyadarshinee, P., Kumar, A., Luthra, S., Garza-Reyes, J. A., & Kadyan, S. (2023). Are emerging technologies unlocking the potential of sustainable practices in the context of a net-zero economy? An analysis of driving forces. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26434-2>
- Ahlefeld, P. J. W. von. (2019). Rebound Effekte in der Präzisionslandwirtschaft—Ein Kommentar. *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft*. <https://doi.org/10.12767/buel.v97i3.247>
- Akkad, M. Z., Haidar, S., & Bányai, T. (2022). Design of Cyber-Physical Waste Management Systems Focusing on Energy Efficiency and Sustainability. *Designs*, 6(2), 39. <https://doi.org/10.3390/designs6020039>
- Ali, A., Hussain, T., Tantashutikun, N., Hussain, N., & Cocetta, G. (2023). Application of Smart Techniques, Internet of Things and Data Mining for Resource Use Efficient and Sustainable Crop Production. *Agriculture*, 13(2), 397. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020397>
- Andrae, A. (2020). New perspectives on internet electricity use in 2030. *Engineering and Applied Science Letters*, 3, 19–31. <https://doi.org/10.30538/psrp-easl2020.0038>
- Aretz, A., Ouanes, N., Stange, H., Lenk, C., Holzner, R., & Brischke, L.-A. (2022). Evaluation of the energy saving potential through systematic data collection of the electricity consumption and heating system operation in the building sector. *Eceee Summer Study Proceedings*. eceee 2022 Summer Study on energy efficiency: agents of change, Hyères. https://www.ioew.de/fileadmin/user_upload/BILDER_und_Downloaddateien/Publikationen/2022/Evaluation_of_Energy_Savings_through_Systematic_Data_Collection_DETECTIVE_2022.pdf
- Axenbeck, J., Berner, A., & Kneib, T. (2022). What Drives the Relationship Between Digitalization and Industrial Energy Demand? Exploring Firm-Level Heterogeneity. *ZEW — Centre for European Economic Research Discussion Paper, No. 22-059*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4300866>
- Axenbeck, J., & Niebel, T. (2021). Climate Protection Potentials of Digitalized Production Processes: Microeconomic Evidence? *ZEW - Centre for European Economic Research Discussion Paper*, 21(105). <https://doi.org/10.2139/ssrn.4031885>
- Balasundram, S. K., Shamshiri, R. R., Sridhara, S., & Rizan, N. (2023). The Role of Digital Agriculture in Mitigating Climate Change and Ensuring Food Security: An Overview. *Sustainability*, 15(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/su15065325>
- Ballis, H., & Dimitriou, L. (2020). Evaluation of Reinforcement Learning Traffic Signalling Strategies for Alternative Objectives: Implementation in the Network of Nicosia, Cyprus. *Transport and Telecommunication Journal*, 21(4), 295–302. <https://doi.org/10.2478/ttj-2020-0024>
- Barteit, S., Sié, A., Zabré, P., Traoré, I., Ouédraogo, W. A., Boudo, V., Munga, S., Khagayi, S., Obor, D., Muok, E., Franke, J., Schwarz, M., Blass, K., Su, T. T., Bärnighausen, T., Sankoh, O., & Sauerborn, R. (2023). Widening the lens of population-based health research to climate change impacts and adaptation: The climate change and health evaluation and response system (CHEERS). *Frontiers in Public Health*, 11. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2023.1153559>

Barteková, E., & Börkey, P. (2022). *Digitalisation for the transition to a resource efficient and circular economy* (OECD Environment Working Papers 192; OECD Environment Working Papers, Vol. 192). <https://doi.org/10.1787/6f6d18e7-en>

Batmunkh, A. (2022). Carbon Footprint of The Most Popular Social Media Platforms. *Sustainability*, 14(4), 2195. <https://doi.org/10.3390/su14042195>

Batool, T., Neven, A., Vanrompay, Y., Adnan, M., & Dendale, P. (2021). There is a silver lining: Carbon footprint reduction by holding Preventive Cardiology conference 2020 virtually. *European Journal of Preventive Cardiology*, 28(Supplement_1), zwab061.224. <https://doi.org/10.1093/eurjpc/zwab061.224>

Batsaikhan, A., Hachinger, S., Kurtz, W., Heller, H., & Frank, A. (2020). Application of Modern Web Technologies to the Citizen Science Project BAYSICS on Climate Research and Science Communication. *Sustainability*, 12(18), Article 18. <https://doi.org/10.3390/su12187748>

Berkhout, F., & Hertin, J. (2001). *Impacts of Information and Communication Technologies on Environmental Sustainability: Speculations and evidence—Report to the OECD*. <https://www.oecd.org/science/inno/1897156.pdf>

Beucker, S., & Hinterholzer, S. (2021). *Klimaschutz und Energieeffizienz durch digitale Gebäudetechnologien*. https://www.bitkom.org/sites/main/files/2021-11/211111_st_klimaschutz-und-energieeffizienz.pdf

Bieser, J., Hintemann, R., Hilty, L. M., & Beucker, S. (2023). A review of assessments of the greenhouse gas footprint and abatement potential of information and communication technology. *Environmental Impact Assessment Review*, 99, 107033. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.107033>

Bieser, J., Salieri, B., Hischer, R., & Hilty, L. M. (2023). Opportunities of 5G Mobile Technology for Climate Protection in Switzerland. In V. Wohlgemuth, S. Naumann, G. Behrens, H.-K. Arndt, & M. Hüb (Eds.), *Advances and New Trends in Environmental Informatics* (pp. 217–235). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18311-9_13

Blair, M., Alizamir, S., & Wang, S. (2022). The Impact of Climate Change: An Empirical Analysis of Smart Thermostat Data. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4282220>

Bluhm, H., & Gährs, S. (2023). Environmental assessment of prosumer digitalization: The case of virtual pooling of PV battery storage systems. *Journal of Energy Storage*, 59, 106487. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106487>

Bordage, F. (2019). The environmental footprint of the digital world. *GreenIT.Fr*. https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2019/11/GREENIT_EENM_etude_EN_accessible.pdf

Bousema, T., Selvaraj, P., Djimde, A. A., Yakar, D., Hagedorn, B., Pratt, A., Barret, D., Whitfield, K., & Cohen, J. M. (2020). Reducing the Carbon Footprint of Academic Conferences: The Example of the American Society of Tropical Medicine and Hygiene. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 103(5), 1758–1761. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.20-1013>

Briglauer, W., & Köppl-Turyna, M. (2021). *Die Auswirkung der Digitalisierung auf CO2-Emissionen: Theoretische Einzeleffekte und empirische Abschätzung des Gesamteffekts* (Research Report 46). Policy Note. <https://www.econstor.eu/handle/10419/234133>

Briglauer, W., Köppl-Turyna, M., Schwarzbauer, W., & Bittó, V. (2023). The Impact of ICT on Electricity and Energy Consumption and Resulting CO2 Emissions: A Literature Review. *International Review of Environmental and Resource Economics*, 17(2–3), 319–361. <https://doi.org/10.1561/101.00000154>

BSI. (2019). *Technische Richtlinie BSI TR-03109-1. Anlage VII: Interoperabilitätsmodell und Geräteprofile für Smart-Meter-Gateways*. https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/TechnischeRichtlinien/TR03109/TR-03109-1_Anlage_Interop-Modell-Geraeteprofile.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Bundesverfassungsgericht, 1 Senat. (2021, March 24). *Bundesverfassungsgericht—Entscheidungen—Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich* (de)

[Gerichtssentscheidung]. Bundesverfassungsgericht.

https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Entscheidungen/DE/2021/03/rs20210324_1bvr265618.html

Calise, F., Cappiello, F. L., Dentice d'Accadia, M., & Vicidomini, M. (2021). Smart grid energy district based on the integration of electric vehicles and combined heat and power generation. *Energy Conversion and Management*, 234, 113932. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113932>

Cao, W., Cai, Z., Yao, X., & Chen, L. (2023). Digital Transformation to Help Carbon Neutrality and Green Sustainable Development Based on the Metaverse. *Sustainability*, 15(9), 7132. <https://doi.org/10.3390/su15097132>

Cerqueira, E. D. V., Motte-Baumvol, B., Chevallier, L. B., & Bonin, O. (2020). Does working from home reduce CO2 emissions? An analysis of travel patterns as dictated by workplaces. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 83, 102338. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102338>

Chi, F., & Meng, Z. (2023). The effects of ICT and FDI on CO2 emissions in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(2), 3133–3145. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22422-0>

Clausen, J., Hintemann, R., Niebel, T., Schramm, S., Axenbeck, J., & Iffländer, S. (2022). *Klimaschutz durch digitale Transformation: Realistische Perspektive oder Mythos? CliDiTrans Endbericht*. Borderstep Institut. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24008.39686>

Cows, J., Tsamados, A., Taddeo, M., & Floridi, L. (2023). The AI gambit: Leveraging artificial intelligence to combat climate change—opportunities, challenges, and recommendations. *AI & SOCIETY*, 38(1), 283–307. <https://doi.org/10.1007/s00146-021-01294-x>

Dæhlen, M. (2023). *The Twin Transition Century: The role of digital research for a successful green transition of society? (The Guild Insight Paper No.5)*. Bern Open Repository and Information System. <https://boris.unibe.ch/184458/>

Devi, R. M. (2023). Toward Smart Agriculture for Climate Change Adaptation. In C. B. Pande, K. N. Moharir, S. K. Singh, Q. B. Pham, & A. Elbeltagi (Eds.), *Climate Change Impacts on Natural Resources, Ecosystems and Agricultural Systems* (pp. 469–482). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19059-9_19

Dewitte, S., Cornelis, J. P., Müller, R., & Munteanu, A. (2021). Artificial Intelligence Revolutionises Weather Forecast, Climate Monitoring and Decadal Prediction. *Remote Sensing*, 13(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/rs13163209>

Dodge, J., Prewitt, T., Combes, R. T. D., Odmark, E., Schwartz, R., Strubell, E., Luccioni, A. S., Smith, N. A., DeCario, N., & Buchanan, W. (2022). *Measuring the Carbon Intensity of AI in Cloud Instances*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2206.05229>

EC JRC. (2018). *World atlas of desertification: Rethinking land degradation and sustainable land management*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/06292>

EDGAR. (2022). *Emissions Database for Global Atmospheric Research, version v7.0_FT_2021* [dataset]. European Commission, Joint Research Centre (JRC). <http://data.europa.eu/89h/e0344cc3-e553-4dd4-ac4c-f569c8859e19>

Edquist, H., & Bergmark, P. (2023). How is mobile broadband intensity affecting CO2 emissions? – A macro analysis. *Telecommunications Policy*, 102668. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2023.102668>

EPRS. (2022). *Revision of the Energy Performance of Buildings Directive: Fit for 55 package | Think Tank | European Parliament*. [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2022\)698901](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2022)698901)

Espeholt, L., Agrawal, S., Sønderby, C., Kumar, M., Heek, J., Bromberg, C., Gazen, C., Carver, R., Andrychowicz, M., Hickey, J., Bell, A., & Kalchbrenner, N. (2022). Deep learning for twelve hour precipitation forecasts. *Nature Communications*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32483-x>

European Environment Agency. (2020). *State of nature in the EU Results from reporting under the nature*

directives 2013-2018 (EEA Report No 10/2020).

Finger, R., Swinton, S. M., El Benni, N., & Walter, A. (2019). Precision Farming at the Nexus of Agricultural Production and the Environment. *Annual Review of Resource Economics*, 11(1), 313–335. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-093929>

Fraga-Lamas, P., Lopes, S. I., & Fernández-Caramés, T. M. (2021). Green IoT and Edge AI as Key Technological Enablers for a Sustainable Digital Transition towards a Smart Circular Economy: An Industry 5.0 Use Case. *Sensors*, 21(17), 5745. <https://doi.org/10.3390/s21175745>

Fragkou, E., Tsegas, G., Karagkounis, A., Barmpas, F., & Moussiopoulos, N. (2023). Quantifying the impact of a smart farming system application on local-scale air quality of smallhold farms in Greece. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 16(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01269-x>

Franzen, M. (2019). Zum Wandel der wissenschaftlichen Wissensproduktion durch Big Data: Welche Rolle spielt Citizen Science? *Österreichische Zeitschrift für Soziologie*, 44(1), 15–35. <https://doi.org/10.1007/s11614-019-00345-4>

Fromhold-Eisebith, M., Grote, U., Matthies, E., Messner, D., Pittel, K., Schellhuber, H.-J., Schiefendecker, I., & Schlacke, S. (2019). *Unsere gemeinsame digitale Zukunft: Zusammenfassung*. Wissenschaftlicher Beirat d. Bundesregierung Globale Umweltveränderungen.

Fuchs, C., Gütschow, P., Langosch, R., Skau, K., & Thierbächer, L. (2021). Verbesserung der Klimabilanzen landwirtschaftlicher Betriebe und der Beitrag der Digitalisierung. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, 58(1), 83–101. <https://doi.org/10.1365/s40702-020-00695-8>

Gährs, S., Bluhm, H., Dunkelberg, E., Katner, J., Weiß, J., Henning, P., Herrmann, L., & Knauff, M. (2021). *Potenziale der Digitalisierung für die Minderung von Treibhausgasemissionen im Energiebereich* (Climate Change 74/2021). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/potenziale-der-digitalisierung-fuer-die-minderung>

Ghotge, R., Paanakker, M., Wijk, A. V., Baeten, B., & Lukszo, Z. (2020). The effect of price-optimized charging on electric vehicle fleet emissions. *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, 469–473. <https://doi.org/10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248907>

Gilch, H., Beise, A. S., Krempkow, R., Müller, M., Stratmann, F., & Wannemacher, K. (2019). *Digitalisierung der Hochschulen: Ergebnisse einer Schwerpunktstudie für die Expertenkommission Forschung und Innovation* (Research Report 14–2019). Studien zum deutschen Innovationssystem. <https://www.econstor.eu/handle/10419/194284>

Gonzalez, O. de A., Koivisto, H., Mustonen, J. M., & Keinänen-Toivola, M. M. (2021). Digitalization in Just-In-Time Approach as a Sustainable Solution for Maritime Logistics in the Baltic Sea Region. *Sustainability*, 13, 1173.

Gröger, J. (2020). *Digitaler CO2-Fußabdruck*.

Guaita Martínez, J. M., Puertas, R., Martín Martín, J. M., & Ribeiro-Soriano, D. (2022). Digitalization, innovation and environmental policies aimed at achieving sustainable production. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.03.035>

Guath, M., Stikvoort, B., & Juslin, P. (2022). Nudging for eco-friendly online shopping – Attraction effect curbs price sensitivity. *Journal of Environmental Psychology*, 81, 101821. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2022.101821>

Hankel, A., Heimeriks, G., & Lago, P. (2018). A Systematic Literature Review of the Factors of Influence on the Environmental Impact of ICT. *Technologies*, 6(3), 85. <https://doi.org/10.3390/technologies6030085>

Hilty, L. M., & Aebischer, B. (2015). ICT for Sustainability: An Emerging Research Field. In L. M. Hilty & B. Aebischer (Eds.), *ICT Innovations for Sustainability* (Vol. 310, pp. 3–36). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_1

Hintemann, R., Hinterholzer, S., & Clausen, J. (2020). „Rechenzentren in Europa – Chancen für eine nachhaltige Digitalisierung“. <https://www.eco.de/wp->

content/uploads/dlm_uploads/2020/11/di_studie_rechenzentren_teil2_201110.pdf

Icha, P., & Lauf, T. (2023). *Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990—2022* (Climate Change 20/2023).

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023_05_23_climate_change_20-2023_strommix_bf.pdf

IEA. (2021). *World Energy Outlook 2021*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf>

IEA. (2023). *Smart Grids*. <https://www.iea.org/energy-system/electricity/smart-grids>

Implement Consulting Group. (2023). *Digital Decarbonisation – Accelerating Germany's climate protection with efficient digital solutions*.

https://implementconsultinggroup.com/media/12118/google_digital-decarbonisation_germany.pdf

IPCC (Ed.). (2023). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2022—Mitigation of Climate Change* (1st ed., pp. 3–48). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>

Irrgang, C., Boers, N., Sonnewald, M., Barnes, E. A., Kadow, C., Staneva, J., & Saynisch-Wagner, J. (2021). Towards neural Earth system modelling by integrating artificial intelligence in Earth system science. *Nature Machine Intelligence*, 3(8), Article 8. <https://doi.org/10.1038/s42256-021-00374-3>

Jagtap, S., & Rahimifard, S. (2019). The digitisation of food manufacturing to reduce waste – Case study of a ready meal factory. *Waste Management*, 87, 387–397.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.017>

Javaid, M., Haleem, A., Khan, I. H., & Suman, R. (2023). Understanding the potential applications of Artificial Intelligence in Agriculture Sector. *Advanced Agrochem*, 2(1), 15–30.

<https://doi.org/10.1016/j.aac.2022.10.001>

Jørgensen, S., Pedersen, L. J. T., & Skard, S. (2023). Resource accounting for a circular economy: Evidence from a digitalised waste management system. *Accounting Forum*, 1–30.

<https://doi.org/10.1080/01559982.2023.2166001>

Killen, H., Chang, L., Soul, L., & Barclay, R. (2022). Combining Physical and Digital Data Collection for Citizen Science Climate Research. *Citizen Science: Theory and Practice*, 7(1).

<https://doi.org/10.5334/cstp.422>

Kliem, L., Wagner, J., Olk, C., Keßler, L., Lange, S., Krachunova, T., & Bellingrath-Kimura, S. (2023). *Digitalisierung der Landwirtschaft—Chancen und Risiken für den Natur- und Umweltschutz*.

Knierim, A., Kernecker, M., Erdle, K., Kraus, T., & ... (2019). Smart farming technology innovations—Insights and reflections from the German Smart-AKIS hub. In ... -*Wageningen Journal of ...* Elsevier.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157352141830232X>

Kowal, J., Duda, E., Dunaj, K., Klebaniuk, J., Mäkiö, J., Pańka, E., Soja, P., & Weichbroth, P. (2022). Digital Innovations for Sustainable Development in the Time of Crisis. *International Journal of Pedagogy, Innovation and New Technologies*, 9(2), 2–20. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.3210>

Krüger, A., Schäfers, C., Busch, P., & Antranikian, G. (2020). Digitalization in microbiology – Paving the path to sustainable circular bioeconomy. *New Biotechnology*, 59, 88–96.

<https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.06.004>

Kumar Manupati, V., Putnik, G., & Rocha Varela, M. L. (Eds.). (2023). *Smart and sustainable manufacturing systems for industry 4.0* (First edition). CRC Press.

Lam, R., Sanchez-Gonzalez, A., Willson, M., Wirnsberger, P., Fortunato, M., Alef, F., Ravuri, S., Ewalds, T., Eaton-Rosen, Z., Hu, W., Merose, A., Hoyer, S., Holland, G., Vinyals, O., Stott, J., Pritzel, A., Mohamed, S., & Battaglia, P. (2023). Learning skillful medium-range global weather forecasting. *Science*, 0, eadi2336.

<https://doi.org/10.1126/science.adi2336>

Lamolla, P. V., Popartan, A., Perello-Moragues, T., Noriega, P., Saurí, D., Poch, M., & Molinos-Senante, M.

(2022). Agent-based modelling to simulate the socio-economic effects of implementing time-of-use tariffs for domestic water. *Sustainable Cities and Society*, 86, 104118. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104118>

Leochico, C. F. D., Giusto, M. L. D., & Mitre, R. (2021). Impact of scientific conferences on climate change and how to make them eco-friendly and inclusive: A scoping review. *The Journal of Climate Change and Health*, 4, 100042. <https://doi.org/10.1016/j.joclim.2021.100042>

Lichter, K., Demeulenaere, S., Drew, T., Wong, E., Grover, S., Gundling, K., Mohamad, O., & Singer, L. (2022). The Environmental Impact of a Hybrid Medical Conference: Reduced Carbon Emissions of ASTRO's Digital XP 2021 Conference Model. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, 114(3), S130. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2022.07.584>

Liggesmeyer, P., Rombach, D., & Bomarius, F. (2018). Smart Energy: Die Digitale Transformation im Energiesektor. In R. Neugebauer (Ed.), *Digitalisierung* (pp. 347–363). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-55890-4_20

Liu, C., Wang, X., Bai, Z., Wang, H., & Li, C. (2023). Does Digital Technology Application Promote Carbon Emission Efficiency in Dairy Farms? Evidence from China. *Agriculture*, 13(4), 904. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040904>

Liu, R., Gailhofer, P., Gensch, C., & Wolff, F. (2019). *Impacts of the digital transformation on the environment and sustainability*. https://www.researchgate.net/publication/342039732_Impacts_of_the_digital_transformation_on_the_environment_and_sustainability

Magazzino, C., Porrini, D., Fusco, G., & Schneider, N. (2021). Investigating the link among ICT, electricity consumption, air pollution, and economic growth in EU countries. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 16(11–12), 976–998. <https://doi.org/10.1080/15567249.2020.1868622>

Märkel, C., Wunderlich, N., Lundborg, M., Simons, M., Beck, R., & Gesmann-Nuissl, D. (2023). *Potenziale der Blockchain-Technologie für Klimaschutz und Energiewende* (Fachdialog Blockchain). WIK-Consult GmbH. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Mittelstand/blockchain-energiewende.html>

Martin, H., Buffat, R., Bucher, D., Hamper, J., & Raubal, M. (2022). Using rooftop photovoltaic generation to cover individual electric vehicle demand—A detailed case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 111969. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111969>

Martins, P., Lopes, S. I., Rosado da Cruz, A. M., & Curado, A. (2021). Towards a Smart & Sustainable Campus: An Application-Oriented Architecture to Streamline Digitization and Strengthen Sustainability in Academia. *Sustainability*, 13(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/su13063189>

Marvin, H. J. P., Bouzemrak, Y., Van Der Fels-Klerx, H. J., Kempenaar, C., Veerkamp, R., Chauhan, A., Stroosnijder, S., Top, J., Simsek-Senel, G., Vrolijk, H., Knibbe, W. J., Zhang, L., Boom, R., & Tekinerdogan, B. (2022). Digitalisation and Artificial Intelligence for sustainable food systems. *Trends in Food Science & Technology*, 120, 344–348. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.020>

Matasov, V., Belevi Marchesini, L., Yaroslavtsev, A., Sala, G., Fareeva, O., Seregin, I., Castaldi, S., Vasenev, V., & Valentini, R. (2020). IoT Monitoring of Urban Tree Ecosystem Services: Possibilities and Challenges. *Forests*, 11(7), 775. <https://doi.org/10.3390/f11070775>

Mattoni, B., Nardecchia, F., & Bisegna, F. (2019). Towards the development of a smart district: The application of an holistic planning approach. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101570. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101570>

Meshulam, T., Font-Vivanco, D., Blass, V., & Makov, T. (2023). Sharing economy rebound: The case of peer-to-peer sharing of food waste. *Journal of Industrial Ecology*, 27(3), 882–895. <https://doi.org/10.1111/jiec.13319>

Mezzina, G., Ciccicarese, D., & De Venuto, D. (2023). Food Waste Prevention System to Improve Smart Homes Sustainability. In G. Cocorullo, F. Crupi, & E. Limiti (Eds.), *Proceedings of SIE 2022* (Vol. 1005, pp. 251–257). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26066-7_39

Müller, M., Olsson, P.-O., Eklundh, L., Jamali, S., & Ardö, J. (2022). Features predisposing forest to bark beetle outbreaks and their dynamics during drought. *Forest Ecology and Management*, 523, 120480. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120480>

Nguyen, T.-H., & Jung, J. J. (2021). Swarm intelligence-based green optimization framework for sustainable transportation. *Sustainable Cities and Society*, 71, 102947. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102947>

Nikelowski, L. (2020). *Der Weg zur Smart Factory*. <https://doi.org/10.24406/IML-N-589139>

Nirukkanaporn, S., & Petcharaks, N. (2019). A Modified Dynamic Programming for Generation Scheduling–Environmental Impact Analysis for EV Penetration. *2019 7th International Electrical Engineering Congress (IIECON)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/IIECON45304.2019.8939002>

OECD. (2022). *MEASURING THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE COMPUTE AND APPLICATIONS THE AI FOOTPRINT* (No. 341; OECD DIGITAL ECONOMY PAPERS).

Pachilakis, M., Dambra, S., Sanchez-Rola, I., & Bilge, L. (2023). *Quantifying Carbon Emissions due to Online Third-Party Tracking*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2304.00927>

Pardo, G., Del Prado, A., Fernández-Álvarez, J., Yáñez-Ruiz, D. R., & Belanche, A. (2022). Influence of precision livestock farming on the environmental performance of intensive dairy goat farms. *Journal of Cleaner Production*, 351, 131518. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131518>

Pientka, F. (2023). Grüne Cloud für eine nachhaltige Digitalisierung. *Wirtschaftsinformatik & Management*, 15(2), 96–106. <https://doi.org/10.1365/s35764-023-00466-2>

Pohl, J., Frick, V., Finkbeiner, M., & Santarius, T. (2022). Assessing the environmental performance of ICT-based services: Does user behaviour make all the difference? *Sustainable Production and Consumption*, 31, 828–838. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.04.003>

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, 127845. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127845>

Polemis, M. L., & Tsionas, M. G. (2021). On the Measurement of Carbon Footprint of Bitcoin: A Bayesian Quantile Cointegration Analysis. *International Journal of Finance & Economics*, 28(2), 1602–1621. <https://doi.org/10.1002/ijfe.2496>

Preuschmann, S., Blome, T., Görl, K., Köhnke, F., Steuri, B., El Zohbi, J., Rechid, D., Schultz, M., Sun, J., & Jacob, D. (2022). How to develop new digital knowledge transfer products for communicating strategies and new ways towards a carbon-neutral Germany. *Advances in Science and Research*, 19, 51–71. <https://doi.org/10.5194/asr-19-51-2022>

Ramesohl, S., Lauten-Weiss, J., & Kobiela, G. (2021). *Blockchains nachhaltig gestalten—Vorschlag von nachhaltigkeitsorientierten Entscheidungskriterien und eines Verfahrenskonzepts für die Umsetzung staatlich geförderter oder initiiertes Projekte im Bereich Blockchain (Wuppertal Report Nr. 21)*. Wuppertal Institut.

Santos, G., & Azhari, R. (2022). Can we save GHG emissions by working from home? *Environmental Research Communications*, 4(3), 035007. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac3d3e>

Schmidt, C. M. (Hrsg.). (2023). *Digitainability. Digitale Schlüsseltechnologien für ökologisch nachhaltiges Wirtschaften: Marktpotenziale und strategische Implikationen (acatech STUDIE)*. <https://www.acatech.de/publikation/digitainability-digitale-schlüsseltechnologien-fuer-oekologisch-nachhaltiges-wirtschaften-marktpotenziale-und-strategische-implikationen/>

Sim, J., University of Connecticut, Lee, J., Chungbuk National University, Cho, D., & Korea Advanced Institute of Science and Technology. (2023). On the Effectiveness of Smart Metering Technology Adoption: Evidence from the National Rollout in the United Kingdom. *Journal of the Association for Information Systems*, 24(2), 555–591. <https://doi.org/10.17705/1jais.00786>

Tang, Y., Cockerill, T. T., Pimm, A. J., & Yuan, X. (2021). Reducing the life cycle environmental impact of

electric vehicles through emissions-responsive charging. *iScience*, 24(12), 103499. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103499>

UBA. (2013, August 20). *Rebound-Effekte* [Text]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/oekonomische-rechtliche-aspekte-der/rebound-effekte>

UBA. (2023a, March 15). *UBA-Prognose: Treibhausgasemissionen sanken 2022 um 1,9 Prozent* [Text]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/uba-prognose-treibhausgasemissionen-sanken-2022-um>

UBA. (2023b, August 7). *Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgas-Emissionen* [Text]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/landforstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas>

Ulucak, R., Danish, & Khan, S. U.-D. (2020). Does information and communication technology affect CO2 mitigation under the pathway of sustainable development during the mode of globalization? *Sustainable Development*, 28(4), 857–867. <https://doi.org/10.1002/sd.2041>

van Ewijk, S., & Hoekman, P. (2021). Emission reduction potentials for academic conference travel. *Journal of Industrial Ecology*, 25(3), 778–788. <https://doi.org/10.1111/jiec.13079>

Van Oers, L., Guinée, J. B., & Heijungs, R. (2020). Abiotic resource depletion potentials (ADPs) for elements revisited—Updating ultimate reserve estimates and introducing time series for production data. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(2), 294–308. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01683-x>

Wang, D. (2023). Digitalization and Climate Change Adaptation in China. *Green and Low-Carbon Economy*. <https://doi.org/10.47852/bonviewGLCE32021306>

Wang, L., Wu, Y., Huang, Z., & Wang, Y. (2022). How big data drives green economic development: Evidence from China. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1055162. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1055162>

Wang, Y., Gao, W., Li, Y., Qian, F., & Yao, W. (2023). Techno-economic analysis of the transition toward the energy self-sufficiency community based on virtual power plant. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1010846. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1010846>

Wankmüller, F., Graulich, D., Rochholz, F., Fiene, C., & Siegmund, A. (2022). Klimaanpassung innovativ vermitteln – Potenziale von mobilen Apps und Serious Games für den Schulunterricht. In J. Weselek, F. Kohler, & A. Siegmund (Eds.), *Digitale Bildung für nachhaltige Entwicklung: Anwendung und Praxis in der Hochschulbildung* (pp. 75–89). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-65120-9_7

Weigel, P., & Fishedick, M. (2019). Review and Categorization of Digital Applications in the Energy Sector. *Applied Sciences*, 9(24), 5350. <https://doi.org/10.3390/app9245350>

Wohlschlager, D., Haas, S., & Neitz-Regett, A. (2022). Comparative environmental impact assessment of ICT for smart charging of electric vehicles in Germany. *Procedia CIRP*, 105, 583–588. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.097>

Wohlschlager, D., Neitz-Regett, A., & Lanzinger, B. (2021). Environmental Assessment of Digital Infrastructure in Decentralized Smart Grids. *2021 IEEE 9th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, 13–18. <https://doi.org/10.1109/SEGE52446.2021.9535061>

Wohlschlager, D., Ostermayer, M., Köppl, S., & Regett, A. (2020, 14.02). *Ökologische Bewertung digitaler Energieinfrastruktur*. 16. Symposium Energieinnovation, Graz/Austria. https://www.researchgate.net/publication/349493253_Okologische_Bewertung_digitaler_Energieinfrastruktur

Wright, D., Igel, C., Samuel, G., & Selvan, R. (2023). *Efficiency is Not Enough: A Critical Perspective of Environmentally Sustainable AI* (arXiv:2309.02065). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.02065>

Xu, L., Yilmaz, H. Ü., Wang, Z., Poganietz, W.-R., & Jochem, P. (2020). Greenhouse gas emissions of electric vehicles in Europe considering different charging strategies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87, 102534. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102534>

Ye, F. (2019). *Perception Learning, Prediction and Motion Planning for Energy Efficient Driving of Connected and Automated Vehicles* [Dissertation]. University of California.

Zhang, J., Wang, B., & Latif, Z. (2019). Towards cross-regional sustainable development: The nexus between information and communication technology, energy consumption, and CO2 emissions. *Sustainable Development*, 27(5), 990–1000.

Zhang, W., Gu, F., & Guo, J. (2019). Can smart factories bring environmental benefits to their products?: A case study of household refrigerators. *Journal of Industrial Ecology*, 23(6), 1381–1395. <https://doi.org/10.1111/jiec.12928>

Zimmermann, S., Schulz, T., Hein, A., Gewald, H., & Krcmar, H. (2023). Motivating change in commuters' mobility behaviour: Digital nudging for public transportation use. *Journal of Decision Systems*, 1–27. <https://doi.org/10.1080/12460125.2023.2198056>

Zimmermann, T., & Bliklen, R. (2020). Single-use vs. reusable packaging in e-commerce: Comparing carbon footprints and identifying break-even points. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 29(3), 176–183. <https://doi.org/10.14512/gaia.29.3.8>

Anhang A Methodisches Vorgehen

A.1 Systematische Literaturrecherche

A.1.1 Allgemeines Vorgehen zur Identifikation der Studien

Um die relevante Literatur zu identifizieren, wurden zunächst für jedes der acht Themenfelder Suchbegriffe definiert. Neben der Kombination von übergeordneten Suchbegriffen wie z. B. „environmental impacts/emissions“ mit „digitisation/digitalisation“ wurden diese Suchbegriffe auch mit den relevanten digitalen Anwendungen je Themenfeld kombiniert. Anhand der Ergebnisse der einschlägigen Literaturdatenbank „Lens.org“ und ergänzenden Recherchen in GoogleScholar und Google wurde eine Ausgangsübersicht erstellt.

Die darin enthaltenen Veröffentlichungen wurden durch die Sichtung von Titel und Abstracts hinsichtlich ihrer Relevanz für die Metastudie bewertet. Auf der Basis dieser Relevanzbewertung wurde eine vorläufige Auswahl getroffen.

Nach Abschluss der systematischen Suche und im Zuge des Vergleichs und der Analyse der gefundenen Studien wurden durch Snowballing der bisher gefundenen Literatur weitere Studien hinzugefügt. Snowballing beschreibt die Prüfung auf Inklusion von Literatur, die in bereits gefundener Literatur zitiert wird oder von Literatur die bereits gefundene Literatur zitiert (downstream/upstream). Des Weiteren konnte auf Basis von Empfehlungen von Expert:Innen aus dem Team des IÖW und Technopolis weitere relevante Veröffentlichungen identifiziert und dem Datensatz hinzugefügt werden.

Im Folgenden beschreiben wir das methodische Vorgehen bei der Definition der Suchbegriffe, der Auswahl der Datenbanken sowie der Relevanzbewertung und Literaturanalyse.

A.1.2 Definition der Suchbegriffe

Basierend auf den acht Themenfeldern wurden konkrete Suchbegriffe entwickelt. Diese themenspezifischen Suchbegriffe spiegeln zum Teil Anwendungsfälle der Digitalisierung in den jeweiligen Themenfeldern wider, zum Teil handelt es sich um Fachbegriffe, unter denen Digitalisierung im jeweiligen Themenfeld diskutiert wird oder Begriffe, die mit dem Themenfeld assoziiert werden. Durch dieses breite Vorgehen bei der Literaturrecherche soll sichergestellt werden, dass keine relevanten Anwendungsfälle aus der Analyse ausgeschlossen werden. Die themenspezifischen Suchbegriffe wurden im Rahmen interner Workshops diskutiert und erweitert.

Neben den themenspezifischen Suchbegriffen wurden digitalisierungs- und nachhaltigkeitsbezogene Suchbegriffe entwickelt. Für die Fälle, in denen die themenspezifischen Suchbegriffe keinen eindeutigen Nachhaltigkeits- und/oder Digitalisierungsbezug haben, wurden die jeweiligen Begriffe zur Suchanfrage hinzugefügt.

Bei einigen Suchanfragen ergab sich ein hoher Anteil von für die Metastudie irrelevanten Ergebnissen. In diesen Fällen wurde darüber hinaus eine Eingrenzung der Suchergebnisse durch präzisere Anfragen durchgeführt, um einen ausreichend hohen Anteil relevanter Ergebnisse zu erzielen. Dafür wurden zusätzlich zu dem oben beschriebenen Vorgehen Begriffe zur Suchanfrage hinzugefügt, die mit einer Quantifizierung der Effekte assoziiert werden können.

A.1.3 Auswahl der Datenbanken

In die Metastudie werden Veröffentlichungen einbezogen, die seit dem 01.01.2019 bis zum Datum der Suchanfrage publiziert wurden. Die Literaturrecherche erfolgte auf Basis von drei Quellen: Der Literaturdatenbank „Lens.org“, GoogleScholar sowie ergänzenden Recherchen nach weiterer grauer Literatur.

Die Datenbank „Lens.org“ stellt den Ausgangspunkt für die Literaturrecherche dar. „Lens.org“ ist ein Open-Access-Projekt des non-profit Sozialunternehmens Cambia¹⁴ und führt verschiedene Quellen zu wissenschaftlicher Literatur und Patenten zusammen. Neben etablierten Datenbanken für wissenschaftliche Literatur wie ORCID, CrossRef und Microsoft Academic werden Webscraping-Ansätze verfolgt.¹⁵ Auf diese Weise ermöglicht „Lens.org“ auch die Einbeziehung aktueller Konferenzbeiträge und Studien, die noch nicht den Peer-Review-Prozess durchlaufen haben und gehört nach GoogleScholar zu den umfassendsten Literaturdatenbanken.

Die mit „Lens.org“ erzielten Suchergebnisse wurden stichprobenartig mit den jeweiligen Ergebnissen der Literaturdatenbank Web of Science abgeglichen, es ergaben sich hierbei keine bedeutenden Abweichungen. In vielen Fällen war die Literaturrecherche mit „Lens.org“ umfassender. Die Ergebnisse von Web of Science, die nicht auch mit den Suchanfragen auf „Lens.org“ gefunden wurden, waren nicht relevant für die Metastudie. Des Weiteren ließen sich alle Mehrergebnisse von Web of Science auch auf „Lens.org“ in einer direkten Suche der Titel auffinden. Dies ist ein guter Indikator dafür, dass der Umfang der Datenbank von „Lens.org“ für eine umfassende Suche geeignet ist.

Bei der ergänzenden Suche mit GoogleScholar zeigte sich, dass die Trefferanzahl bei einigen Themenfeldern zwar sehr hoch war, sich jedoch nur ein kleiner Anteil der zusätzlichen Veröffentlichungen als relevant herausstellte. Daher wurden nur wenige relevante Studien zur auf „Lens.org“ basierenden Übersicht hinzugefügt. Der Anteil der relevanten Studien nahm zudem analog zur GoogleScholar-Bewertung stark ab: Schon bei den auf Platz 4 und 5 eingestuft Studien waren keine sehr relevanten Veröffentlichungen mehr zu finden.

Für die insbesondere nicht-wissenschaftliche graue Literatur wurde eine ergänzende Recherche via Google und über die Websites einschlägig bekannter internationaler Organisationen, Beratungsfirmen, Verbände, NGOs etc. durchgeführt.

A.2 Ergebnisse der Literaturrecherche

Bei der Literaturrecherche in Lens wurden insgesamt 5711 englischsprachige und 560 deutschsprachige Ergebnisse über alle Themenfelder hinweg identifiziert. Darunter waren bei den englischsprachigen Ergebnissen etwa 20% Duplikate, bei den Deutschsprachigen 10%. Aufgrund unterschiedlicher Schreibweisen der Basisinformationen der Veröffentlichungen wurden bei dieser ersten Entfernung der Duplikate einige wenige der doppelten Studien nicht gefunden. Diese wurden im Verlauf der Literaturanalyse händisch entfernt.

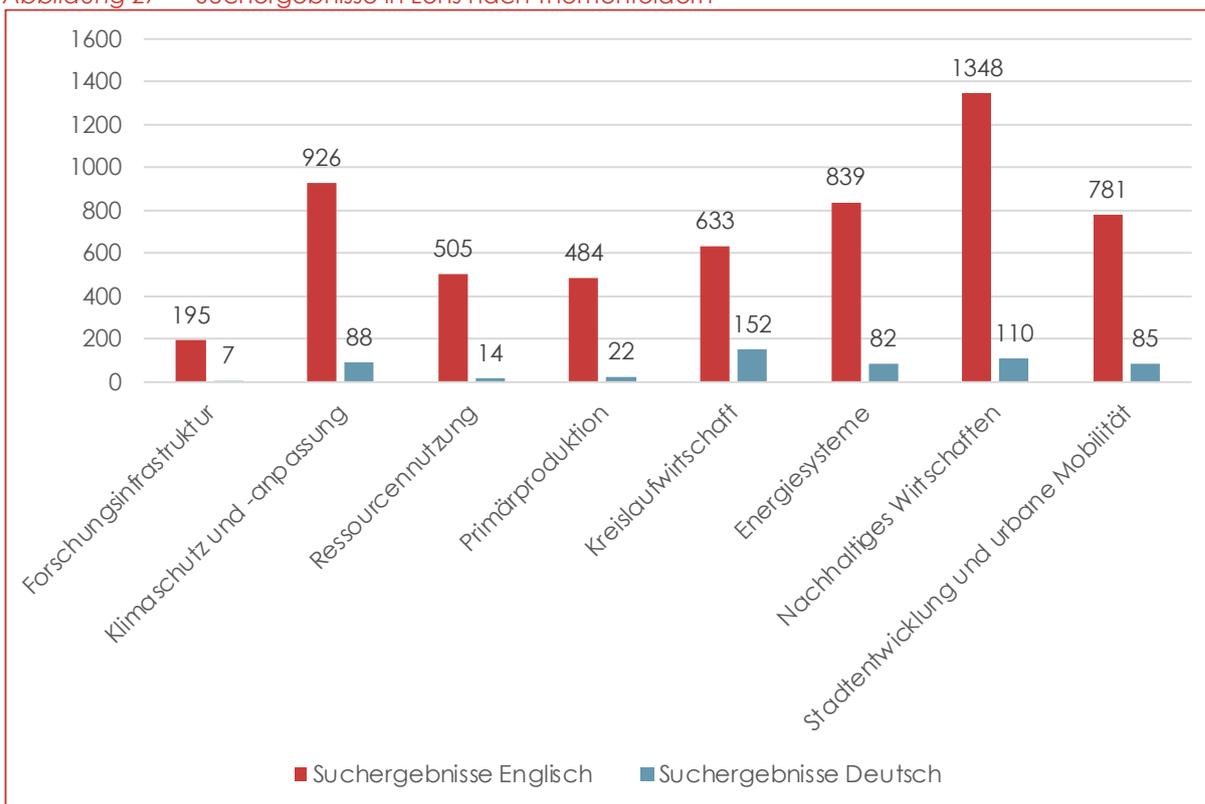
Die Anzahl der Suchergebnisse in der Ausgangsübersicht unterscheidet sich stark zwischen den verschiedenen Themenfeldern: Auf Basis der in den Themenfeldern „Nachhaltiges Wirtschaften“ und „Klimaschutz und -anpassung“ entwickelten Suchbegriffe wurden deutlich mehr Ergebnisse gefunden als beispielsweise im Themenfeld „Forschungsinfrastruktur“ (siehe Abbildung 27).

Aufgrund inhaltlicher Überschneidungen zwischen den Themenfeldern, konnten viele der Veröffentlichungen mehreren Themenfeldern zugeordnet werden. Die unterschiedlich hohe Anzahl von Studien in den verschiedenen Themenfeldern ergibt sich aus zwei Gründen: Zum einen sind die für die Metastudie irrelevanten Ergebnisse nicht mehr enthalten. Zum anderen konnten nicht alle Studien, die bei einer spezifischen Themenfeldsuche gefunden wurden, auch tatsächlich diesem Themenfeld zugeordnet werden.

¹⁴Siehe Unternehmenswebsite für weitere Informationen: <https://cambia.org/>

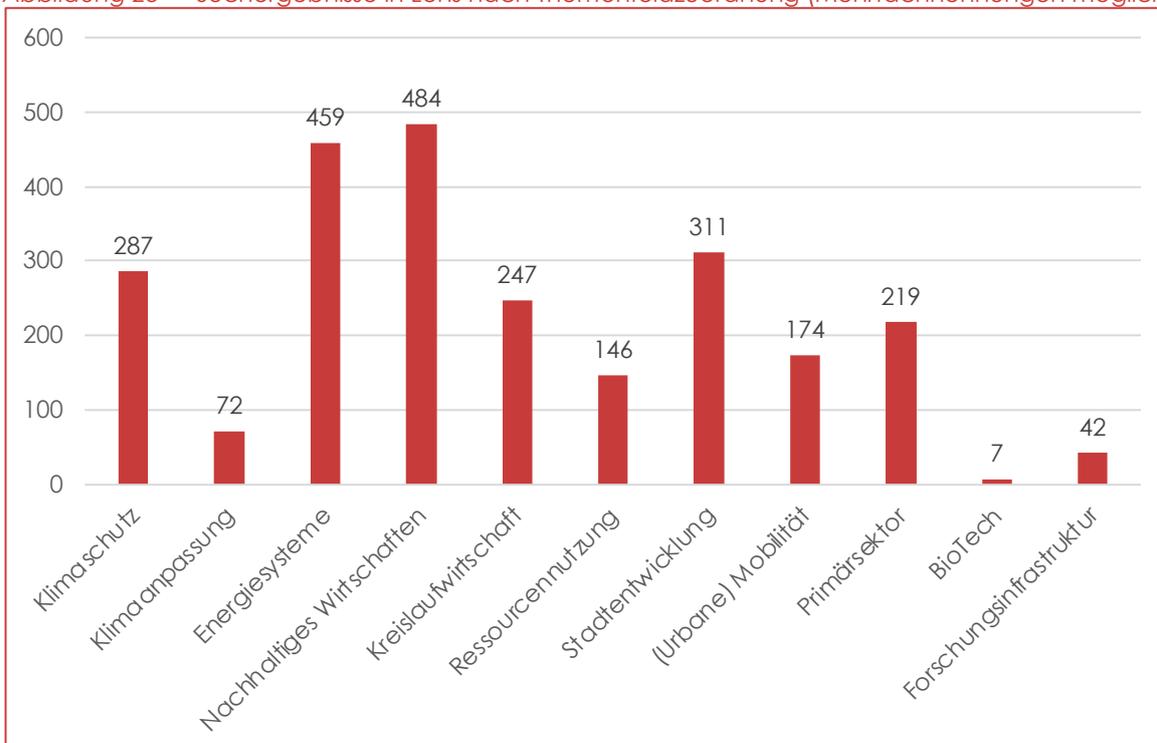
¹⁵Vgl. <https://about.lens.org/> (Zugriff am 06.07.2023)

Abbildung 27 Suchergebnisse in Lens nach Themenfeldern



Technopolis und IÖW, 2024

Abbildung 28 Suchergebnisse in Lens nach Themenfeldzuordnung (Mehrfachnennungen möglich)



Technopolis und IÖW, 2024

A.2.1 Ergebnisse der Relevanzbewertung

Die Veröffentlichungen der Ausgangsübersicht wurden in Bezug auf ihre Relevanz bewertet. Hierfür wurden auf Basis von Titel und Kurzbeschreibung (Abstract) folgende vier Fragen auf einer Skala von 1 (nicht zutreffend) bis 3 (zutreffend) bewertet:

- Liegt der Fokus der Veröffentlichung auf Umwelteffekten?
- Liegt der Fokus der Veröffentlichung auf Digitalisierung?
- Werden die Umwelteffekte quantifiziert?
- Ist die Übertragbarkeit auf den deutschen bzw. europäischen Kontext gegeben?

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über das Raster zur Relevanzbewertung.

Tabelle 29 Kriterien für die Relevanzbewertung

Relevanz für Metastudie	Umwelteffekte	Digitalisierung	Quantifizierte Ergebnisse	Geographische Übertragbarkeit
3 – Hohe Relevanz	Umwelteffekte hauptsächlich oder alleiniger Betrachtungsgegenstand.	Digitalisierung hauptsächlich oder alleiniger Betrachtungsgegenstand.	Ergebnisse in messbaren Einheiten und/oder eine quantitative Methode wird angewandt.	Studien in Analysekontexten der leicht auf Deutschland übertragbar ist. Studien mit allgemeingültigen Ergebnissen.
2 – Mittlere Relevanz	Umwelteffekte einer von mehreren analysierten Betrachtungsgegenständen.	Digitalisierung einer von mehreren analysierten Betrachtungsgegenständen.	Quantitative Ergebnisse gemischt mit qualitativen Ergebnissen. Auch zuzuordnen, wenn nicht ersichtlich ist, in welcher Form die Ergebnisse quantifiziert werden.	Studien in Analysekontexten die nur anteilig auf den deutschen Kontext übertragbar sind.
1 – Geringe Relevanz	Umwelteffekte nicht im Fokus der Analyse.	Digitalisierung nicht im Fokus der Analyse.	Rein qualitative Analyse und Resultate.	Studien in Analysekontexten, die nicht oder nur sehr schwer auf den deutschen Kontext zu übertragen sind.

Technopolis und IÖW, 2024

Für Studien, die offensichtlich nicht von Relevanz für die Metastudie sind, gab es eine zusätzliche Möglichkeit des Direktausschlusses. Die numerische Bewertung auf einer Skala von 1-3 ermöglicht die Bestimmung eines (gewichteten) Mittelwertes. Veröffentlichungen, die einen ungewichteten Mittelwert von 3 über alle vier Relevanzkriterien hinweg erhalten haben, wurden in die relevante Auswahl einbezogen. Darüber hinaus wurden selektiv Veröffentlichungen einbezogen, die in einzelnen oder mehreren Relevanzkriterien mit Werten von 1 oder 2 bewertet wurden. So ist beispielsweise im Themenfeld „Klimaanpassung“ das Kriterium „Umwelteffekte“ nicht zutreffend, da dieses Themenfeld die Reaktion auf Umwelteffekte beschreibt. Auch das Relevanzkriterium „quantifizierte Effekte“ wurde in einigen Fällen weniger stark gewichtet, da die Qualifizierbarkeit von Umwelteffekten z. B. in den Themenfeldern „Primärwirtschaft“ oder „Ressourcennutzung“ nicht immer gegeben ist. Abbildung 29 zeigt die Anzahl der Studien nach ihrer jeweiligen durchschnittlichen Relevanzbewertung.

Abbildung 29 Anzahl der Studien in den einzelnen Relevanzkategorien



Technopolis und IÖW, 2024

A.3 Systematische Literaturanalyse

A.3.1 Allgemeines Vorgehen zur Literaturanalyse

Als erster Schritt für die Literaturanalyse wurden zunächst alle in der Literaturrecherche als relevant identifizierten Studien komplett gelesen und wichtige Informationen für die Themenfeldfazits und Steckbriefe in einem gemeinsamen Raster festgehalten. Wenn sich eine Veröffentlichung bei der Sichtung des Volltextes als nicht relevant für die Metastudie herausstellte, wurde dies in der Relevanzbewertung nachgetragen. Studien, die nicht kostenfrei einsehbar waren, wurden für die Metastudie eingekauft. Ausgenommen hiervon sind die Studien, die nicht einzeln erwerbbar waren, also ein Abonnement des Journals benötigen, sowie Studien die durch eine weitere Abstract-Analyse nicht als relevant genug für den Kauf eingestuft wurden. Nach der Etablierung der endgültigen Datenbasis für die Analyse, wurde auf Basis von n=198 Veröffentlichungen die Themenfeldfazits und Steckbrief-Cluster erstellt (0).

Anschließend wurden die Veröffentlichungen abhängig von ihrem Inhalt den passenden Themenfeldern und Themencluster zugeordnet. Die Themencluster sind die Anwendungen von Digitalisierung, auf die sich die Steckbriefe beziehen (vgl. A.3.4).

Auf Basis dieser Studienzuordnung wurden die Themenfeldfazits und Cluster-Steckbriefe erstellt.

Die spezifischen Themenfeldfazits fassen den Forschungsstand zu den Umwelteffekten der Digitalisierung im jeweiligen Bereich zusammen. Während sich diese Themenfeldfazits mehr auf den Stand der Forschung und auf der Struktureinheit des BMBF bewegen, beziehen sich die Cluster-Steckbriefe auf spezifische und anschauliche Anwendungsgebiete der Digitalisierung und sollen greifbarere Informationen bieten. Die Analysen, sowohl in den Themenfeldfazits als auch in den Cluster-Steckbriefen, betrachten einen möglichst weiten Nachhaltigkeitsbegriff, beziehen sich beispielsweise nicht ausschließlich auf die Emissionen von CO₂.

Im Folgenden ist das genaue Vorgehen bei der Volltextanalyse, bei der Erstellung der Themenfeldfazits sowie der Steckbriefe aus den Themenclustern beschrieben.

A.3.2 Volltextanalyse

Bei den Veröffentlichungen, die nach der Bewertung als relevante Auswahl eingestuft wurden, wurde eine Volltextanalyse durchgeführt. Dasselbe Vorgehen wurde bei den Studien durchgeführt die als Teil dieser Volltextanalyse durch Snowballing identifiziert wurden, sowie für die Studien, die durch interne Ergänzungen hinzugefügt wurden.

In dieser schematischen Analyse wurden verschiedene Informationen erfasst, darunter Angaben zur Qualität, zum Hintergrund, zur Veröffentlichungszeit und zum -ort der Studie. Zusätzlich wurden Einzelheiten zu den beschriebenen Nachhaltigkeitseffekten festgehalten und Informationen zur angewendeten Methode und zur verwendeten Indikatorik angegeben, sofern die Studie die Effekte quantitativ erfasste. Um ein umfassenderes Bild zu zeichnen, wurden je nach Themenfeld unterschiedliche Mindestanforderungen für die Einbeziehung von Studien festgelegt. In einigen Themenfeldern und Cluster besteht die Literatur daher ausschließlich aus Studien mit quantifizierten Ergebnissen, während in anderen Teilen auch qualitative Studien einbezogen wurden.

Im Prozess der Analyse wurde jede Veröffentlichung den passenden Themenfeldern und Themenclustern zugewiesen. Obwohl die Suchbegriffe, mit denen die verschiedenen Veröffentlichungen identifiziert wurden, sich aus den Themenfeldern ergeben, wurden Veröffentlichungen dennoch anderen oder mehreren Themenfeldern zugeordnet, wenn dies inhaltlich sinnvoll erschien. Diese freie Zuordnung gilt auch für die Themencluster der Steckbriefe. Die Veröffentlichungen, die bei keinem Themenfeld oder Cluster verordnet werden konnten, sind nicht Teil der Analyse.

A.3.3 Erstellung der Themenfeldfazits

Die acht analysierten Themenfelder ergeben sich durch die Unterstruktureinheiten des BMBFs und deren jeweiligen Forschungsfelder. Diese sind Energiesysteme, Kreislaufwirtschaft, Stadtentwicklung und urbane Mobilität, Nachhaltiges Wirtschaften, Klimaschutz und Klimaanpassung, Ressourcennutzung, Primärwirtschaft und BioTech, und Forschungsinfrastruktur. In Anbetracht des Ziels der Metastudie eine Gesamtübersicht über den Forschungsstand zu den Nachhaltigkeitseffekten der Digitalisierung zu geben, bietet sich die breitaufgestellte Strukturierung des BMBFs als Themenfeldtrennung an.

Das Ziel der Themenfeldfazits ist der systematische Vergleich der relevantesten Studien aus den Themenfeldern, mit dem Ziel einen detaillierten Überblick über die Studienlage zu geben. Besonders relevant war die Identifizierung der digitalen Schlüsseltechnologien, welche im positiven oder negativen Sinne den größten Einfluss auf Umwelteffekte haben. Gleichzeitig wurde als Teil der Einschätzung des Forschungsfeld festgestellt wie belastbar die Annahmen und Ergebnisse der observierten Forschungsergebnisse sind und wo noch Forschungsbedarf besteht. Teil der Auswertung war auch die quantitative Analyse, etwa zu den angewandten Methodiken oder zu den Effektrichtungen analysierter Umwelteffekte. Hierbei wurden ausschließlich Veröffentlichungen herangezogen, die quantifizierte Ergebnisse berichteten. Als Gesamtbild soll durch die Themenfeldfazits erkennbar sein, welches Gesamtpotenzial die digitalen Technologien in den jeweiligen Themenfeldern besitzen.

A.3.4 Erstellung der Cluster-Steckbriefe

Zur Erstellung der Steckbriefe wurden zunächst induktiv auf Basis der Studienlage Themencluster gebildet, die gleichzeitig thematisch gut abgrenzbar sind und eine signifikante Anzahl von Studien beinhalten. Die sich aus dem Prozess ergebende Logik ist, dass jedes Cluster sich einem Sektor des deutschen Klimaschutzgesetzes (KSG) zuordnen lässt. Diese Vorgehensweise erlaubte eine intuitivere und anschauliche Abtrennung der verschiedenen Cluster und Steckbriefe. Zusätzlich zu den Clustern auf Ebene des KSG wurde das Cluster Smart City als wichtiges Querschnitts-Thema mit einer breiten Studienlage mit aufgenommen.

Tabelle 30 Zuordnung von Themenclustern zu Sektoren des Klimaschutzgesetzes (KSG)

Themencluster	KSG-Sektor
Smart Grid	Energiewirtschaft
Smart Factory	Industrie
Smart Mobility	Verkehr
Smart Buildings	Gebäude
Smart Agriculture	Landwirtschaft
Smart City	-

Technopolis und IÖW, 2024

Das Ziel der Cluster-Steckbriefe ist ein Ähnliches wie das der Themenfelder. Auf Ebene der identifizierten Schnittstellenthemen sollen in einer kompakteren und zugänglichen Form das positive und negative Potenzial der Digitalisierung für die Umwelt dargelegt werden.

A.4 Fokusgruppen

Im Anschluss an die Literaturanalyse und die Erstellung der Steckbriefe wurden für die Themenfelder Kreislaufwirtschaft, Stadtentwicklung und urbane Mobilität sowie Klimaschutz Fokusgruppen durchgeführt. Digitale Anwendungen in diesen Bereichen besitzen ein hohes Transformationspotenzial, bedürfen allerdings noch weiterer Forschung. Die interdisziplinären virtuellen Fokusgruppen haben daher zum Ziel, die Erkenntnisse aus der Literaturanalyse zu ergänzen sowie Forschungslücken zu identifizieren und Handlungsempfehlungen zu formulieren. An den drei Fokusgruppen nahmen jeweils 5-7 Expert*innen aus Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft teil. Es wurde ein explorativer Ansatz gewählt, sodass die Expert*innen unabhängig von den detaillierten Ergebnissen der Literaturanalyse, um Ihre Einschätzungen zu den Fragen gebeten wurden, die zuvor literaturbasiert untersucht wurden. In den jeweiligen Abschnitten zu den Themenfeldern werden die zentralen Ergebnisse der Fokusgruppe dargestellt und ins Verhältnis zu den literaturbasierten Ergebnissen gesetzt.

technopolis
group 

www.technopolis-group.com



| i | ö | w

INSTITUT FÜR
ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG