



acatech **STUDIE**

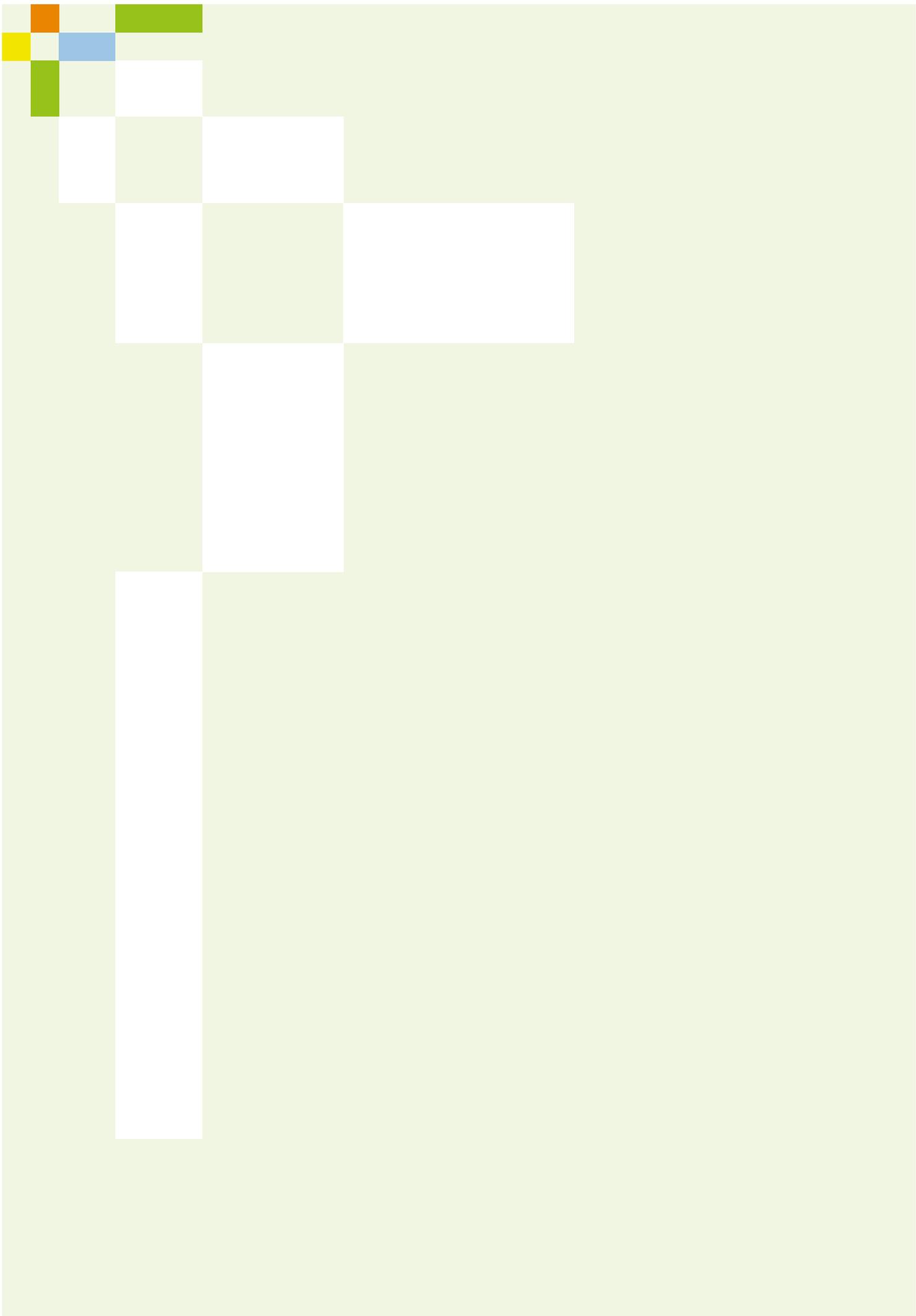
Digitainability

Digitale Schlüsseltechnologien für ökologisch nachhaltiges Wirtschaften: Marktpotenziale und strategische Implikationen

Christoph M. Schmidt (Hrsg.)

 **acatech**

DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN



acatech STUDIE

Digitainability

Digitale Schlüsseltechnologien für ökologisch
nachhaltiges Wirtschaften: Marktpotenziale und
strategische Implikationen

Christoph M. Schmidt (Hrsg.)



Die Reihe acatech STUDIE

In dieser Reihe erscheinen Ergebnisberichte von Projekten der Akademie. Studien vertiefen die Politik- und Gesellschaftsberatung zu technikwissenschaftlichen und technologiepolitischen Zukunftsfragen. Sie liegen in der inhaltlichen Verantwortung der jeweiligen Herausgebenden sowie Autorinnen und Autoren.

Alle bisher erschienenen acatech Publikationen stehen unter www.acatech.de/publikationen zur Verfügung.

Inhalt

Vorwort	5
Projekt	7
Zusammenfassung	8
1 Einleitung	9
2 Methodik	11
2.1 Konzeptionalisierung	11
2.2 Ökologische Marktanalyse	14
2.3 Ökonomische Marktanalyse	15
2.4 Identifizierung von Gestaltungsoptionen	17
3 Status quo und Potenziale digitaler Lösungen für ökologische Nachhaltigkeit in der deutschen Wirtschaft	18
3.1 Wichtigste Lösungsgruppen	18
3.2 Ergebnisse der ökologischen und ökonomischen Marktanalyse	20
3.2.1 Landwirtschaft	21
3.2.2 Wasserwirtschaft	23
3.2.3 Verkehr und Logistik	24
3.2.4 Grundstoffe, Chemie und Pharma	26
3.2.5 Bau- und Immobilienwirtschaft	28
3.2.6 Produktion	30
3.2.7 Elektrotechnik und Maschinenbau	32
3.2.8 Informations- und Kommunikationstechnik	34
3.3 Lösungsgruppen und Technologien im ökologischen Nachhaltigkeitsvergleich	37
3.3.1 Technologien	37
3.3.2 Lösungsgruppen	38
4 Gestaltungsoptionen zur digital-nachhaltigen Potenzialmaximierung	41
4.1 Handlungsfeld Effizienz	41
4.2 Handlungsfeld Effektivität	42
4.3 Handlungsfeld Rahmenbedingungen	45
Übersicht der Gestaltungsoptionen	47
Literatur	50



Vorwort

Wir befinden uns in einer Ära der doppelten Transformation, die uns in eine digitalisierte und auf Nachhaltigkeit ausgerichtete Zukunft führen wird. Ein eindrucksvoller Beleg für diese Trends findet sich beispielsweise im Koalitionsvertrag der aktuellen Bundesregierung: Bereits die ersten beiden Kapitel beschäftigen sich mit dem digitalen Aufbruch sowie der Transformation zur ökologischen Nachhaltigkeit. Und auf europäischer Ebene wird diese Entwicklung aufgegriffen. So hat das bisher größte Konjunkturpaket der EU in Höhe von 1,8 Billionen Euro, das in Reaktion auf die Coronapandemie aufgestellt wurde, vor allem das Ziel, entscheidend zu einem gleichsam grüneren wie digitaleren Europa beizutragen. Doch wengleich die Digitalisierung und die Transformation zur Nachhaltigkeit die Megatrends unserer Zeit darstellen, wohnt ihnen auch eine gewisse Ambivalenz inne.

Digitalisierung ist zwangsläufig von einer gewissen Künstlichkeit geprägt. Die umfassende Technologisierung vieler Facetten unseres Lebens führt zugleich zu einer zunehmenden Virtualisierung: Der Mensch wird Teil einer digitalen Welt mit immer immersiveren Erfahrungen, sowohl im beruflichen als auch im privaten Kontext. Digitale Zwillinge und Künstliche Intelligenzen erlauben die Nachbildung und Optimierung der Realität im digitalen Raum und entkoppeln dabei die digitale Welt oftmals von den realen Gegebenheiten. Auf diesem Weg bewirkt die Digitalisierung zudem konkrete ökologische Externalitäten, zum Beispiel in Form steigender Energiebedarfe für die Erstellung und Nutzung digitaler Anwendungen oder durch den Rohstoffbedarf sowie das steigende Abfallaufkommen aufgrund der notwendigen Hardware.

Im Gegensatz dazu steht bei der Transformation zur ökologischen Nachhaltigkeit die Bewahrung des Natürlichen im Vordergrund. Es geht insbesondere um die Nutzung von regenerativen Ressourcen ohne Beeinträchtigung der Natur und – viel mehr noch – um gesteigerten Naturschutz. Die Folgen des menschengemachten Klimawandels sollen abgemildert, idealerweise sogar revidiert werden. Im Idealfall würden sich die externen Kosten der Umweltnutzung in den Marktpreisen widerspiegeln: Dies würde aufgrund der Signalwirkung der (durch die Bepreisung der Externalitäten korrigierten) Marktpreise zu einer nachhaltigen Ressourcennutzung führen und gleichzeitig die Diffusion von digitalen Technologien für die Nachhaltigkeit begünstigen. Aktuell fehlt zur Verwirklichung dieser erfolgversprechenden politischen Strategie jedoch der politische Rückhalt, insbesondere auf globaler Ebene.

Dies birgt aus nationaler Perspektive die Gefahr, dass Produktion und somit Wertschöpfung ins Ausland verlagert werden, um von den dort zum Teil weitaus weniger strengen Umweltstandards zu profitieren. Mit Blick auf die globale Nachhaltigkeit ist dies ebenfalls nachteilig, denn Umweltmaßnahmen und -auswirkungen können mittlerweile nicht mehr lokal betrachtet werden, sondern erfordern eine überregionale, am besten globale Perspektive: Es geht allem voran um die Bewahrung der planetaren Tragfähigkeit. Daher ist es umso wichtiger, vor Ort die Vorzüge marktwirtschaftlicher Mechanismen beim Streben nach nachhaltigen Lösungen zu demonstrieren und so für deren Umsetzung im größeren Rahmen zu werben.

Um in einer modernen Wohlstandsgesellschaft die Fähigkeit zur Sicherung materiellen Wohlstands zu bewahren, gilt es folglich, die beiden prägenden Aspekte unserer Zeit zusammenzudenken: Nachhaltigkeit ist die Voraussetzung, um die Lebensgrundlagen dauerhaft zu erhalten, während Digitalisierung auch in einer komplexen, wachsenden Gesellschaft Teilhabe und Wohlstand für alle ermöglichen kann. Es bedarf einer stärkeren „Digitainability“ – also der Verschränkung von Digitalisierung (Digitalisation) mit Nachhaltigkeit (Sustainability) zur Maximierung der jeweiligen Vorteile. Dieses Bild der gegenseitigen Befähigung findet sich im Kleinen sowohl im digitalen als auch im natürlichen Bereich vielfältig wieder: So erkennt beispielsweise KI die notwendige Begleitflora in der Landwirtschaft zur Erhaltung der Artenvielfalt; das Nervensystem dient als strukturelles Vorbild für künstliche neuronale Netze in modernen KI-Anwendungen.

Digitainability kann im Kleinen wie im Großen Marktchancen für den Wirtschaftsstandort Deutschland schaffen – aber nur dann, wenn wir diese symbiotische Beziehung verstehen und das Zusammenwirken der beiden Trends stetig verbessern. Dafür müssen zentrale Fragen beantwortet werden: Wie bemisst man den Effekt von Digitalisierung auf die Nachhaltigkeit? Welche digitalen Lösungen, die die ökologische Nachhaltigkeit stärken, sind aktuell schon am Markt verfügbar? Wie kann Digitalisierung nachhaltig genutzt werden? Wie stark können Marktmechanismen und die Verbreitung digitaler Technologien auf den Märkten dazu beitragen, dass die Digitalisierung ihre Nachhaltigkeitspotenziale entfaltet? Welche Rahmenbedingungen sind hierzu erforderlich?

An diesem Punkt setzt die vorliegende Publikation an. Sie schafft eine Evidenzbasis zur Verschränkung von Digitalisierung und ökologischer Nachhaltigkeit in der deutschen Wirtschaft. Dazu werden in einer Marktstudie verfügbare digital-nachhaltige Lösungen in deutschen Leitsektoren analysiert, sowohl



deren Verbreitung als auch deren positiver Umwelteinfluss im jeweiligen Bereich beschrieben und schließlich ihr ökonomisches Wertschöpfungspotenzial quantifiziert. Dabei beschränkt sich die vorliegende Analyse nicht auf den Status quo, sondern zeigt auch Entwicklungspotenziale für die Zukunft auf und definiert Gestaltungsoptionen, die diese Potenziale zu erschließen versprechen.

Diese Studie soll als Initialzündung dienen. Sie beschränkt sich auf ökologische Nachhaltigkeit sowie bestimmte Sektoren. Eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsperspektive sollte bei der Betrachtung von Digitainability in Zukunft vermehrt in den Fokus rücken. Dann kann eine symbiotische Beziehung ent-

stehen, in der die Digitalisierung die notwendigen Werkzeuge zur Umsetzung von zugleich ökonomischer, ökologischer und sozialer Nachhaltigkeit bereitstellt, während diese Dimensionen der Nachhaltigkeit gemeinsam die Leitlinien für die Entwicklung digitaler Technologien vorgeben. Darin liegt eine Marktchance für den deutschen Wirtschaftsstandort – wir sollten sie nutzen!

Prof. Dr. Christoph M. Schmidt
acatech Vizepräsident

Projekt

Projektleitung

Prof. Dr. Dr. h. c. Christoph M. Schmidt, RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung/acatech

Expertinnen und Experten

- Seda Akinci, acatech Geschäftsstelle
- Dr. Severin Beucker, Borderstep Institut
- Maik Böres, BMW Group
- Laura Echternacht, fTRACE GmbH
- Dr. Jasmin Friedrich, Porsche Consulting GmbH
- Prof. Philipp Goltermann, Drees & Sommer
- Lisa-Maria Homagk, Quantum Immobilien Kapitalverwaltungsgesellschaft mbH
- Prof. Dr. Holger Kohl, Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik
- Prof. Dr. Gisela Lanza, Karlsruhe Institut für Technologie/acatech
- Prof. Dr. Friedemann Mattern, ETH Zürich/acatech
- Prof. Dr. Christoph Meinel, Hasso-Plattner-Institut/acatech
- Prof. Dr. Tilman Santarius, TU Berlin
- Prof. Dr.-Ing. André Wagenführ, TU Dresden/acatech
- Prof. Dr. Stefan Wurster, TU München

Autorenteam

- Jan Biehler, acatech Geschäftsstelle
- Dr. Jochen Dehio, RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung
- Dr. Paul Grünke, acatech Geschäftsstelle
- Ronald Janßen-Timmen, RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung
- Dr. Stephan Ramesohl, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
- Dr. Michael Rothgang, RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung
- Dr. Thomas Steiner, acatech Geschäftsstelle

Mitwirkende

- Nicole Dridiger, RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung
- Alyssa Gunnemann, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
- Emilia Henze, acatech Geschäftsstelle
- Lisa Kruse, RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung
- Julia Steidle, acatech Geschäftsstelle

Projektkoordination

- Jan Biehler, acatech Geschäftsstelle
- Dr. Anna Frey, acatech Geschäftsstelle

Projektlaufzeit

08/2022–05/2023

Förderung

Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.



Zusammenfassung

Deutschland wird mit dem aktuellen Kurs seine selbst gesetzten Klimaziele – eine Emissionsreduktion um 65 Prozent bis zum Jahr 2030 im Vergleich zu 1990 und die vollständige Treibhausgasneutralität bis 2045 – nicht erreichen; zusätzliche Maßnahmen sind zwingend erforderlich. Dabei kann die Digitalisierung ein zentraler Ansatzpunkt sein, da sie dazu beiträgt, Wirtschaftswachstum von den daraus entstehenden negativen ökologischen Folgen zu entkoppeln. Hierfür müssen Digitalisierung und ökologische Nachhaltigkeit zusammen gedacht werden – diese Anforderung wird im Konzept der Digitainability konkretisiert. Ihr stehen allerdings mehrere Probleme im Weg: die unzureichende digitale Infrastruktur und Verfügbarkeit von digitalen Technologien, ein mangelndes Bewusstsein für digitale, ökologisch nachhaltige Lösungen aufseiten der Unternehmen, speziell bei kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU), sowie der häufig weiterhin bestehende Widerspruch zwischen ökonomischen Anreizen und ökologischer Nachhaltigkeit. Zudem wird die ökologische Nachhaltigkeit nur selten bei öffentlichen Förderinitiativen im Bereich der Digitalisierung berücksichtigt.

Die vorliegende acatech STUDIE gibt einen Überblick über aktuell verfügbare digitale Lösungen mit positiven Auswirkungen auf die ökologische Nachhaltigkeit. Dabei nimmt sie insgesamt acht Leitsektoren der deutschen Wirtschaft beziehungsweise Sektoren mit starkem Umwelteinfluss in den Blick:

- Landwirtschaft
- Wasserwirtschaft
- Produktion
- Elektrotechnik und Maschinenbau
- Grundstoffe, Chemie und Pharma
- Verkehr und Logistik
- Bau- und Immobilienwirtschaft
- Informations- und Kommunikationstechnik

Mit einer ökonomischen sowie einer ökologischen Marktanalyse wird untersucht, welche auf digitalen Technologien basierenden Lösungen (Produkte und Services) zur Verfügung stehen, um die ökologische Nachhaltigkeit zu fördern.

Sektorübergreifend nutzen bereits mehr als die Hälfte der Unternehmen digitale Lösungen, um ökologisch nachhaltige Wertschöpfung zu betreiben; insbesondere solche Lösungen, die auf digitalen Technologien basieren, welche unter dem Industrie 4.0-Paradigma stärkere Verbreitung erfahren (Internet of

Things, cyber-physische Systeme, moderne Kommunikationstechnologien), sind dabei im Einsatz. Allerdings dienen diese Lösungen vor allem der Effizienzsteigerung – positive Auswirkungen auf den Ressourcen- und Energieverbrauch entstehen meist nur als Nebeneffekt. Entsprechend ist der Einsatz digitaler Technologien aktuell vor allem ökonomisch und weniger ökologisch motiviert. Durch geeignete Anreizstrukturen besteht bis 2030 das Potenzial, dass mehr als 75 Prozent der Unternehmen digitale Lösungen für eine ökologisch nachhaltige Wertschöpfung einsetzen, wobei gleichzeitig erhebliche Umweltkosten und Energievorleistungen eingespart werden können.

Werden dieser Status quo und die Potenziale der digitalen nachhaltigen Lösungen betrachtet, so können im Zusammenspiel mit den Ergebnissen aus Experteninterviews Gestaltungsoptionen für den Ausbau von Digitainability in der deutschen Wirtschaft entwickelt werden, um ökologische Nachhaltigkeit nicht nur durch Effizienz, sondern auch durch Effektivitätssteigerung zu stärken. Dazu müssen digitale Technologien an sich umweltschonender gestaltet werden, indem zum Beispiel Energieeffizienz bei der Softwareentwicklung gemessen und miteinbezogen oder die Hardware hinsichtlich Reparaturfähigkeit und Nutzungsdauer verbessert wird. Gleichzeitig müssen Nutzung und Verbreitung digitaler Technologien aktiv gefördert werden, ohne beim Streben nach ökologischem Mehrwert durch Digitalisierung Rebound-Effekte auszulösen.

Wichtig ist der Ausbau von Plattformlösungen und ökonomischen Anreizen zur Implementierung einer Circular Economy, um über reine Effizienzsteigerungen hinaus einen ökologischen Mehrwert durch digitale Anwendungen zu erzielen und zusätzlich die Nutzerinnen und Nutzer beziehungsweise Kundinnen und Kunden in nachhaltige Geschäftsmodelle miteinzubeziehen. Dazu werden genauere und umfassendere Metriken zur ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbewertung sowie eine bessere Nachverfolgbarkeit von Produkten entlang der Wertschöpfungskette benötigt, zum Beispiel mittels eines digitalen Produktpasses. Auf Basis dieser erweiterten Datengrundlage könnten, neben einer angepassten CO₂-Bepreisung, weitere Umweltindikatoren genutzt werden, um ökonomische Anreize für ökologische Nachhaltigkeit zu schaffen. Gleichzeitig sind mehr Freiheiten in der Regulatorik vonnöten, um neue Konzepte in diesem Bereich zu testen, etwa im Rahmen einer regulatorischen Sandbox oder durch Reallabore. Basierend auf dieser symbiotischen Verschränkung von Digitalisierung und ökologischer Nachhaltigkeit sollte in Zukunft auch die Auswirkung von Digitalisierung auf die soziale Nachhaltigkeit betrachtet werden, um zukünftig durch Digitalisierung die Nachhaltigkeit ganzheitlich zu fördern.

1 Einleitung

Der Expertenrat für Klimafragen zieht in seinem Zweijahresgutachten von 2022 zu bisherigen Entwicklungen der Treibhausgasemissionen, zu Trends der Jahresemissionen und zur Wirksamkeit von Maßnahmen Ende 2022 ein klares Fazit: Deutschland wird mit dem aktuellen Kurs seine selbst gesetzten Klimaziele – eine Emissionsreduktion um 65 Prozent bis zum Jahr 2030 im Vergleich zu 1990 und die vollständige Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 – nicht erreichen.¹ Gleichzeitig verdeutlichen Klimakatastrophen im globalen und nationalen Kontext das Erfordernis, alle möglichen Hebel zu nutzen, um die Einhaltung der ökologischen planetaren Grenzen nachhaltig sicherzustellen. Das muss jedoch gelingen, ohne entlang des Transformationsweges die wirtschaftliche Prosperität zu schwächen.

Die Digitalisierung kann dabei ein wesentlicher Hebel sein, der nicht nur in allen relevanten Industriesektoren Möglichkeiten zur Senkung der Treibhausgasemissionen bietet; sie kann zudem den Energie- und Rohstoffverbrauch positiv beeinflussen und zugleich neue Wertschöpfungspotenziale ermöglichen. Digitalisierung ist ein Werkzeug, um das Wirtschaftswachstum von negativen ökologischen Auswirkungen zu entkoppeln, indem durch den Einsatz digitaler Technologien die Produktions- und Ressourceneffizienz gesteigert und Geschäftsmodelle digital substituiert werden oder gar neu entstehen (digitale Nachhaltigkeit).^{2,3} Dafür bedarf es einer Minderung des negativen ökologischen Nachhaltigkeitseinflusses digitaler Technologien (nachhaltige Digitalisierung), insbesondere hinsichtlich möglicher Rebound-Effekte durch attraktivere Nutzungsmöglichkeiten, des hohen Energiebedarfs von Softwarelösungen sowie des Ressourcenbedarfs digitaler Hardware.⁴

Daher sind Digitalisierung und die ökologische Nachhaltigkeit strategisch zusammenzudenken. Nur so wird es gelingen, die Potenziale digitaler Technologien für die ökologische Nachhaltigkeit umfassend auszuschöpfen: Es gilt daher, die deutsche Wirtschaft dabei zu unterstützen, Digitainability⁵ als

Handlungsmaxime für ökologische Nachhaltigkeit sowie Digitalisierung zu begreifen und damit als Wertschöpfungsmotor zu nutzen.

Grundvoraussetzungen für diesen Erfolg sind die weitreichende Anwendung digitaler Technologien und das Angebot von Produkten und (Smart) Services, die auf digitalen Technologien basieren und sich positiv auf die ökologische Nachhaltigkeit auswirken. Deutsche Unternehmen haben hier allerdings Nachholbedarf – dies zeigt der Digital Economy and Society Index der Europäischen Kommission, in dem Deutschland im Bereich der Integration von Digitaltechnik durch Unternehmen Platz 16 von 27 belegt.⁶ Mit ihrer Digital- und Nachhaltigkeitsstrategie und weiteren Initiativen (zum Beispiel KI-Strategie der Bundesregierung, Aktionsplan Natürlich.Digital.Nachhaltig des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), De.Digital des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Greentech-Förderrahmen von BMWK und BMBF) fördert die Bundesregierung digitale Initiativen, die ökologische Nachhaltigkeit teilweise berücksichtigen. Allerdings folgen diese Initiativen bislang noch keiner gemeinsamen strategischen Linie. Zudem mangelt es an konkreten (Förder-) Instrumenten, die Anreize zur Anwendung nachhaltigkeitssteigernder digitaler Technologien bieten.⁷ Und obwohl einige Unternehmen die Notwendigkeit erkannt haben, im Einklang mit den Environmental-, Social- und Governance-Kriterien zu handeln, werden Digitalisierung und Nachhaltigkeit meist nicht gemeinsam gedacht.

Neben der mangelnden Verbreitung digitaler Technologien fehlt deutschen Unternehmen teilweise aber auch die Möglichkeit oder die Bereitschaft, diese im Sinne der ökologischen Nachhaltigkeit zu nutzen: So verfügt nur jedes zweite Unternehmen in Deutschland über die notwendigen Kompetenzen zum nachhaltigen Wirtschaften.⁸ Eine Studie des Bundeswirtschaftsministeriums von 2020 zeigt, dass die für den Wettbewerbserfolg der Unternehmen entscheidenden ökonomischen Aspekte nach wie vor das wirtschaftliche Handeln bestimmen, ökologische Anforderungen hingegen nur bedingt. Diese Anforderungen stehen teilweise sogar im Widerspruch zum ökonomischen Erfolg, zum Beispiel durch den gesteigerten

1 | Vgl. ERK 2022.

2 | Vgl. Santarius 2020.

3 | Vgl. Ramesohl et al. 2021.

4 | Vgl. TU Berlin 2022.

5 | Der Begriff „Digitainability“ wurde 2017 geprägt und ist ein Kofferwort aus Digitalisation und Sustainability, um diese beiden Konzepte zusammenzudenken; vgl. Gupta 2022.

6 | Vgl. DESI 2022.

7 | Vgl. Öko-Institut e. V. 2021.

8 | Vgl. TCS 2021.



administrativen Aufwand infolge der erweiterten Datenerfassung und -verarbeitung. So ergeben sich Probleme bei der Integration von IT-Systemen entlang der Wertschöpfungskette und bei der Virtualisierung von Vermögenswerten.⁹ Speziell KMU denken Digitalisierung und Nachhaltigkeit bislang selten zusammen, digitale Projekte scheitern zudem teilweise an fehlenden finanziellen Ressourcen.¹⁰ Der ökonomische Wert und die Möglichkeiten des Einsatzes digitaler Technologien für Unternehmen zur Steigerung ihrer ökologischen Nachhaltigkeit werden zu selten deutlich.¹¹

Dies zeigt: Digitainability ist aktuell noch kein strategisches Paradigma in der deutschen Wirtschaft, auch wenn das Bewusstsein dafür wächst. Damit Unternehmen digitale Lösungen als Vehikel zur Stärkung ihrer ökologischen Nachhaltigkeit strategisch wahrnehmen und einsetzen, bedarf es zuvor einer praxisnahen Strukturierung und Ordnung des Interaktionsfelds. Folgende Aspekte sind hierfür von Relevanz:

- Überblick über aktuell verfügbare digitale Lösungen, die die ökologische Nachhaltigkeit stärken, und Identifikation konkreter Umweltindikatoren, die das Ausmaß dieser Wirkung erfassen könnten.
- Einschätzung über den Grad der tatsächlichen Nutzung digitaler nachhaltigkeitssteigernder Lösungen in der deutschen Wirtschaft.
- Quantifizierung des ökonomischen Wertschöpfungspotenzials, das mit dem Einsatz digitaler Lösungen zur Steigerung ökologischer Nachhaltigkeit verbunden ist.

- Konkrete Gestaltungsoptionen für Entscheidungstragende in Politik und Wirtschaft, wie eine verstärkte Nutzung digitaler Lösungen für ökologische Nachhaltigkeit umsetzbar ist.

Die vorliegende acatech STUDIE hat das Ziel, das Interaktionsfeld entlang dieser Aspekte zu strukturieren: Deshalb wird für ein ausgewähltes Set an digitalen Technologien, Umweltindikatoren und Sektoren mittels einer **ökologischen Marktanalyse** evaluiert, welche auf digitalen Technologien basierenden Lösungen (Produkte und Services) in der deutschen Wirtschaft verfügbar sind, die zu mehr ökologischer Nachhaltigkeit in den Sektoren beitragen. Zudem erfolgt eine **ökonomische Marktanalyse** (Analyse der Wertschöpfungspotenziale, Umweltkosten-Einsparungsmöglichkeiten und Marktpotenziale) digital-nachhaltigen Wirtschaftens. Auf dieser Basis können sich Unternehmen strategisch orientieren, in welchen Sektoren, mit welchen Lösungen und bezogen auf welche Umweltindikatoren Chancen für die Vertiefung oder Entwicklung ökologisch nachhaltiger Geschäftsfelder bestehen.

Aufbauend auf diesen Marktanalysen sowie auf Interviews mit Expertinnen und Experten werden **Gestaltungsoptionen** für Politik und Wirtschaft ausgearbeitet, wie die Verfügbarkeit entsprechender Lösungen ausgeweitet, entlang welcher Nachhaltigkeits- und Wertschöpfungshebel die Entwicklung weiterer digitaler Lösungen fokussiert und wie Digitalisierung und Nachhaltigkeit in ein anwendungsnahes, symbiotisches Verhältnis überführt werden können.

9 | Vgl. BMWi 2020.

10 | Vgl. acatech 2022.

11 | Vgl. Gupta 2022.

2 Methodik

Die Studie setzt sich aus einer ökologischen sowie einer ökonomischen Marktanalyse und der Identifizierung von Gestaltungs-

tungsoptionen zusammen (siehe Abbildung 1): Die ökologische Marktanalyse wurde vom Wuppertal Institut und acatech, die ökonomische Marktanalyse vom RWI – Leibniz Institut für Wirtschaftsforschung erarbeitet. Beide Studienteile basieren auf einer einheitlichen, gemeinsam entwickelten Konzeptionalisierung, die auch die Identifizierung der Gestaltungsoptionen ermöglicht.



Abbildung 1: Übersicht zu den Teilaspekten der Studie inklusive der jeweils behandelten Fragestellungen und Methodik (Quelle: eigene Darstellung)

2.1 Konzeptionalisierung

Zur Strukturierung des Interaktionsfelds Digitainability wurde eine Auswahl von zu betrachtenden Sektoren, Umweltindikatoren, digitalen Technologien sowie Nachhaltigkeitshebeln getroffen (siehe Abbildung 2). Dieser Selektionsrahmen determiniert die Studie und erlaubt die Ableitung aussagekräftiger Schlussfolgerungen.

Nach dem Verständnis dieser Studie besteht das Ziel ökologischer Nachhaltigkeit darin, die planetaren Grenzen zu wahren und so auch für zukünftige Generationen einen sicheren Handlungsraum zu garantieren. Die Sustainable Development Goals (SDGs) der UN bilden für diese acatech STUDIE den Referenzrahmen für die Auswahl der Umweltindikatoren, um den Einfluss der betrachteten Leitsektoren auf ökologische Nachhaltigkeit zu messen. Für die ökologische Nachhaltigkeit sind insbesondere die SDGs 8 (Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaft), 9 (Industrie, Innovation und Infrastruktur), 12 (Nachhaltiger Konsum und nachhaltige Produktion) sowie 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz) relevant. Hieraus werden nach dem Vorbild

der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie acht Indikatoren abgeleitet, die die Erfüllung der Nachhaltigkeitsziele messbar machen.

Acht Sektoren stehen im Fokus der Studie. Diese Sektoren beinhalten einerseits Branchen, deren negativer Einfluss auf ökologische Nachhaltigkeit besonders hoch ist, sowie andererseits Branchen, die für die Erstellung oder Anwendung von Lösungen auf Basis digitaler Schlüsseltechnologien zentral sind, wie zum Beispiel Branchen der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT).¹² Definition und Zuordnung der Branchen zu den Sektoren erfolgten anhand der Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008.¹³ Einige Branchengruppen wurden aufgrund ihrer strukturellen Ähnlichkeit im Nachhaltigkeitskontext in einem Sektor zusammengefasst.¹⁴

Die betrachteten digitalen Technologien in dieser Studie wurden aus dem Technologie- und Trendradar¹⁵ des BMWK identifiziert – entweder weil sie ökologische Nachhaltigkeit positiv zu beeinflussen versprechen oder weil sie aufgrund ihres Verbreitungsgrads eine hohe Relevanz für die deutsche Wirtschaft besitzen.

12 | Die Energiewirtschaft wurde in dieser Studie nicht betrachtet.

13 | Vgl. Statistisches Bundesamt 2008.

14 | Die Zuordnung einzelner Branchen ist auf der Projektwebsite unter <https://www.acatech.de/projekt/digitainability-marktpotenziale-und-strategische-implikationen-digitaler-technologien-fuer-oekologisch-nachhaltiges-wirtschaften/> verfügbar.

15 | Vgl. BMWi 2021.

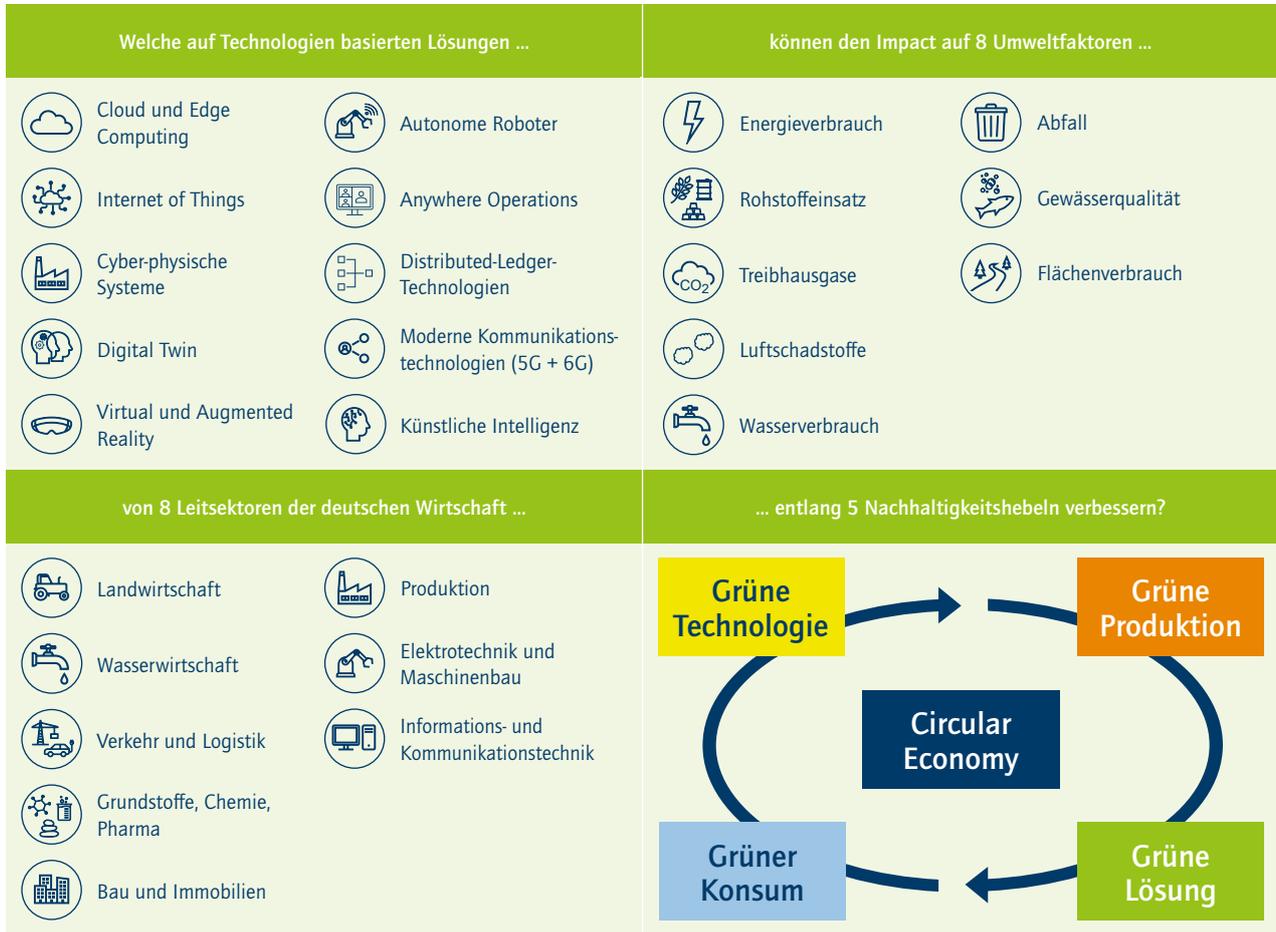


Abbildung 2: Grundfrage der vorliegenden Studie sowie Übersicht zu den betrachteten Technologien, Umweltfaktoren, Wirtschaftssektoren und Nachhaltigkeitshebeln (Quelle: eigene Darstellung)

Diese digitalen Technologien sind „Suchraster“ für die mit dieser Studie identifizierten digitalen Lösungen. Anders ausgedrückt: Jede der in dieser Studie gelisteten digitalen Lösungen basiert auf mindestens einer der genannten digitalen Technologien, häufig auch auf einer Kombination mehrerer Technologien.

Um zu verdeutlichen, an welchen Punkten digitale Lösungen ansetzen, um die ökologische Nachhaltigkeit eines Sektors zu stärken, wurden fünf Nachhaltigkeitshebel entlang der Wertschöpfungskette festgelegt:

1. **Grüne Technologie** – die Entwicklung einer auf einer digitalen Technologie oder einem digitalen Technologiemix basierenden Lösung: Hierbei werden Prozesse bewertet, die zur einsatzfähigen Erzeugung digitaler Technologien nötig sind. Eine durch Prozessverbesserungen erzeugte Reduktion des Umwelteinflusses und Steigerung des Wertschöpfungspotenzials von Informations- und Kommunikationstechnik(IKT)-Produkten (beispielsweise energieeffizienterer KI-Algorithmus) wird in der Regel dem IKT-Sektor zugerechnet.

2. **Grüne Produktion** – die Anwendung einer auf einer digitalen Technologie oder einem digitalen Technologiemix basierenden Lösung in Prozessen zur Erzeugung anderer Lösungen: Hierbei werden notwendige Prozesse zur marktfähigen Fertigstellung von Produkten/Services bewertet. Eine durch einen technologiebasierten Lösungseinsatz erzeugte Reduktion des Umwelteinflusses wird in der Regel der Branche zugerechnet, in der diese Produkte/Services eingesetzt werden (zum Beispiel KI-basierte Prozessverbesserung in der Automobilproduktion der Branche Automobilproduktion im Sektor Produktion).
3. **Grüne Lösung** – die Anwendung einer auf einer digitalen Technologie oder einem digitalen Technologiemix basierenden Lösung in einem Endprodukt: Hierbei werden Endprodukte/Services bewertet, deren Umwelteinfluss durch die Integration technologiebasierter Lösungen reduziert wird (zum Beispiel digitales Motormanagement im effizienten Pkw). Eine solche Reduktion des Umwelteinflusses wird in der Regel der Branche zugerechnet, in der die technologiebasierten Lösungen als Teil des Endprodukts/Services eingesetzt werden (hier der Branche Automobilproduktion im Sektor Produktion).
4. **Grüne Nutzung** – die Nutzung digitaler Lösungen zur Reduktion des Umweltverbrauchs durch Nutzende in privaten wie gewerblichen Anwendungen: Hierbei werden Lösungen bewertet, die nicht an sich ökologisch nachhaltig sind, aber zu einer Änderung des Konsumverhaltens in Richtung einer Reduktion des Umwelteinflusses führen (wie Mobility-as-a-Service-Lösungen zur Reduktion privater Kraftfahrzeugnutzung). Eine solche Reduktion des Umwelteinflusses wird in der Regel dem Sektor zugerechnet, in dem die angestoßene Veränderung des Konsumverhaltens zu einem reduzierten Umwelteinfluss führt (hier der Branche Personenverkehr im Sektor Verkehr und Logistik).
5. **Circular Economy** – der Einsatz digitaler Lösungen zur Stärkung eines Rohstoffkreislaufs in Produkterzeugung und -nutzung zur Reduktion der Umweltbelastung und Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Ressourcenverbrauch (Beispiele siehe Infokasten Digitale Lösungen für die Circular Economy): Hierbei werden digitale Lösungen bewertet, die die Wiederverwendbarkeit und Langlebigkeit von Produkten und Services im Sinne einer Kreislaufwirtschaft stärken. Eine solche Reduktion des Umwelteinflusses wird in der Regel dem Sektor zugerechnet, in dem die durch die digitale Lösung angestoßene kreislauforientiertere Wirtschaftsweise zu einem reduzierten Umwelteinfluss führt (wie beim Remanufacturing im Maschinenbau).

Digitale Lösungen für die Circular Economy

Digitale Lösungen ermöglichen die Funktionalität zirkulären Wirtschaftens entlang des gesamten Produktkreislaufs.

Produktdesign: Circular Economy muss bereits in der Designphase von Produkten mitgedacht werden (Design for Circularity). So können beispielsweise Sensoren in Produkte integriert werden, die Echtzeitinformationen über die Produkte während ihrer Lebenszeit übermitteln und so eine präventive Wartung oder Reparatur ermöglichen.

Transparenz: Digitale Lösungen ermöglichen einen transparenten und kollaborativen Austausch relevanter Informationen und Daten über die gesamte Lieferkette hinweg, beispielsweise durch digitale Produktpässe oder andere auf Distributed-Ledger-Technologien basierende Lösungen und ermöglichen so die Förderung nachhaltiger Kaufentscheidungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

Operationalisierung zirkulärer Geschäftsmodelle: Digitale Lösungen schaffen die Möglichkeit für neue Geschäftsmodelle in einer Circular Economy. Durch die Bereitstellung und effiziente Übertragung von Daten und Informationen auf Basis von Technologien wie Internet of Things, Digitaler Zwilling oder Distributed-Ledger-Technologien schaffen sie Werte, die in einem zirkulären Wirtschaftssystem für neue Produkte oder Services genutzt werden können.

Produktlebenszeit: Digitale Lösungen, die Daten von Produkten während der Lebenszeit dokumentieren und in Echtzeit auswerten, können dazu genutzt werden, die Lebenszeit der Produkte zu verlängern, die Produkte während der Nutzung in höchster Qualität zu halten, die Entwicklung neuer Produkte zu optimieren sowie Material- und Energiekreisläufe zu schließen.

Recycling: Eine gute Dokumentation und Zugang zu den Daten aus Produktdesign und dem Lebenszyklus des Produkts ermöglichen einen effizienteren Recyclingprozess. Zusätzlich können digitale Lösungen genutzt werden, um die Materialerkennung und -sortierung im Recyclingprozess zu vereinfachen und zu optimieren.



Die enge Orientierung an den fünf Nachhaltigkeitshebeln soll Evidenz dahingehend schaffen, (1) wie Nachhaltigkeitspotenziale sektorspezifisch zwischen Effizienzsteigerung („doing the things right“) und Effektivitätssteigerung („doing the right things“) in der Wertschöpfung verteilt sind und (2) welche Hebel im Wertschöpfungsprozess eine signifikante Reduktion des sektoralen Umwelteinflusses versprechen könnten.

Jeder Sektor wurde in Vorbereitung der Marktstudien, also der Identifikation der digitalen Lösungen und der Quantifizierung des Wertschöpfungspotenzials, im Hinblick auf seinen Umwelteinfluss, seine Nachhaltigkeitshebel sowie Technologiepotenziale charakterisiert. Diese Sektorenprofile wurden durch Experteninterviews sowie Sekundärdatenanalyse erarbeitet und beinhalten verschiedene interdependente Aspekte:

- Umwelteinfluss: Bewertung des negativen Einflusses des Sektors auf die betrachteten Umweltindikatoren (siehe Abbildung 2 rechts oben) zur Identifizierung der wichtigsten Umweltindikatoren für diesen Sektor.
- Nachhaltigkeitshebel: Identifizierung der wichtigsten Nachhaltigkeitshebel pro Sektor gemäß ihrem Umwelteinfluss (zum Beispiel zirkuläre Wirtschaftsweise in der Produktion anstelle rein linearer Produkterstellung, Vermeidung von Mobilität in Verkehr und Logistik).
- Technologische Enabler: Identifizierung der wichtigsten Technologien aus dem Technologienset der Studie (siehe Abbildung 2 links oben), die – eingesetzt in digitalen Lösungen pro Sektor – den jeweiligen Umwelteinfluss vielversprechend reduzieren könnten.

Über diese Sektorenprofile wurde das Interaktionsfeld zwischen sektorspezifischem Umwelteinfluss und sektorspezifischen Hebelwirkungen der betrachteten digitalen Technologien geordnet: Sie bilden damit die Grundlage für die vertiefte Potenzialanalyse digitaler Lösungen sowohl hinsichtlich ihrer ökologischen Nachhaltigkeit als auch bezüglich ihrer ökonomischen Wertschöpfung.

2.2 Ökologische Marktanalyse

Entlang der Sektorenprofile und der hier als besonders relevant identifizierten Umweltindikatoren, digitalen Technologien, Nachhaltigkeitshebel und Betrachtungspunkte wurden in jedem betrachteten Sektor auf einer digitalen Technologie oder einem

digitalen Technologiemix basierende Lösungen identifiziert, die zur Stärkung der ökologischen Nachhaltigkeit beitragen. Dies bildet die Grundlage für die qualitative Auswertung des sektoralen ökologischen Nachhaltigkeitspotenzials durch die nachhaltige Nutzung digitaler Lösungen.

Die qualitative Auswertung der ökologischen Nachhaltigkeitspotenziale spezifischer digitaler Lösungen basierte je Sektor auf vier Schritten: explorative Recherche, Erfassung und Strukturierung der digitalen Lösungen, spezifische Erweiterung der Recherche und zusammenfassende Bewertung der ökologischen Potenziale.

Auf Basis des internen Fachwissens und erfolgter Vorarbeiten wurden relevante generische digitale Technologien ausgewählt und darauf aufbauende digitale Lösungen für die sektoralen Anwendungsfälle abgeleitet. Durch eine explorative Internetrecherche wurden zwei Suchrichtungen (Technologien beziehungsweise Sektoren) abgebildet und ein Überblick über bereits genutzte und in Forschungsprojekten diskutierte Kombinationen von Technologien gewonnen. Im nächsten Schritt wurden diese durch interne Expertise validiert und zu prototypischen digitalen Lösungen zusammengefasst und strukturiert. Basierend auf dieser Liste konnte die Internetrecherche durch praktische Anwendungsfälle, Forschungsprojekte und vereinzelte quantitative Analysen ökologischer Potenziale erweitert und spezifisch nachrecherchiert werden.

Zuletzt wurde jede digitale Lösung auf Grundlage der Rechercheergebnisse zu ihrem ökologischen Potenzial qualitativ bewertet. Neben einer Beschreibung und Verordnung der im Projekt definierten Nachhaltigkeitshebel entlang der Wertschöpfungskette wird die ökologische Wirkung der Lösung anhand von Nachhaltigkeitsindikatoren in vier Kategorien eingeteilt. Im Sinne der Aufgabenstellung einer qualitativen Bewertung und angesichts der großen Streuung der quantitativen Angaben in der Sekundärliteratur konnte dazu keine konsistente Quantifizierung vorgenommen werden, sondern es wurde eine interne Expertenschätzung für indikative Mittelwerte als Orientierungsgröße getroffen. Abhängig vom jeweiligen Indikator wird das ökologische Potenzial der digitalen Lösung kategorisiert und so einer niedrigen (0 bis 10 Prozent), mittleren (11 bis 30 Prozent) oder hohen (> 30 Prozent) Wirkung zugeordnet. Darüber hinaus kann eine digitale Lösung als übergeordneter Enabler wirken und somit eine notwendige und unterstützende Voraussetzung für den Einsatz digitaler

Lösungen in unterschiedlichsten Sektoren und Anwendungsfällen darstellen.

Da die Auswertung auf Sekundärliteratur beruht, liegt die Limitation dieses methodischen Ansatzes in der Verfügbarkeit von Ergebnissen zu den quantifizierten Nachhaltigkeitspotenzialen digitaler Lösungen. Dabei ist hervorzuheben, dass die quantifizierten Nachhaltigkeitspotenziale nur die Zahlen eines spezifischen praktischen Anwendungsfalls widerspiegeln und dadurch ein fallspezifisches Potenzial aufzeigen, das sich in der Skalierung unterschiedlich entwickeln kann (linear, exponentiell etc.).

Losgelöst von den konkreten digitalen Lösungen wurden für die Sektoren im Rahmen einer Szenarioanalyse (siehe auch Kapitel 2.3) Umweltkosten berechnet, die durch den Einsatz digitaler Technologien reduziert werden können. Diese bezeichnen die für den jeweiligen Sektor internalisierten Kosten, die durch Vermeidung, Beseitigung, Verwertung und Überwachung von Umweltbelastungen und Beanspruchung der Umwelt verursacht werden. Sie sind damit ein quantitativer Maßstab dahingehend, inwiefern die Steigerung ökologischer Nachhaltigkeit auch direkte positive Effekte auf die Kostenstruktur in der Wirtschaft haben kann.

2.3 Ökonomische Marktanalyse

Ausgangspunkt der ökonomischen Marktanalyse war die Berechnung der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)-Vorleistungen pro Sektor als quantitatives Maß für die Nutzung digitaler Technologien; damit sind die unmittelbar im Produktionsprozess für diesen Bereich aufgewandten Betriebsmittel gemeint. Diese Zahlen erfassen dabei das Güteraufkommen im Inland sowie durch Einfuhr und zeichnen entsprechend ein vollständiges Bild zur Nutzung der Technologien im Status quo.

Die darauf aufbauende Quantifizierung des sektorspezifischen ökonomischen Wertschöpfungspotenzials eines ökologisch nachhaltigeren Wirtschaftens durch die Nutzung von digitalen Technologien erfolgte sowohl wertschöpfungs- als auch kostenbasiert. Dabei standen drei Dimensionen der Auswirkungen von IKT-Technologien im Vordergrund (siehe Abbildung 3): (1) die quantitative Betrachtung der Verbreitung von IKT mit dem Ziel einer nachhaltigen Wirtschaftsweise (IKT-Diffusion), (2) die Quantifizierung der dabei möglichen betrieblichen Kostenein-

sparungen und Einsparungen an volkswirtschaftlichen Umweltkosten (Umweltkosteneinsparung) und, wo dies möglich war, (3) die Abschätzung des Marktpotenzials IKT-basierter ökologischer Produkte (Marktabschätzung). Alle drei Untersuchungsbausteine betreffend wurde jeweils eine Bestandsaufnahme des Status quo vorgenommen. Darauf basierend wurde nach möglichen Entwicklungen bis zum Jahr 2030 gefragt: Einem wahrscheinlichen Fall bei konstanten Rahmenbedingungen (Likely Case) wurde eine Situation bei günstigen Rahmenbedingungen (Best Case) und eine Entwicklung bei ungünstigen Bedingungen (Worst Case) gegenübergestellt.

Bei der Abschätzung der Diffusion von IKT für nachhaltige Lösungen (Untersuchungsbaustein 1) wurde zunächst für jeden Sektor in einer Status-quo-Analyse die preisbereinigte Bruttowertschöpfung im Jahr 2020 ermittelt. Darauf aufbauend wurde auf Basis existierender Studien quantifiziert, inwieweit bereits zum Einsatz kommende digitale Technologien die ökologische Nachhaltigkeit stärken. Bei den produzierenden Sektoren stand dabei die IKT in Form des Einsatzes von Industrie 4.0 im Mittelpunkt – unter Industrie 4.0 wird die vernetzte Anwendung digitaler Technologien (wie additive Fertigung, Augmented Reality oder Internet-of-Things-Plattformen) im Rahmen der Produktion verstanden. Eine breitere Abgrenzung digitaler Technologien lag demgegenüber den Untersuchungen für die Land- und Wasserwirtschaft zugrunde, bei denen naturgemäß Industrie 4.0 als produktionsorientiertes Konzept eine geringere Rolle spielt. Für eine Szenarioanalyse wurde die zu erwartende preisbereinigte Bruttowertschöpfung im Jahr 2030 berechnet. Auf Basis unterschiedlicher Zukunftsannahmen zur Verbreitung digitaler Technologien wurde dabei jeweils ein Likely Case, ein Worst Case sowie ein Best Case entwickelt, mit deren Hilfe die Verbreitung digitaler Technologien, die die ökologische Nachhaltigkeit stärken, anhand der Bruttowertschöpfung abgeschätzt wurde.

Auf der Kostenseite wurde der energetische Vorleistungsaufwand für den Status quo im Jahr 2019¹⁶ betrachtet und dessen Einsparpotenzial durch digitale Technologien im Rahmen einer Szenarioanalyse bis zum Jahr 2030 ökonomisch quantifiziert (Untersuchungsbaustein 2). Bei der Untersuchung der Input-Seite stand die Analyse der Branchenverflechtung basierend auf einer Input-Output-Analyse im Mittelpunkt. Mit deren Hilfe wurde gezeigt, in welchem Umfang Informations- und Kommunikationstechnik in die verschiedenen Branchen eingehen und welche Bedeutung folglich digitale Technologien für diese

16 | Dieses Jahr wurde gewählt, weil für diese Auswertung die Daten der aktuellen Input-Output-Tabellen des Statistischen Bundesamtes für das Jahr 2019 genutzt wurden.



haben, gemessen am branchenspezifischen Produktionswert. Für die verschiedenen Szenarien wurden basierend auf den Input-Output-Betrachtungen jeweils die ökonomischen Einsparpotenziale für die nachhaltige Nutzung digitaler Technologien ermittelt.



Abbildung 3: Untersuchungsbausteine der ökonomischen Marktanalyse (Quelle: eigene Darstellung)

Neben dieser marktbezogenen Vorgehensweise wurde aus einer anderen Perspektive auch nach dem Einsparpotenzial beim Ressourceneinsatz durch die Nutzung digitaler Technologien gefragt (Umweltkosten). Für die erwartete Entwicklung der Umweltkosten im Jahr 2030 wurde der Energieverbrauch für leichtes Heizöl, Gase, Braun- und Steinkohle sowie Strom zugrunde gelegt, wobei der rohstoffliche (nicht-energetische) Einsatz dieser Ressourcen in der chemischen Industrie unberücksichtigt blieb. Diese Energieträger werden vorwiegend in industriellen Verbrennungsprozessen beziehungsweise bei Strom für Antriebs- und Steuerungszwecke und damit in jenen Prozessen genutzt, deren Nachhaltigkeit durch den Einsatz von digitalen Technologien gesteigert werden soll.

Die Quantifizierung des sektorspezifischen Marktpotenzials (Untersuchungsbaustein 3) setzte an der Identifizierung sektorspezifischer Chancenprofile an. Es wurde untersucht, welche der in einer Branche angebotenen Produkte basierend auf

dem Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik ökologisch nachhaltige Lösungen beinhalten. Diese Angebote wurden für die betrachteten Branchen identifiziert. Basis waren (a) die gegenwärtige Wertschöpfung in den betrachteten Branchen, (b) Einschätzungen aus existierenden Studien zur Nutzung digitaler Technologien für die Nachhaltigkeit und (c) Bewertungen aus den Expertengesprächen. Bei der Szenarientwicklung wurde darüber hinaus für die Entwicklung eines Basisszenarios auf zeitreihenanalytische ökonomische Verfahren zurückgegriffen.

In Bezug auf die IKT-Nutzung wurden methodische Erweiterungen vorgenommen, die auf den zuvor beschriebenen Berechnungen für die verschiedenen Szenarien aufsetzen. So wurden die Energieeinsparung und das ökologische Potenzial im Zusammenhang mit Green IT für die verschiedenen Szenarien durch eine Prognose des Stromverbrauchs der IKT-Hardwarenutzung und der damit korrespondierenden Umweltkosten abgeschätzt. Eine auch künftig besonders im Fokus stehende Anwendung von IKT hängt mit einem vermehrten Homeoffice zusammen, das ohne einen intensiven IKT-Einsatz gar nicht denkbar wäre. Die Potenziale einer weiteren Ausweitung des Homeoffice kommen in direkten Kosteneinsparungen für das in geringerem Maße erforderliche Pendeln, in Zeitersparnissen (gemessen durch Opportunitätskosten) und in sinkenden Umweltkosten zum Ausdruck.

Eine branchenübergreifende Auswirkung der Digitalisierung betrifft die vermehrte Etablierung der Kreislaufwirtschaft. Hierzu erfolgte zunächst eine Prognose der Umsatz- und Wertschöpfungsentwicklung der Kreislaufwirtschaft für die verschiedenen Szenarien im Jahr 2030. Mithilfe einer Schätzung der Umsatzanteile der Kreislaufwirtschaft, für die die Digitalisierung künftig eine besondere Bedeutung haben dürfte, konnte das zu erwartende Marktpotenzial ermittelt werden, das sich für digitale Anwendungen und daraus resultierende Potenziale im Hinblick auf mehr Nachhaltigkeit besonders eignet.

Die Untersuchung ist mit einigen Limitationen verbunden: Während insbesondere Studien von Bitkom bereits ein aktuelles Bild über die Verbreitung digitaler Technologien und deren Bezug zur Nachhaltigkeit zeichnen, besteht hinsichtlich der genaueren Wiedergabe dieses zentralen Aspekts im Hinblick auf den Technologieeinsatz noch erheblicher Forschungsbedarf, was eine noch genauere Abbildung des Geschehens in der Breite der Wirtschaft betrifft. Aufseiten des Einsparpotenzials durch den Einsatz digitaler Technologien wurden lediglich energetische Ressourcen betrachtet, wobei an bestimmten Stellen

Begrenzungen hinsichtlich der Datenverfügbarkeit bestanden.¹⁷ Letztere betreffen auch die Verbindung von ökologischer und ökonomischer Marktanalyse, die aufgrund der schwierigen Quantifizierbarkeit der ökonomischen Wertschöpfungspotenziale digitaler Lösungen begrenzt ist. Die ökonomische Marktanalyse fokussiert deshalb stärker den Einfluss digitaler Technologien auf die sektorale nachhaltige Wertschöpfung, während die ökologische Marktanalyse einen konkreteren Blick auf einzelne Lösungen wagt. Zusammengefasst entsteht so aber immerhin ein komplementierendes Bild zu Stand und Potenzialen von Digitainability in der deutschen Wirtschaft.

2.4 Identifizierung von Gestaltungsoptionen

Ausgehend von der Zusammenführung der Evidenzen aus der Marktstudie erfolgte die Identifizierung von Gestaltungsoptionen. Für ihre Strukturierung wurden aus der Marktstudie drei Handlungsfelder identifiziert, die für eine umfassende Stärkung von Digitainability bearbeitet werden sollten:

- Effizienzsteigerungen: Einsatz digitaler Lösungen, um bestehende Prozesse, Technologien und Produkte ökologisch nachhaltiger zu gestalten.
- Effektivitätssteigerungen: Unterstützender Einsatz digitaler Lösungen, um grundsätzliche Anpassungen des Nutzungsverhaltens und der Wirtschaftsweise zur Stärkung ökologischer Nachhaltigkeit anzustoßen.

- Rahmenbedingungen: Notwendige Anpassungen, um eine strategische gemeinsame Betrachtung ökologischer Nachhaltigkeit und Digitalisierung weitreichend zu ermöglichen.

Entlang dieser Handlungsfelder wurden anschließend semi-strukturierte Interviews mit Expertinnen und Experten aus den Technik- und Umweltwissenschaften sowie Anwenderinnen und Anwendern aus den betrachteten Sektoren geführt. Im Rahmen dieser Interviews wurden Gestaltungsoptionen dahingehend evaluiert, wie der intersektorale Transfer bestehender digitaler Lösungen gestärkt und Hemmnisse zur Nutzung der Wertschöpfungs- und Nachhaltigkeitspotenziale abgebaut werden können. Zudem wurde diskutiert, auf welche Weise die Beachtung ökologischer Nachhaltigkeit und die Nutzung digitaler Technologien für die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle zusammengeführt werden können und welche Rolle die verschiedenen Akteure im Wirtschaftssystem für eine erfolgreiche, digital unterstützte Nachhaltigkeitstransformation übernehmen sollten.

Aus diesen Diskussionen wurden Gestaltungsoptionen in den drei Handlungsfeldern abgeleitet und formuliert. Diese Gestaltungsoptionen beruhen somit sowohl auf der empirischen Evidenz der ökonomischen und ökologischen Marktanalyse als auch auf der qualitativen Einschätzung der Expertinnen und Experten. Sie wurden adressatenspezifisch formuliert (siehe Tabelle 1) und entlang der genannten Handlungsfelder strukturiert (siehe Kapitel 4).

17 | Die Rohdaten zur ökonomischen und ökologischen Marktanalyse sind auf der Projektwebsite unter <https://www.acatech.de/projekt/digitainability-marktpotenziale-und-strategische-implikationen-digitaler-technologien-fuer-oekologisch-nachhaltiges-wirtschaften/> verfügbar.



3 Status quo und Potenziale digitaler Lösungen für ökologische Nachhaltigkeit in der deutschen Wirtschaft

Ausgehend von der vorgestellten Methodik werden im Folgenden die Ergebnisse der ökonomischen und ökologischen Studie präsentiert. Dies beinhaltet neben der Vorstellung der je Sektor wichtigsten verfügbaren digitalen Lösungen die Zusammenfassung der ökonomischen Status-quo- und Potenzialanalyse für 2030 sowie die Zusammenfassung von Chancen und Herausforderungen einer vertieften Anwendung digitaler Lösungen. Die Vorstellung erfolgt zunächst sektorspezifisch, bevor anschließend entlang der betrachteten digitalen Technologien und der auf ihnen basierenden digitalen Lösungen ein sektorübergreifender Vergleich gezogen wird.

3.1 Wichtigste Lösungsgruppen

Die Ausführungen beschränken sich aufgrund der schier Masse an verfügbaren digitalen Lösungen, die die ökologische Nachhaltigkeit stärken, auf eine Überblicksdarstellung. Die ökologische Marktanalyse zeigt, dass sich digitale Lösungen trotz ihrer teils großen technologischen Diversität mit Ausnahmen weniger sektorspezifischer Anwendungen in zehn Lösungsgruppen eingliedern lassen, mit jeweils unterschiedlichen Effekten auf die Umweltindikatoren:

- Datenökosystem: Ein System aus verschiedenen Akteuren, Diensten und Anwendungen (Software), in dem Daten genutzt werden, um sie ökonomisch oder gesellschaftlich zu verwerten.
- Datenanalyse und Tools zur Systemmodellierung und strategischen Planung: Nutzung statistischer Methoden zur Analyse von Unternehmensdaten als Basis für die digitale Abbildung der Prozesse in einem Modell, woraus technische und betriebswirtschaftliche Systeme gestaltbar sind.
- „Grüne“ Enterprise-Resource-Planning(ERP)-Systeme: Verwaltungssystem zur Bereitstellung von notwendigen Funktionen zur Unternehmensführung (Finanzen, Personalwesen, Fertigung, Logistik, Services, Beschaffung, etc.), das das Unternehmen intern hinsichtlich der Nachhaltigkeit optimiert, zum Beispiel durch reduzierten Materialverbrauch, optimierte Maschinenausnutzung oder papierlosen Belegtransfer.
- Digitaler Zwilling: Ein Konzept, mit dem zum Beispiel Produkte sowie Maschinen, Komponenten und Infrastrukturen mithilfe digitaler Werkzeuge virtualisiert modelliert werden, einschließlich sämtlicher Geometrie-, Kinematik- und Logikdaten. Ein digitaler Zwilling ist das Abbild eines physischen Assets und erlaubt dessen Simulation, Steuerung und Verbesserung.
- Digitaler Produktpass: Ein Datensatz, der die Komponenten, Materialien und chemischen Substanzen oder auch Informationen zu Reparierbarkeit, Ersatzteilen oder fachgerechter Entsorgung für ein Produkt zusammenfasst.
- Integrierte und vernetzte Maschinen- und Anlagensteuerung: Verbund aus informations- und softwaretechnischen Komponenten, die mithilfe von Sensoren Daten erfassen, diese mittels eingebetteter Systeme auswerten und mit anderen Maschinen beziehungsweise Datenquellen austauschen.
- Virtuelles Produktdesign und Entwicklung sowie virtuelle Schulung und Wartung: Produktdesign auf Basis von Simulationen zum Beispiel bezüglich physikalischer Prozesse, Vibrationen, Materialien etc. beziehungsweise Durchführung von Wartungs- oder Schulungsmaßnahmen auf Basis von 3D-Simulationen, zum Beispiel von Produktionsmaschinen oder Fahrzeugen.
- Datenbasierte Optimierung zum Beispiel von Lagerhaltung und Logistik: Nutzung von Prozessmessdaten für den Entwurf und die Analyse von regelungstechnischen Systemen ohne die Verwendung eines expliziten Prozessmodells und A-priori-Annahmen zur direkten Online-Implementierbarkeit in Prozesse.
- Sustainable Procurement: Eine nachhaltige Beschaffung von Gütern, wobei Anforderungen, Spezifikationen und Kriterien über die gesamte anhängende Wertschöpfungskette ausgewertet werden, die mit dem Schutz der Umwelt und dem sozialen Fortschritt vereinbar sind und die wirtschaftliche Entwicklung fördern, insbesondere Ressourceneffizienz, Verbesserung der Produktqualität und Kostenoptimierung.
- Smart Energy Supply und Management: Die Nutzung intelligenter Technologien bei der Energieerzeugung, Energiespeicherung, Stromübertragung und Verbrauchssteuerung.



Status quo und Potenziale digitaler Lösungen

Abbildung 4: Schematischer Überblick über das Verhältnis digitaler Technologien, digitaler Lösungen und digitaler Lösungsgruppen (Quelle: eigene Darstellung)

In dieser Studie dienen die Lösungsgruppen als Basis für die folgende überblicksartige Vorstellung der sektorspezifischen Analyseergebnisse. Dies vereinfacht die Auswertung, ermöglicht eine Vergleichbarkeit zwischen den Sektoren und erlaubt es, Technologien und Anwendungsfelder mit Ausbaupotenzial zu identifizieren.

Eingesetzte Technologien in den Lösungsgruppen lassen sich nämlich über die in Lösungsgruppen kulminierten digitalen Lösungen wieder ermitteln (zum Verhältnis von Lösungsgruppen, Lösungen und Technologien siehe Abbildung 4).



Granulare Informationen zum ökologischen Nachhaltigkeits-impact und zur Verfügbarkeit digitaler Lösungen pro Sektor finden sich ergänzend im mit dieser Studie veröffentlichten Digitainability Slide Deck sowie in den frei zugänglichen Rohdaten der ökologischen Marktanalyse.¹⁸

3.2 Ergebnisse der ökologischen und ökonomischen Marktanalyse

Die im Fokus stehenden Sektoren beeinflussen die betrachteten Umweltindikatoren auf unterschiedliche Weise (siehe Ab-

bildung 5). Dies geht mit divergierenden Dringlichkeiten pro Sektor für die Reduzierung des negativen Einflusses auf die ökologische Nachhaltigkeit einher.

Dem ist inhärent, dass digitale Lösungen, die die ökologische Nachhaltigkeit stärken, je nach Sektor – bisher und auch in Zukunft – einen unterschiedlichen Verteilungsgrad haben, allein schon nachfragebedingt. Hinzu kommen weitere sektorspezifische Hürden oder Gelingensbedingungen für die Verbreitung digitaler Lösungen, sodass sektorabhängig ein unterschiedliches Bild hinsichtlich der Verfügbarkeit entsprechender Lösungen sowie ihrer ökonomischen Wertschöpfungs- und Einsparungspotenziale entsteht.

Sektor	Energieverbrauch	Rohstoffeinsatz	Treibhausgase	Luftschadstoffe	Wasserverbrauch	Abfall	Gewässerqualität	Flächenverbrauch
Landwirtschaft	niedrig	mittel	hoch	hoch	mittel	niedrig	hoch	hoch
Wasserwirtschaft	mittel	niedrig	niedrig	niedrig	hoch	niedrig	niedrig	niedrig
Verkehr und Logistik	hoch	mittel	hoch	hoch	niedrig	mittel	mittel	hoch
Grundstoffe, Chemie, Pharma	hoch	hoch	mittel	niedrig	hoch	niedrig	hoch	mittel
Bau und Immobilien	hoch	mittel	niedrig	niedrig	mittel	hoch	mittel	hoch
Produktion	hoch	hoch	hoch	mittel	niedrig	mittel	mittel	mittel
Elektrotechnik und Maschinenbau	hoch	hoch	mittel	mittel	niedrig	mittel	mittel	mittel
Informations- und Kommunikationstechnik	hoch	hoch	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig

Negativer Umwelteinfluss je Sektor: ■ hoch ■ mittel ■ niedrig

Status quo und Potenziale digitaler Lösungen

Abbildung 5: Überblick über tendenzielle negative Einflüsse auf betrachtete Umweltindikatoren pro Sektor (Quelle: eigene Darstellung)

18 | Die Rohdaten zur ökonomischen und ökologischen Marktanalyse und das Digitainability Slide Deck sind auf der Projektwebsite unter <https://www.acatech.de/projekt/digitainability-marktpotenziale-und-strategische-implikationen-digitaler-technologien-fuer-oekologisch-nachhaltiges-wirtschaften/> verfügbar.

3.2.1 Landwirtschaft

Die Landwirtschaft ist zwar, gemessen an der erzielten Wertschöpfung, mit 26,3 Milliarden Euro der kleinste in dieser Studie betrachtete Sektor; allerdings trägt er aufgrund der hohen Treibhausgasemissionen und Energieintensität (2020: 6,4 Terajoule pro eine Million Euro Bruttowertschöpfung, Prognose 2030: 8,8 Terajoule pro eine Million Euro Bruttowertschöpfung) sowie seines Einflusses auf die Gewässerqualität (unter anderem durch Düngemittel) in erheblichem Maße negativ zur Umweltbilanz der Wirtschaft bei. Gleichzeitig zielen in diesem Bereich – im Unterschied zu den meisten anderen Sektoren – viele digitale Lösungen bereits jetzt auf die Steigerung der ökologischen Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung ab, da sich diese hier direkt auf die Profitabilität auswirken. Sie haben dabei insbesondere Einfluss auf eine Reduzierung von Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Ressourceneinsatz sowie eine Reduktion des Wasser- und Flächenverbrauchs.

Aus technologischer Sicht sind in der Landwirtschaft, gerade über die verteilten und im Feld eingesetzten Systeme, vor allem moderne Kommunikationstechnologien, Cloud- und Edge-Computing sowie Big-Data-Ansätze zur Sammlung und Verarbeitung der entstehenden Datenmengen relevant. Teilweise wird in der Folge bereits KI zur Datenauswertung verwendet, und Sensoren beziehungsweise Maschinen arbeiten basierend auf Internet of Things und cyber-physischen Systemen zusammen. Distributed-Ledger-Technologien, Augmented Reality, Virtual Reality sowie Anywhere Operations finden hingegen aktuell kaum Anwendung im Bereich der Landwirtschaft.

Eingesetzte digitale Lösungen

Es existieren konkrete Lösungen mit großem Nachhaltigkeitspotenzial hinsichtlich der betrachteten Umweltindikatoren in den Lösungsgruppen digitaler Zwillinge, Tools für (Öko-)Systemmodellierung und strategische Planung, Ökosystem-Überwachung und Aqua-/Insect-Kulturen im Rahmen einer datenbasierten Optimierung sowie Smart-Energy-Supply- und Management-Systeme. Zusätzlich gibt es in den Lösungsgruppen Datenanalyse sowie integrierte und vernetzte Anlagensteuerung bereits Lösungen, deren Effekt sich vor allem im Energie- und Rohstoffverbrauch, in den Treibhausgasemissionen sowie in Verbesserungen der Gewässerqualität zeigt.

Use Case: Intelligente Feldrobotik für nachhaltige Landwirtschaft

Der KI-unterstützte Feldroboter aus dem Projekt NOcsPS ermöglicht eine autonome mechanische Unkrautentfernung ohne chemische Pflanzenschutzmittel. Der Roboter ist mit Kamera- und Lasersensoren ausgestattet und kann mithilfe von KI-Methoden Kultur- von Unkrautpflanzen unterscheiden. Die Bilddaten werden in Echtzeit im Roboter ausgewertet.

Die Unkrautentfernung ohne chemische Pflanzenschutzmittel erhält die Biodiversität sowie die Bodenfruchtbarkeit und vermeidet chemische Rückstände in den Nahrungsmitteln. Der Roboter wird rein elektrisch und mit regenerativem Strom betrieben, sodass im Betrieb keine klimaschädlichen Emissionen entstehen.¹⁹

Die Lösungen werden bereits in vielen Bereichen der Landwirtschaft unterstützend eingesetzt, fokussieren aber vor allem den Ackerbau und weniger die bezüglich Treibhausgasemissionen und Gewässerqualität sehr schädliche Tierhaltung. Im Ackerbau stechen insbesondere die Automatisierung von Kleinmaschinen (siehe Infokasten Use Case), die Routenoptimierung von Traktoren und das Monitoring der Anbauflächen hinsichtlich Bodenqualität sowie die Erstellung von digitalen Feldzwillingen hervor. Diese Lösungen, die auf verbesserte Anlagensteuerungen und Maschineneinsatz zielen, versprechen große Energieeffizienzpotenziale; Datenräume zur regionalen Vernetzung der Landwirtschaft integrieren auch Erzeuger über den Ackerbau hinaus. Entsprechende Ökosystemdienstleistungen bieten große Potenziale für die Freisetzung neuer Wertschöpfungspotenziale. Bezüglich der Tierhaltung existieren bereits Anwendungen zur datenbasierten Optimierung des Futtereinsatzes sowie zur Überwachung der Gesundheit und des Wohlbefindens der Tiere. Eine Substitution der Tierhaltung ist durch datenoptimiertes, in vitro gezüchtetes Fleisch möglich. Disruptives Potenzial – gerade zur Reduzierung des Flächenverbrauchs – bietet die gebäudeintegrierte Landwirtschaft, die in anderen Ländern (beispielsweise Singapur) schon weiterverbreitet ist. Im Sinne einer stärker zirkulär orientierten Landwirtschaft sind Initiativen für eine ökologische Rohstoffproduktion durch nachverfolgbare Lieferketten

19 | Vgl. NOcsPS 2023.



und regionale digitale Vertriebsplattformen (zum Beispiel Vertrieb von Gemüseboxen) oder Vernetzungsplattformen zur gemeinsamen Kompostierung hervorzuheben.

Es bestehen in der Landwirtschaft also primär branchenspezifische Lösungen, die mit wenigen Ausnahmen im Bereich Ernährung vor allem der **grünen Produktion** (siehe Kapitel 2.1) zugerechnet werden können und somit vor allem auf Effizienzsteigerungen hinsichtlich ökologischer Nachhaltigkeit und weniger auf Effektivitätssteigerungen durch angepasste Nutzung oder zirkuläre Wirtschaftsweisen abzielen. Hervorzuheben ist, dass diese Lösungen speziell auf Branchenbedarfe ausgerichtet sind und die Ressourcenschonung ein Hauptziel des Einsatzes digitaler Lösungen ist – da sie sowohl ökonomische Effizienzgewinne als auch ökologische Verbesserungen verspricht.

Ökonomisches Potenzial

Im Idealfall kann die Digitainability-Wertschöpfung in der Landwirtschaft bis 2030 um knapp 50 Prozent im Vergleich zu 2020 gesteigert werden: Entsprechend der großen Anwendungsbreite von digitalen Technologien in der Landwirtschaft

liegt die Steigerung eingesetzter Vorleistungen der Informations- und Kommunikationstechnologie in der Landwirtschaft von 2008 bis 2019 mit 8,0 Prozent pro Jahr deutlich über dem Durchschnitt der anderen Sektoren von jährlich 6,7 Prozent. Aufgrund der großen Anwendungsbreite der unterschiedlichen digitalen Lösungen besteht in der Landwirtschaft im besten Fall das Potenzial, dass bis 2030 96 Prozent der Unternehmen digitale Lösungen einsetzen (+22 Prozentpunkte zu 2020). Dadurch könnte eine ökologische Wertschöpfung, also der Einsatz digitaler Technologien für eine umweltschonende Produktion, von 24 Milliarden Euro in der Landwirtschaft erreicht werden (siehe Abbildung 6). Der konsequente Einsatz digitaler Technologien ermöglicht bei den Umweltkosten durch den Energieverbrauch in der Landwirtschaft bis 2030 im günstigsten Fall (Best Case) ein Einsparpotenzial von rund 204 Millionen Euro. Die Kosten für den Vorleistungsaufwand für Energie werden selbst im besten Fall gegenüber 2019 um 3,0 Prozent auf 2,3 Milliarden Euro steigen. Der Einsatz digitaler Lösungen zur Steigerung der Energieeffizienz wird also auch in Zukunft erfolgsentscheidend für die ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft sein.

Status quo auf einen Blick	
17,6 % Inl. Rohstoff- äquivalente (Anteil an Gesamt 2020)	8 % Feinstaub- emissionen (Anteil an Gesamt 2020)
6,4 TJ/Mio. € BWS* Energieintensität	51 Mio. € IKT-Vorleistungen

Kosten für Energie und Umwelt	
2,6 Mrd. € Kosten Energievorleistung (Likely Case 2030)	2,3 Mrd. € Kosten Energievorleistung (Best Case 2030)
+30 Mio. € Umweltkosten vs. 2019 (Likely Case 2030)	-204 Mio. € Umweltkosten vs. 2019 (Best Case 2030)

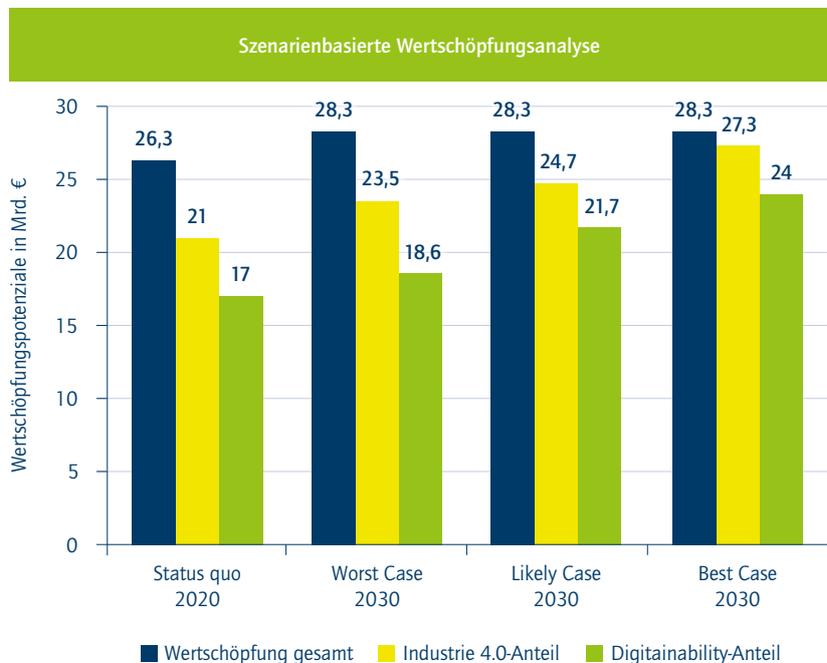


Abbildung 6: Zentrale Ergebnisse der ökonomischen Marktanalyse im Sektor Landwirtschaft; Abkürzungen: Inl. – Inländisch, TJ/Mio. € BWS – Terajoule pro eine Million Euro Bruttowertschöpfung, IKT – Informations- und Kommunikationstechnik (Quelle: eigene Darstellung)

Bezüglich des Einsatzes von vernetzten Systemen, insbesondere auf ausgedehnten Agrarflächen, fehlt teilweise noch die digitale Infrastruktur. Gleichzeitig sind die Möglichkeiten von digitalen Technologien in Bezug auf ökologische Nachhaltigkeit noch nicht branchenweit im Bewusstsein der Anwendenden verankert. Vor allem im Bereich der Tierhaltung besteht hier großes Potenzial, aber aktuell noch wenige digitale Lösungen. Digitalisierung könnte auch einen wesentlichen Beitrag zur Förderung der Direktvermarktung von lokalen landwirtschaftlichen Produkten (pflanzliche Erzeugnisse, Fleisch und Milch) an den Endverbraucher leisten: für Marketing und Kundenmanagement über den Ausbau digitaler Vertriebswege bis hin zu mehr Transparenz und Rückverfolgbarkeit landwirtschaftlicher Produkte.^{20,21} Aktuell mangelt es noch an Anreizstrukturen für ökologisches Wirtschaften und an digitalen Lösungen, die übergreifend auf Standards, Referenzarchitekturen sowie offenen Datenökosystemen basieren.

3.2.2 Wasserwirtschaft

Die Wasserwirtschaft erzielte im Jahr 2020 eine Wertschöpfung von 35,1 Milliarden Euro. Dieser Sektor zeichnet sich durch seine Schnittstellenfunktion aus, da er mit allen anderen Bereichen interagiert. Die wesentlichen negativen Umwelteinflüsse der Wasserwirtschaft sind ihr Wasser- sowie ihr Energieverbrauch. Im Sektorenvergleich existieren aktuell noch wenige explizit für diesen Sektor gedachte digitale Lösungen, die die ökologische Nachhaltigkeit stärken. Dabei handelt es sich vor allem um Methoden zur Datensammlung und -analyse sowie zur darauf basierenden Optimierung von Wasserkreisläufen (zum Beispiel in Form von autonomen Messgeräten für die Wasserqualität und anschließende Auswertung mittels einer Internet-of-Things-Plattform) sowie mit der Landwirtschaft verwandte digitale Lösungen.

Eingesetzte digitale Lösungen

Die eingesetzten Technologien zeigen deutliche Überschneidungen mit der Landwirtschaft, da auch hier Kommunikationstechnologien, KI, Big-Data-Ansätze sowie Cloud- und Edge-Computing im Vordergrund stehen. Zusätzlich werden Lösungen eingesetzt, die auf Internet of Things, cyber-physischen Systemen und autonomen Robotern basieren. Die in diesem Sektor angewandten digitalen Lösungen zielen bisher vor allem

auf Effizienzsteigerungen in der Wasseraufbereitung ab. Über Monitoring-Systeme in Verbindung mit Gamification-Ansätzen können aber auch Wasserverbraucher – Privatpersonen wie Unternehmen – zur Reduktion ihrer Wassernutzung angeregt werden. Erste Lösungen in diese Richtung bestehen ebenfalls, beispielsweise in Form von Verbrauchsapps. Stärker als in der Landwirtschaft setzen digitale Lösungen in der Wasserwirtschaft auch heute schon an Effektivitätshebeln an (qualitative Verbreitung über Nachhaltigkeitshebel), wenngleich die quantitative Konzentration digitaler Lösungen geringer ist als in der Landwirtschaft.

Durch die zu erwartende tiefergehende Verbreitung entsprechender digitaler Lösungen bestehen künftig Potenziale zur Steigerung der Gewässerqualität, zur Reduktion des Wasserverbrauchs und zur Senkung des Energieverbrauchs (2020: 219,8 Petajoule, Prognose 2030: 160,6 Petajoule). Letzteres könnte vor allem auf Basis einer deutlich gesteigerten Energieeffizienz mittels des Ausbaus der erwähnten digitalen Technologien erreicht werden. Die datenbasierte Optimierung von Bewässerung oder die autonome Messung der Pestizidbelastung im Abwasser zur Verbesserung der Düngestrategie sind erste vielversprechende Beispiele. Moderne Datenmanagementsysteme werden im Bereich der Wasserwirtschaft künftig eine wichtige Rolle spielen.

Ökonomisches Potenzial

Eine direkte Erfassung von Umsatz- und Wertschöpfungspotenzialen im Bereich der Wasserwirtschaft ist aufgrund der ungenügenden Datenlage nicht möglich. Der evidente Anstieg des Einsatzes von Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)-Vorleistungen zwischen 2008 und 2019 um jährlich 7,7 Prozent legt aber nahe, dass auch in der Wasserwirtschaft hohe Digitainability-Wertschöpfungspotenziale entstehen können. Im besten Fall würden sich die Umweltkosten (siehe Kapitel 2.2) in diesem Sektor bis 2030 um bis zu 506 Millionen Euro verringern (siehe Abbildung 7).²² Die Kosten für den Vorleistungsaufwand für Energie werden hingegen im wahrscheinlichen Fall von 1,5 Milliarden Euro im Jahr 2019 um 18 Prozent auf 1,8 Milliarden Euro 2030 ansteigen. Nur wenn die Energieeffizienz deutlich gesteigert werden kann, wäre im Bestfall eine Reduktion der entsprechenden Kosten um 29 Prozent gegenüber 2019 auf 1,2 Milliarden Euro im Jahr 2030 erreichbar.

20 | Vgl. TU Berlin 2022.

21 | Vgl. Bitkom 2022.

22 | Aufgrund der unzureichenden Datenlage ist für die Wasserwirtschaft die ökologische Wertschöpfung nicht abschätzbar und erlaubt dementsprechend auch keine Prognosen bis 2030.



Status quo auf einen Blick

219,8 PJ Energieverbrauch (2020)	9,0 Mrd. m ³ Jahresabwasser- menge (2020)
9,8 TJ/Mio. € BWS* Energieintensität	1,1 Mrd. € IKT-Vorleistungen

Voraussetzungen für Best Case

- Anpassung des Anreizsystems, um die hebbaren Nachhaltigkeitspotenziale nutzen zu können
- Verdoppelung der Wachstumsrate der Energieeffizienz auf 10,0 %
- Kosteneinsparpotenziale bei Strom und Gas/Erdöl/Kohle realisieren

Kosten für Energie und Umwelt (Mrd. €)

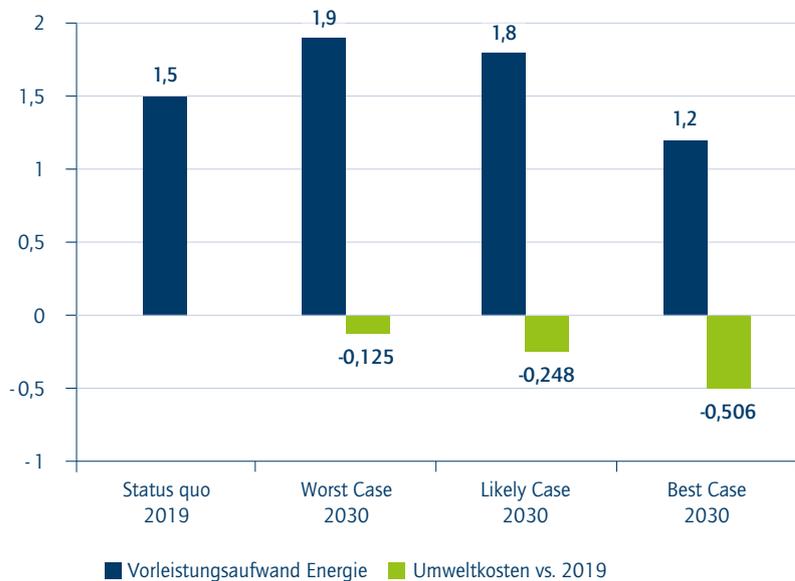


Abbildung 7: Zentrale Ergebnisse der ökonomischen Marktanalyse im Sektor Wasserwirtschaft; Abkürzungen: PJ – Petajoule, TJ/ Mio. € BWS – Terajoule pro eine Million Euro Bruttowertschöpfung, IKT – Informations- und Kommunikationstechnik (Quelle: eigene Darstellung)

Die Bedeutung einer vernetzten, intelligenten Wasserversorgung wird in Anbetracht der immer öfter beobachteten Wasserknappheit in bestimmten Regionen und der daraus entstehenden Verteilungskonflikte sowie der sich häufenden Dürren evident. In der Digitalisierung der Wasserwirtschaft – vor allem in einer verbesserten, idealerweise echtzeitfähigen Datenerfassung – liegen dementsprechend große Potenziale. Daraus würde sich eine verbesserte Trinkwasserbilanzierung in einem Versorgungsgebiet genauso ableiten lassen wie eine vorausschauende Wartung der Infrastruktur. Ein Mehrwert ergibt sich dabei vor allem durch die Auswertung geteilter Daten. Dem stehen die regulatorischen Herausforderungen zur Datenbereitstellung aufgrund der föderalen Datenerhebung sowie Richtlinien zum Datenschutz gegenüber. Gleichzeitig erlaubt eine verbesserte Digitalisierung in der Wasserwirtschaft eine engere Vernetzung mit dem in der Bau- und Immobilienwirtschaft genutzten Building Information Modeling, um zusätzliche Einsparungen beziehungsweise eine nachhaltigere Anbindung an die bestehende Wasserwirtschaft zu erzielen. Hier bestehen aktuell nur wenige konkrete Anwendungsfälle, die verdeutlichen, dass sich nachhaltigkeitssteigernde Investitionen in die Wasserwirtschaft (beispielsweise für die

notwendige Messinfrastruktur) langfristig auch ökonomisch amortisieren.^{23, 24, 25}

3.2.3 Verkehr und Logistik

Der Sektor Verkehr und Logistik erwirtschaftete 2020 eine Wertschöpfung von 120,7 Milliarden Euro. Mit einer Energieintensität von 10,7 Terajoule pro eine Million Euro Bruttowertschöpfung gehört er zu den energieintensivsten Sektoren. Signifikant negativ sind die hohen Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen des Sektors sowie der Flächenverbrauch, beispielsweise für Straßen und Schienen. Im Rahmen der vorliegenden Nachhaltigkeitsbetrachtung sind Verkehr und Logistik aufgrund der Schnittstellenfunktion zwischen mehreren Sektoren von besonderer Bedeutung. Es bestehen bereits einige digitale Lösungen zur Stärkung ökologischer Nachhaltigkeit, die nicht nur an Effizienz, sondern auch an Effektivitätshebeln der Nutzung (zum Beispiel Shared Mobility) ansetzen.

Aus technologischer Sicht werden im Verkehr- und Logistiksektor vor allem digitale Lösungen eingesetzt, die auf

23 | Vgl. DWA 2020.

24 | Vgl. DVGW 2023.

25 | Vgl. UBA 2022.

Kommunikationstechnologien, KI, Big-Data-Ansätzen sowie Cloud- und Edge-Computing basieren. Der Fokus liegt aktuell auf der Vernetzung und Routenoptimierung heterogener Mobilitätsteilnehmer. Internet-of-Things-basierte Lösungen finden insbesondere in der Logistik, aber auch im Hinblick auf das autonome Fahren Anwendung. Distributed-Ledger-Technologien, cyber-physische Systeme, Augmented und Virtual Reality finden bisher nur beschränkt Anwendung. Auf Anywhere Operations basierende Lösungen haben insbesondere während der COVID-19-Pandemie einen massiven Mobilitätsrückgang und damit eine Reduktion von Mobilitätsmissionen ermöglicht. Autonome Roboter finden aktuell ebenfalls eher beschränkt Anwendung, rücken aber immer mehr in den Fokus, insbesondere in der Automatisierung von Logistikprozessen.

Eingesetzte digitale Lösungen

Hinsichtlich der Lösungsgruppen zeigen vor allem digitale Zwillinge das Potenzial, den Energie- und Rohstoffverbrauch sowie die Treibhausgasemissionen des Sektors zu senken. Anwendungen im Bereich Datenökosysteme sowie Datenanalyse und Entscheidungsunterstützung wirken sich vor allem auf den Rohstoffverbrauch und damit die Treibhausgasemissionen aus. Integrierte Maschinen- und Anlagensteuerungen führen zu einer Reduktion von Energie- und Rohstoffverbrauch, während die datenbasierte Optimierung und Elektrifizierung von Fahrzeugen sowie Logistik die Reduktion von Energie- und Rohstoffverbrauch erlaubt. Digitale Produktpässe beeinflussen durch mehr Transparenz bei Kaufprozessen und durch die Ermöglichung effizienteren Recyclings vor allem den Rohstoffverbrauch, während sich durch die Anwendung von virtuellem Produktdesign oder Virtualisierung von Schulungen die Treibhausgasemissionen reduzieren lassen.

Konkrete Lösungen zielen auf die Verknüpfung von Mobilitätsteilnehmenden und -angeboten auf digitalen Plattformen zur nachhaltigen Routenoptimierung und zur Integration intelligenter Systeme in Verkehrs- beziehungsweise Logistiknetzwerke ab. Dies kann beispielsweise anhand von Verkehrsrechnern als Basis für Fahrvorschläge oder zur Routenoptimierung erfolgen. In strategisch-planerischer Perspektive können über KI-unterstützte vorausschauende Stadtplanung entlang digitaler Zwillinge by Design Umwelteinflüsse miteinbezogen werden; Gleiches gilt für die Logistikplanung innerhalb eines Holodecks. Virtualisierte Anwendungen, wie zum Beispiel virtuelle Schulungen von Flugbegleitern oder Helikopter-

pilotinnen, tragen zusätzlich direkt sowie indirekt zur Reduktion des Umwelteinflusses in diesem Sektor bei. Speziell im Logistikbereich sind zudem schon teilweise Prozessautomatisierungen, ähnlich wie in der Produktion, in Form einer automatischen Teilekommissionierung zu finden. Aus zirkulärer Perspektive können digitale Pfandsysteme für Produkte außerdem die Basis zur Nachverfolgbarkeit des daraus entstehenden Mülls bilden. Aus nutzungsorientierter Sicht ist das Angebot von Mobilitätsplattformen, die die verschiedenen Verkehrsteilnehmenden zur optimierten Mobilitätsnutzung verbinden, ein Schritt zur Förderung von grüner Nutzung durch digitale Technologien.

Ökonomisches Potenzial

Die Digitalisierung in Verkehr und Logistik ist im Sektorenvergleich bereits überdurchschnittlich ausgeprägt. Dies spiegelt sich auch in den IKT-Vorleistungen wider, die 2020 bei 4,0 Milliarden Euro lagen und bis 2030 um 7,3 Prozent jährlich steigen sollen. Aufgrund des ökonomischen Mehrwerts von Industrie 4.0 (insbesondere Effizienzsteigerungen durch Optimierung) finden diese bereits bei 95 Prozent der Unternehmen Anwendung, wobei 64 Prozent diese auch ökologisch nachhaltig nutzen. Entsprechend besteht in Verkehr und Logistik aktuell bereits eine nachhaltige Wertschöpfung in Höhe von 77 Milliarden Euro. Ausgehend davon wäre im Falle einer Steigerung der IKT-Vorleistungen um jährlich 4,5 Prozent eine nachhaltige Wertschöpfung von 135,2 Milliarden Euro im Jahr 2030 möglich (siehe Abbildung 8).

Die nachhaltige Nutzung von Digitalisierung in Verkehr und Logistik bietet also große Potenziale, wobei die positiven Umwelteffekte mit dem Grad der Vernetzung skalieren, sowohl im Verkehr als auch in der Logistik. Im Verkehr sollten dementsprechend nicht nur Fahrzeuge im Individualverkehr untereinander vernetzt, sondern idealerweise auch unterschiedliche Transportlösungen miteinander verbunden werden, zum Beispiel über Datenräume wie den Mobility Data Space. Speziell für den Individualverkehr spielt zusätzlich die Elektrifizierung eine wesentliche Rolle, wobei die Akkukapazität und darauf abgestimmte intelligente Ladevorgänge entscheidend sind. Im Bereich der Logistik können über die vernetzte Intralogistik hinaus Logistikzentren gebündelt und gleichzeitig mehr verteilte Lösungen integriert werden, um weitere Effizienzsteigerungen zu erreichen.



Status quo auf einen Blick	
14,5 % THG-Emissionen (Anteil an Gesamt 2020)	55,4 % Feinstaubemissionen (Anteil an Gesamt 2020)
10,7 TJ/Mio. € BWS* Energieintensität	4,0 Mrd. € IKT-Vorleistungen

Kosten für Energie und Umwelt	
16,9 Mrd. € Kosten Energievorleistung (Likely Case 2030)	14,3 Mrd. € Kosten Energievorleistung (Best Case 2030)
+2,135 Mrd. € Umweltkosten vs. 2019 (Likely Case 2030)	-0,592 Mrd. € Umweltkosten vs. 2019 (Best Case 2030)

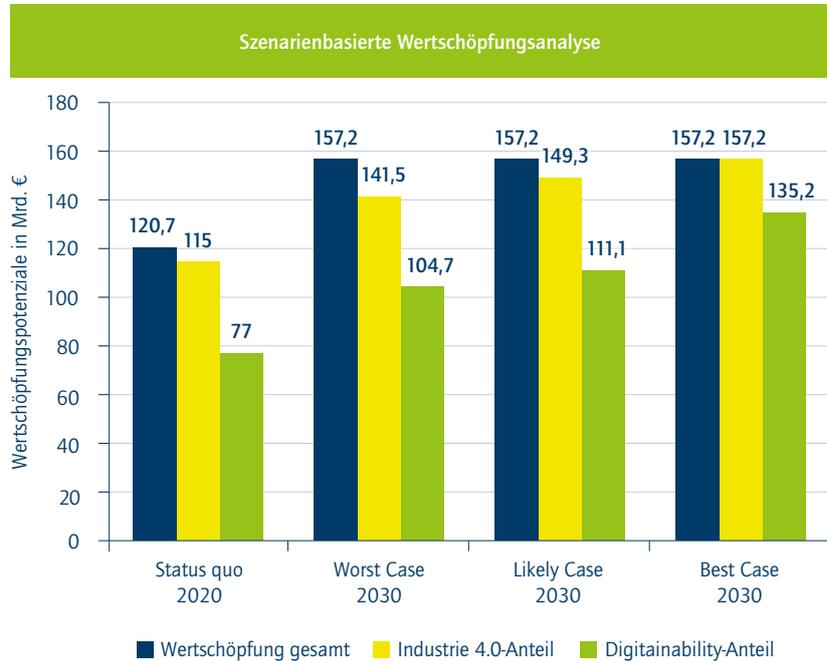


Abbildung 8: Zentrale Ergebnisse der ökonomischen Marktanalyse im Sektor Verkehr und Logistik; Abkürzungen: THG – Treibhausgas, TJ/Mio. € BWS – Terajoule pro eine Million Euro Bruttowertschöpfung, IKT – Information- und Kommunikationstechnik (Quelle: eigene Darstellung)

3.2.4 Grundstoffe, Chemie und Pharma

Die Branchen Chemie und Pharma erzielten 2020 eine Wertschöpfung in Höhe von 78,3 Milliarden Euro. Dabei zeigt der Sektor die mit Abstand höchste Energieintensität (25 Terajoule pro eine Million Euro Bruttowertschöpfung) unter den betrachteten Sektoren. Hinzu kommen ein sehr hoher Ressourceneinsatz insbesondere durch die Grundstoffbranche, ein hoher Wasserverbrauch, ein negativer Einfluss auf die Gewässerqualität und ein nicht unerheblicher Einfluss auf die Treibhausgasemissionen. Das Erfordernis zum Einsatz digitaler Lösungen zur Stärkung ökologischer Nachhaltigkeit ist also hoch, der Nutzungsgrad von Industrie 4.0-Anwendungen, die im Jahr 2020 in 58 Prozent der Chemie- und Pharmaunternehmen verbreitet waren,²⁶ liegt aber deutlich unter dem Nutzungsgrad beispielsweise in der Produktion. Wichtige verbreitete Lösungsgruppen zielen vor allem auf die Steigerung von Effizienz, weniger auf effektive Steigerungen ökologischer Nachhaltigkeit.

Hinsichtlich der technologischen Grundlagen spielen Kommunikationstechnologien, KI, Big-Data-Ansätze, Cloud- und Edge-Computing sowie cyber-physische Systeme eine zentrale Rolle, da es ähnlich wie in der Produktion auch in diesem Sektor vor allem um die verstärkte Datenerfassung und -auswertung geht, um eine Reduktion der Umwelteinflüsse durch Effizienzoptimierung zu ermöglichen. Eine untergeordnete, aber trotzdem wichtige Rolle spielen digitale Lösungen, die auf dem Internet-of-Things-Ansatz basieren. Autonome Roboter, Distributed-Ledger-Technologien, Virtual und Augmented Reality finden nur sehr vereinzelt Anwendung.

Eingesetzte digitale Lösungen

Bezogen auf die Lösungsgruppen können vor allem Anwendungen im Bereich Datenökosystem, Datenanalyse und Systemmodellierung, digitaler Produktpass, Sustainable Procurement und Recycling Information Loops dazu beitragen, den negativen Umwelteinfluss des Sektors zu reduzieren. Zusätzlich

26 | Aufgrund der unzureichenden Datenlage für die Branche Grundstoffe konnte die ökonomische Wertschöpfungspotenzialanalyse nur für die Branchen Chemie und Pharma zusammen betrachtet werden; die ökologische Marktanalyse umfasst aber auch die Grundstoffbranche.

senken der Einsatz digitaler Zwillinge und ein virtueller Entwicklungsansatz den Energie- und Rohstoffverbrauch sowie die Treibhausgasemissionen signifikant; ihre Verbreitung in diesem Sektor ist aber noch gering. Die integrierte Maschinen- und Anlagensteuerung sowie die datenbasierte Optimierung von Lagerhaltung und Logistik beeinflussen vor allem den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen, während sich die Effekte von Smart-Energy-Supply- und Management-Systemen vor allem im Energieverbrauch des Sektors zeigen.

Die verfügbaren digitalen Lösungen können vor allem zur Senkung des Energieverbrauchs, der Treibhausgasemissionen und des Ressourceneinsatzes beitragen. Bereits in der Anwendung befindliche digitale Lösungen konzentrieren sich auf Produktionsoptimierung und -überwachung auch im Hinblick auf die Nachhaltigkeit (zum Beispiel im Rahmen der Integration eines CO₂-Fußabdrucks für Produkte, digitaler Produktentwicklung durch Modellierung von Produktlinien oder allgemein digitaler Molekülentwicklung). Dem hohen Energiebedarf des Sektors wird beispielsweise mit Smart-Energy-Supply-Systemen zur Vorhersage von Lastspitzen und daraus folgend dem rechtzeitigen Einsatz von Batteriespeichern entgegengewirkt. Für eine Stärkung der Kreislaufwirtschaft existieren Lösungen zur Verbesserung der Recyclingeffizienz durch Produktnachverfolgung und Verwendung alternativer Rohstoffe und Rücksendeprogramme sowie Methoden zur Lösemittelrückgewinnung in der Chemiebranche. Insgesamt ist aber auch in den Branchen Grundstoffe, Chemie und Pharma eine Konzentration von Lösungen auf grüne Produktion zu beobachten, während verfügbare digitale Lösungen bisher kaum an Effektivitätshebeln ansetzen.

Ökonomisches Potenzial

Im Idealfall kann die Digitainability-Wertschöpfung in den Branchen Chemie und Pharma bis 2030 im Vergleich zu 2020 um mehr als zwei Drittel steigen. Trotz der im Vergleich durchschnittlichen Verbreitung von Industrie 4.0-Anwendungen liegen die Vorleistungen in der Informations- und Kommu-

nikationstechnik in den Bereichen Chemie und Pharma mit 0,8 Prozent des Produktionswerts deutlich unter dem Durchschnitt der hier betrachteten Sektoren von 1,9 Prozent. Gleichzeitig besteht aber auch das Potenzial, Industrie 4.0-Technologien bis 2030 bei bis zu 86 Prozent der Unternehmen zu etablieren und damit potenziell eine nachhaltige Wertschöpfung von 62 Milliarden Euro zu erzielen. Bezogen auf die Energie- und Umweltkosten ist nur im Bestfall ein signifikantes Einsparpotenzial gegenüber 2019 vorhanden. Bei einer Steigerung der Energieeffizienz um 60 Prozent gegenüber 2019 können Kosten für den Energievorleistungsaufwand um 26 Prozent gegenüber 2019 reduziert werden. Die Umweltkosten sinken nur im Bestfall, selbst im Normalfall ist eine Steigerung der Umweltkosten um fast 2 Milliarden Euro gegenüber 2019 zu erwarten (siehe Abbildung 9). Dies verdeutlicht den Handlungsdruck, die Verbreitung digitaler Technologien zur Stärkung ökologischer Nachhaltigkeit in diesen Branchen intensiv voranzutreiben.

Es wird deutlich, dass die Effizienzhebel in Pharma und Chemie schon stark ausgereizt werden, energieintensive Massenprozesse sind bereits optimiert. Hemmnisse für eine vertiefte Nutzung und für den Transfer von Lösungen liegen insbesondere darin, dass die Branchen Spezialchemie und Pharma äußerst heterogen strukturiert sind und sehr spezifische Produktionsanforderungen aufweisen. So entsteht ein hoher Individualisierungsbedarf für digitale Lösungen. Die Kreislaufwirtschaft ist im Sektor Grundstoffe, Chemie und Pharma also erfolgsentscheidend für die Stärkung ökologischer Nachhaltigkeit. So kann der hohe sektorale Energie- und Ressourcenbedarf signifikant reduziert werden. Dafür sind eine verbesserte Nachverfolgbarkeit entlang der Wertschöpfungskette sowie Transparenz entscheidend – vor allem, um die einzelnen Produktkomponenten nach der Nutzung trennen und recyceln zu können. Im Sinne eines Ökosystemansatzes sind zudem die mangelnde Standardisierung und der fehlende Einsatz von Referenzarchitekturen zu beanstanden, die für die Entstehung eines digitalen nachhaltigen Datenökosystems und für kollaborative Datennutzung notwendige Enabler sind.



Status quo auf einen Blick	
4,14 % THG- Emissionen (Anteil an Gesamt 2020)	15,5 % Wasser- bedarf (Anteil an Gesamt 2020)
25 TJ/Mio. € BWS* Energieintensität	1,5 Mrd. € IKT-Vorleistungen

Kosten für Energie und Umwelt	
10,2 Mrd. € Kosten Energievorleistung (Likely Case 2030)	8,0 Mrd. € Kosten Energievorleistung (Best Case 2030)
+2,010 Mrd. € Umweltkosten vs. 2019 (Likely Case 2030)	-2,979 Mrd. € Umweltkosten vs. 2019 (Best Case 2030)

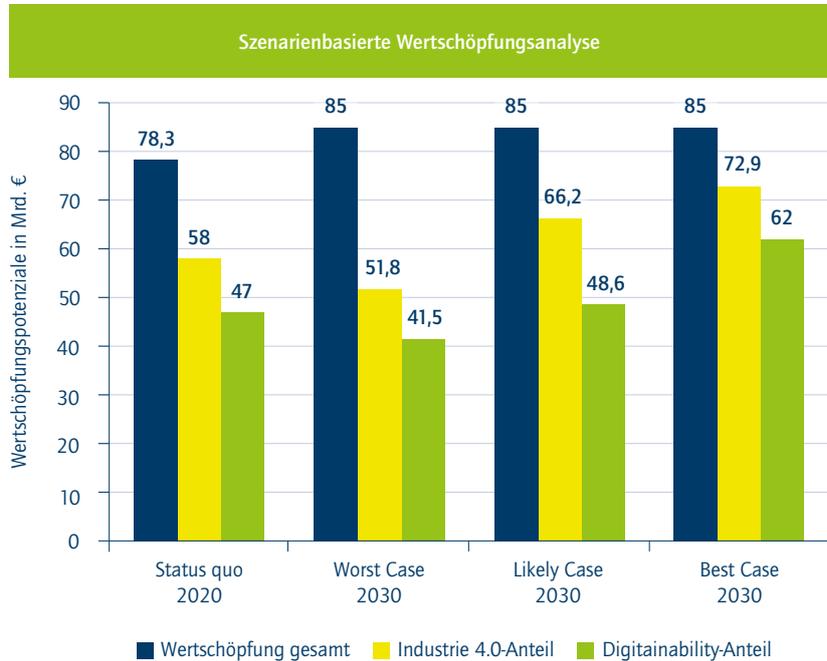


Abbildung 9: Zentrale Ergebnisse der ökonomischen Marktanalyse im Sektor Chemie und Pharma;²⁷ Abkürzungen: THG – Treibhausgas, TJ/Mio. € BWS – Terajoule pro eine Million Euro Bruttowertschöpfung, IKT – Information- und Kommunikationstechnik (Quelle: eigene Darstellung)

3.2.5 Bau- und Immobilienwirtschaft

Mit einer Wertschöpfung von 468,2 Milliarden Euro im Jahr 2020 ist die Bau- und Immobilienwirtschaft der umsatzstärkste Sektor in der hier betrachteten Auswertung. Neben einem hohen Energieverbrauch in der Bauphase, der Gebäudenutzung sowie bei möglichen Sanierungen erzeugen der hohe Rohstoffeinsatz und Wasserverbrauch sowie der Flächenverbrauch durch Gebäude signifikante negative Auswirkungen auf die hier betrachteten Umweltindikatoren. Weitere negative Effekte auf die Umwelt (zum Beispiel der Urban Heat Effect) sind dabei noch gar nicht berücksichtigt. Der Sektor spielt deshalb eine wesentliche Rolle für die Einhaltung der planetaren Grenzen, wobei digitale Technologien auch in diesem Bereich einen Beitrag leisten können. Der bisherige Diffusionsgrad digitaler Lösungen zur Stärkung ökologischer Nachhaltigkeit hinkt dem anderer Sektoren hinterher; einige digitale Lösungen, wie das Building Information Modeling (Digital-Twin-basiert), versprechen aber künftig signifikante Verbesserungen. Aktuell ist ein Fokus auf Effizienz- und weniger auf Effektivitätssteigerungen beim Einsatz digitaler Lösungen zu beobachten.

Die wichtigsten Technologien für die Nachhaltigkeitssteigerung im Bau- und Immobiliensektor sind Cloud- und Edge-Computing, Big-Data-Ansätze sowie KI, da es vor allem um die Auswertung großer Datenmengen aus bestehenden Immobilien geht, die in der Folge für intelligente Optimierungen genutzt werden. Darüber hinaus spielen Internet of Things und Kommunikationstechnologien eine wesentliche Rolle zur Vernetzung und Integration der vielfältigen Sensorik für die Analyse von Immobiliendaten. Augmented und Virtual Reality finden darüber hinaus in der digitalen Gebäudeplanung Anwendung. Distributed-Ledger-Technologien, Anywhere Operations und autonome Roboter spielen hingegen nur eine untergeordnete Rolle.

Eingesetzte digitale Lösungen

Im Vergleich zu anderen Sektoren konzentrieren sich bereits verfügbare digitale Lösungen auf deutlich weniger Lösungsgruppen. Hier bilden vor allem die Datenanalyse und Entscheidungsunterstützung sowie die datenbasierte Optimierung in der Konstruktion Möglichkeiten zur Reduktion des

27 | Aufgrund der unzureichenden Datenlage für die Branche Grundstoffe konnte die ökonomische Wertschöpfungspotenzialanalyse nur für die Branchen Chemie und Pharma zusammen betrachtet werden.

Energie- und Rohstoffverbrauchs sowie der Treibhausgasemissionen. Digitale Zwillinge wirken sich vor allem auf den Rohstoffverbrauch und die Treibhausgasemissionen aus, während Anwendungen von Smart-Energy-Supply- und Management-Systemen den Energieverbrauch optimieren, ebenso wie die Digitalisierung des Gebäudemanagements, beispielsweise durch die elektronische Wartung und Modernisierung von Anlagen für Strom, Wasser und Heizung. Building Information Models (BIM) sind als herausragende digitale Lösungen mit großen Nachhaltigkeitshebeln sowohl für Bestandsimmobilien als auch für Neubauten einsetzbar. So können einerseits auf Basis digitaler Gebäudemodelle zum Beispiel CO₂-Analysen in Bezug auf die Beheizung vorgenommen werden, die zur Senkung der Betriebskosten führen, während diese digitalen Modelle gleichzeitig auch eine energetische Optimierung bereits in der Planungsphase erlauben.

Zu beachten ist aber der beträchtliche Timelag zwischen der Datenerfassung für BIM während der Bauphase und dem Wert, den diese Daten häufig erst in der Sanierungs- beziehungsweise Abrissphase bekommen. Hier besteht das Risiko, dass die im BIM gesammelten Informationen in Vergessenheit geraten oder überholt sind und nicht mehr beachtet werden, wenn sie dann ihren wirklichen Nachhaltigkeitswert entfalten. Damit würde sich der ökonomische Anreiz bei der Datensammlung und -haltung potenziell reduzieren. Dem kann entgegengewirkt werden, indem BIM auch für die Optimierung in der Nutzungsphase aktiv eingesetzt wird. Im Bauprozess bestehen teilweise schon Produktpässe verwendeter Baustoffe zur Steigerung der Recyclingeffizienz und als Basis für Urban Mining. Zusätzlich übernehmen intelligent gesteuerte Roboter bereits Konstruktionsaufgaben beispielsweise an schwer zugänglichen oder gefährlichen Baustellen.

Ökonomisches Potenzial

Die Digitainability-Wertschöpfung in der Bau- und Immobilienwirtschaft kann aufgrund unzureichender Datenlage nicht abgeschätzt werden. Es wird aber deutlich, dass der Sektor hinsichtlich der Digitalisierung im Vergleich noch merklich zurückliegt; die IKT-Vorleistungen lagen 2020 bei 1,7 Milliarden Euro und betragen damit nur 0,3 Prozent bezogen auf den Produktionswert des Sektors, was deutlich unter dem gesamtwirtschaftlichen Durchschnitt von 1,9 Prozent liegt. Aufgrund der Größe des Sektors bieten sich enorme Potenziale zur Kostensenkung beziehungsweise Wertschöpfungssteigerung durch die Digitalisierung. Bezogen auf die Nutzungskosten im

Grundstücks- und Wohnungswesen, die in diesem Bereich 80 Prozent des Umsatzes von ca. 140 Milliarden Euro ausmachen, könnte durch digitales Gebäudemanagement bis 2030 eine Kostensenkung von bis zu 17 Milliarden Euro erzielt werden. Gleichzeitig könnte die Energieeffizienz im Idealfall um 70 Prozent gegenüber 2019 gesteigert und 316 Millionen Euro an Umweltkosten eingespart werden (siehe Abbildung 10). Im Worst und Likely Case ist hinsichtlich der Umweltkosten aber ein Anstieg in dreistelliger Millionenhöhe gegenüber 2019 zu erwarten. Ein ähnliches Bild zeigt sich hinsichtlich der Kosten für den Energievorleistungsaufwand: Nur im besten Fall sind diese gegenüber 2019 zu reduzieren – von 5,1 Milliarden Euro auf 4,2 Milliarden Euro, was einer Reduktion von 19 Prozent entspricht. Es ist also eine beträchtliche Stärkung des Einsatzes digitaler Lösungen nötig, um die Energieeffizienz des Sektors zu steigern.

Das Nachhaltigkeitspotenzial im Bau- und Immobiliensektor ist vor allem über Nutzungsänderungen zu erschließen. Bestehende digitale Lösungen sind hier Katalysatoren, aber kein Allheilmittel. So hatten Bewohnerinnen und Bewohner aufgrund der lange Zeit niedrigen Energiepreise und der Zurechnung der CO₂-Bilanz von Wohnimmobilien zum Vermieter kaum Anreize zur Reduktion ihres Energieverbrauchs. Die steigenden Energiekosten aufgrund der derzeitigen Energiekrise erzeugen nun einen starken Handlungsdruck auf die Bewohnerinnen und Bewohner. Hier bietet beispielsweise Smart Metering eine große Chance, als technologischer Enabler auf die echtzeitfähige Verbrauchskontrolle und -disziplinierung zu wirken. In digitale Lösungen integrierte Gamification-Ansätze könnten weitere Nutzungsänderungen incentivieren. Insbesondere der hohe negative Umwelteinfluss in der Nutzung von Bestandsimmobilien muss fokussiert werden; hierbei sind digitale Lösungen auf Basis einer erweiterten Datenerfassung, wie zum Beispiel Einzelraumregelung oder wetterbasierte Regulation zur energetischen Optimierung, auch schneller umsetzbar als bauliche Maßnahmen. Allerdings hemmen derzeitige regulatorische Hürden die Umsetzung von Digitalisierungsprojekten in der Bauwirtschaft, beispielsweise beim Präqualifizierungsverfahren zur Einspeisung von lokal generiertem Solarstrom. Bezogen auf den Effektivitätshebel bestünden Potenziale, über Material- beziehungsweise Produktpässe und die Modularisierung der Bauelemente die Recyclingfähigkeit zu steigern und den Bau- und Immobiliensektor langfristig in eine Kreislaufwirtschaft einzugliedern. Hierfür ist eine Stärkung des Ökosystemansatzes in diesem Sektor vonnöten.



Status quo auf einen Blick	
38,6 % Inl. Rohstoff- äquivalente (Anteil an Gesamt 2020)	56,9 % Abfall- aufkommen (Anteil an Gesamt 2020)
0,8 TJ/Mio. € BWS* Energieintensität	1,7 Mrd. € IKT-Vorleistungen

Voraussetzungen für Best Case
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anpassung des Anreizsystems, um die hebbaren Nachhaltigkeitspotenziale nutzen zu können ▪ Verdoppelung der Wachstumsrate der Energieeffizienz auf 5,0 % ▪ Kosteneinsparpotenziale bei Strom und Gas/Erdöl/Kohle realisieren

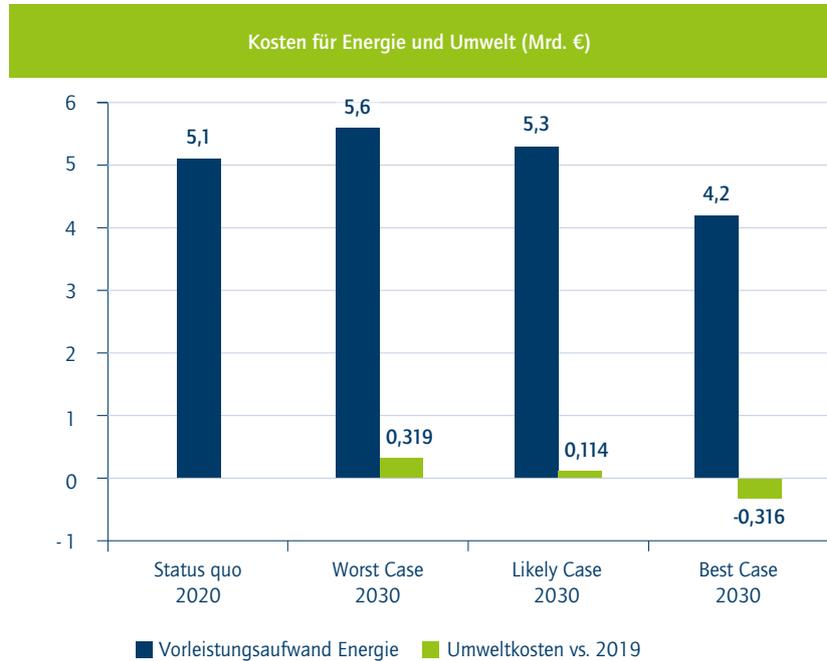


Abbildung 10: Zentrale Ergebnisse der ökonomischen Marktanalyse im Sektor Bau- und Immobilienwirtschaft;²⁸ Abkürzungen: Inl. – Inländisch, TJ/Mio. € BWS – Terajoule pro eine Million Euro Bruttowertschöpfung, IKT – Information- und Kommunikationstechnik (Quelle: eigene Darstellung)

3.2.6 Produktion

Der Produktionssektor erzielte im Jahr 2020 eine Wertschöpfung von 373,6 Milliarden Euro und ist mit einem Energieverbrauch von 3.431,4 Petajoule der Bereich mit dem höchsten Energiebedarf in dieser Studie. Weitere signifikante negative Umwelteinflüsse bestehen in einem hohen Rohstoffeinsatz, signifikanten Treibhausgasemissionen sowie einem nicht unerheblichen Flächenverbrauch für Produktionsanlagen. Im Hinblick auf die beschriebenen Lösungsgruppen bietet der Einsatz von digitalen Lösungen der Lösungsgruppen Datenökosysteme, Datenanalyse und Tools zur Systemmodellierung, digitaler Produktpass, Sustainable Procurement oder Recycling Information Loops die Möglichkeit, die betrachteten Umweltindikatoren in diesem Sektor umfassend positiv zu beeinflussen. Die Diffusion digitaler Lösungen in der Produktion ist vergleichsweise weit fortgeschritten, was unter anderem an den erfolgreichen Industrie 4.0-Initiativen und der guten Unterstützung der digitalen Transformation von Produktionsunternehmen liegt.

Aus technologischer Sicht werden vor allem moderne Kommunikationstechnologien sowie Cloud- und Edge-Computing eingesetzt, da diese für die Datenverarbeitung und Vernetzung der Produktionsanlagen zur Optimierung der Abläufe entscheidend sind. Ausgehend davon finden teilweise auch auf Internet of Things, Anywhere Operations, cyber-physischen Systemen, KI und Big Data basierende Lösungen Anwendung für eine verbesserte Datenauswertung beziehungsweise Automatisierung der Produktion. Augmented und Virtual Reality werden aktuell noch sehr selektiv im virtuellen Produktdesign beziehungsweise in der virtuellen Wartung eingesetzt. Distributed-Ledger-Technologien finden sich bisher kaum in der industriellen Anwendung. Ebenso werden digitale Technologien mit dem Potenzial für mehr Transparenz und Automatisierung für die Erschließung neuer X-as-a-Service-Geschäftsmodelle noch wenig genutzt, wie beispielsweise Manufacturing-as-a-Service.

28 | Aufgrund der unzureichenden Datenlage kann für Bau und Immobilien keine ökonomische Wertschöpfungspotenzialanalyse vorgenommen werden.

Use Case: Catena-X

Catena-X ist das erste kollaborative, offene Datenökosystem für die Automobilindustrie und verfolgt das Ziel einen weltweit standardisierten Datenaustausch auf Basis europäischer Werte zu etablieren. Ein zentrales Ziel von Catena-X besteht in der Steigerung der Nachhaltigkeit bei der Produktion von Fahrzeugen und entlang der gesamten Zuliefererkette. Dies soll insbesondere durch die Reduzierung von Treibhausgasemissionen erreicht werden.

Catena-X kann hier einen Mehrwert liefern, da durch die Zusammenführung aller Daten entlang der gesamten Produktionskette eine Standardisierung und damit eine Vergleichbarkeit der Messung der CO₂-Daten ermöglicht wird. Eine transparente Vergleichbarkeit ermöglicht es allen Beteiligten am Prozess sowohl ihre eigenen CO₂-Emissionen einzuordnen als auch eine informierte Auswahl bei Kaufentscheidungen zu treffen. Informationen über nachhaltige Produktion werden transparent und belastbar und können so auch zu einem Wettbewerbsvorteil werden.²⁹

Eingesetzte digitale Lösungen

In der Produktion sind bereits diverse Industrie 4.0-Anwendungen im Einsatz, die vordergründig die Effizienz steigern, durch Energie- und Ressourceneinsparungen aber auch zu ökologischer Nachhaltigkeit beitragen. Nur mit wenigen Ausnahmen, wie digitalen Zwillingen oder Produktpässen, werden effektive Ansatzpunkte mittels digitaler Lösungen adressiert, obwohl die größten Nachhaltigkeitspotenziale in der Produktion in einer Optimierung der Vorlieferkette und der Zirkularisierung von Geschäftsmodellen liegen. In der Flugzeug-, Leiterplatten- oder Karosseriefertigung sind etwa (Teil-)Automatisierungen durch intelligente Motoren mit integrierter Lasterkennung zu nennen. Genauso schreitet die Digitalisierung und damit die Virtualisierung der Produktion unter dem Industrie 4.0-Paradigma voran, von der digitalen Fabrikplanung über die virtuelle Inbetriebnahme bis hin zum digitalen Zwilling der Produktion und der virtuellen Prototypenplanung. Digitale Lösungen im Bereich „Grüne“ ERP-Systeme, digitaler Zwilling, integrierte Maschinen- und Anlagensteuerung, additive Fertigung, virtuelles Produktdesign sowie datenbasierte Opti-

mierung von Lagerhaltung und Logistik ermöglichen eine stark anwendungsabhängige, begrenzte Reduzierung von Energie- und Rohstoffverbrauch sowie Treibhausgasemissionen zwischen 10 und 30 Prozent. Lösungen im Bereich Smart Energy Supply und Management erlauben eine Verbesserung des Energieverbrauchs um bis zu 50 Prozent. Innerhalb der Produktion tragen Datenplattformen zur Optimierung beispielsweise der Maschinenauslastung bei. Digitale Produktpässe ermöglichen, beispielsweise im Batteriebereich, die potenzielle Nachverfolgung und damit auch die Rückgewinnung der darin verwendeten Materialien. Dieses Prinzip wäre im Sinne einer echten Kreislaufwirtschaft auf alle Produktionszweige übertragbar.

Ökonomisches Potenzial

Im Idealfall kann die Digitainability-Wertschöpfung in der Produktion bis 2030 um knapp 90 Prozent im Vergleich zu 2020 gesteigert werden: Im Produktionssektor wurden 2020 bereits 10,1 Milliarden Euro in IKT-Vorleistungen investiert, wobei diese Investitionen bis 2030 um jährlich 5,2 Prozent weiter steigen sollen. Entsprechend den aktuell bereits hohen IKT-Vorleistungen im Bereich der