

Februar 2024

# Metastudie „Nachhaltigkeits- effekte der Digitalisierung“

---

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

Kurzfassung

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

Scharweberstr. 30  
10247 Berlin

[jan.stede@technopolis-group.com](mailto:jan.stede@technopolis-group.com)

[www.technopolis-group.com](http://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](mailto:christian.lautermann@ioew.de)

[www.ioew.de](http://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

## 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 <b>Soft- und Hardware-Infrastrukturen der Telekommunikation</b> und ist Basis für digitale Anwendungen (Server, Rechenzentren, digitale Endgeräte wie Handys und Laptops, etc). Effektive Bereitstellung von <b>Vernetzungs-, Kommunikations- und Transaktionsmöglichkeiten, z.B. durch digitale Infrastruktur</b>	<b>Vernetzung physischer und virtueller Objekte</b> unter Verwendung von digitaler Sensorik und Aktorik. Durch <b>automatische Identifikation, Fernüberwachung und Fernsteuerung</b> können relevante Daten bereitgestellt und integriert werden sowie Prozesse optimiert werden. Dadurch können der Einsatz von Ressourcen und der Energieverbrauch reduziert werden.	Algorithmische <b>Verarbeitung großer Mengen an Daten</b> z. B. für präzisere Prognosen in der Klimaforschung und zur effizienteren Vorhersage von Umweltereignissen im Bereich der Klimaanpassung. Effizienterer Einsatz von Ressourcen durch <b>intelligente Systemsteuerung</b>	Digitale und <b>dezentrale Durchführung von (Kleinst-) Transaktionen</b> <b>Erleichterte Regulierung und Monitoring</b> (z. B. Emissionshandel) durch Manipulationssicherheit, Irreversibilität, Dezentralität & Transparenz
Ausgewählte Anwendungsbeispiele 	<b>Vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, z.B.:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Vernetzung</b> digitaler Geräte</li> <li>• <b>Kommunikation und Informationsvermittlung</b></li> <li>• Ermöglichung von <b>Homeoffice</b> sowie <b>digitalen Besprechungen und Konferenzen mithilfe digitaler (Video-)Kommunikation</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Smart Home &amp; Smart Buildings</b></li> <li>• <b>Smart Metering</b> &amp; preisdynamische Tarife</li> <li>• Smart Charging &amp; virtuelle Kraftwerke</li> <li>• <b>Sensorik und Drohnen</b> für automatisierte Landmaschinensysteme und Daten für Präzisionslandwirtschaft</li> <li>• <b>Smart Factory</b> &amp; Industrial Internet of Things</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verschiedenste Arten von <b>Prognosen</b> (z. B. Wetter, Stromerzeugung, Anlagenzustand/ Wartungsbedarfe oder Energieflüsse)</li> <li>• KI-Nutzung zur <b>Modellierung und Simulation</b> in der Klimaforschung</li> <li>• <b>KI-gestützte Datenanalysen &amp; Management-Informationssysteme</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Herkunftsnachweise</b> von Erneuerbaren Energien (Labeling)</li> <li>• <b>Stammdatenregister</b> von Erneuerbare-Energien-Anlagen</li> <li>• <b>Peer-to-Peer-Stromhandel</b> &amp; Smart Contracts für Abwicklung von Transaktionen</li> </ul>
Umweltchancen 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Effizienzsteigerung, Substitutionseffekte &amp; Ressourceneinsparungen</b> durch digitale IKT-Dienstleistungen</li> <li>• Verringerung von Emissionen durch <b>Vermeidung von Flugreisen, Pendelverkehr</b> und anderer Formen der Mobilität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Geringerer Energieverbrauch</b> durch Monitoring und Automatisierung, z. B. von Energiesystemen</li> <li>• <b>Optimierter Einsatz</b> von Speichern, Verbrauchern und Erzeugern sowie Ressourcen wie etwa Boden, Energie und Wasser</li> <li>• <b>Geringerer Netzausbau-</b> und <b>Wartungsbedarf</b></li> <li>• <b>Geringerer Einsatz von Düngemitteln &amp; Optimierung von Erntevorgängen</b></li> <li>• <b>Ressourcenschonung</b> durch Optimierung von Produktionsprozessen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Geringerer Material- und Energieverbrauch</b> durch intelligente Steuerung, Nutzung und Wartung von Energiesystemen</li> <li>• <b>Verbesserung der Klimaforschung</b>, z. B. validere Prognosen von Klimaereignissen</li> <li>• <b>Optimierter Einsatz</b> von Ressourcen wie etwa Boden, Energie und Wasser</li> <li>• <b>Großes Potenzial</b> im Bereich der Klimaanpassung durch verbesserte (Wetter-) Prognosen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Effizientere Informationsbereitstellung</b> durch Wegfall von Intermediären bei Geschäftsprozessen</li> <li>• Unterstützung bei <b>Regulierung und Monitoring</b> (z. B. Verwaltung des Emissionshandels)</li> </ul>

<p>Umweltrisiken</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Zunahme</b> des Energieverbrauchs durch erhöhte <b>IKT-Nachfrage</b> und <b>Datenströme</b></li> <li>• Risiko für <b>Rebound- und Obsoleszenz-Effekte</b> durch komplexe Wechselwirkungen und Verhaltensänderungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Großflächiger Roll-out digitaler Infrastrukturen und damit verbundener <b>Energie- und Ressourcenverbrauch</b></li> <li>• <b>Erhöhte Netzbelastung</b> durch gleichzeitige Ansteuerung vieler technischer Einheiten</li> <li>• <b>Rebound-Effekte</b> können Ressourceneinsparungen entgegenwirken</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Hoher Energie- und Ressourcenbedarf</b> für Datenspeicherung und -verarbeitung, insbes. KI-Training und -Anwendung sowie in der Forschung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potenziell <b>hoher Energie- und Ressourcenbedarf</b> der Blockchain könnte mögliche Einsparungen (Umweltchancen) überwiegen</li> </ul>
<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 <b>Effizienzsteigerungen</b> werden global betrachtet verringert durch <b>Auslagerung der energieintensiven Produktion</b> digitaler Geräte</p>	 <p>Positiver Effekt durch <b>reduzierten Energieverbrauch und vermiedene Abregelung</b> von erneuerbaren Energien</p>	 <p>Positiver Effekt durch <b>erhöhte Lebensdauer oder optimierten Ertrag</b> von Energietechnologien</p>	 <p>Gesamteffekt unklar, da <b>indirektem Potenzial</b> durch <b>Ermöglichung und effizientere Abwicklung von Geschäftsprozessen</b>, ein potenziell <b>hoher Energiebedarf</b> der Blockchain gegenübersteht</p>
<p>Studienlage: Quantifizierung von Umweltwirkungen</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gute Studienlage mit Blick auf den allgemeinen <b>Zusammenhang zwischen IKT und CO<sub>2</sub>-Emissionen</b></li> <li>• <b>Schwierigkeiten</b>, komplexe Folgen wie <b>Rebound- und Obsoleszenz-Effekte</b> quantitativ zu erfassen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Gute Studienlage für Smart Home &amp; Buildings, Smart Metering und Smart Charging</b>; übrige Anwendungen in Energiewirtschaft kaum untersucht</li> <li>• Im Bereich <b>Landwirtschaft</b> und Tierhaltung vor allem <b>Case Studies außerhalb Deutschlands</b></li> <li>• <b>Häufig keine Berücksichtigung</b> der Auswirkungen der <b>Produktion und Nutzung</b> von IoT-Technologien (direkte Effekte) oder von <b>Rebound-Effekten</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Wenige spezifische Studien zu KI und Big Data im Energiebereich</b></li> <li>• Positive Netto-Wirkung bei prognosegesteuerten Energieanlagen</li> <li>• KI als <b>potenziell disruptive Technologie im Bereich Klimaanpassung</b>, Ausmaß der Umwelteffekte aber noch unklar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Keine spezifischen (quantitativen) Studien zu Blockchain im Energiebereich</b> vorhanden</li> <li>• Allgemeine Studien zeigen <b>signifikante Energiebedarfe</b> für Blockchain-Anwendungen wie Kryptowährungen</li> <li>• Unklar, ob Ressourcenverbrauch die potenziellen Einsparungen durch Blockchain überwiegt</li> </ul>

## 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.

**technopolis**  
group 

[www.technopolis-group.com](http://www.technopolis-group.com)



| i | ö | w

INSTITUT FÜR  
ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG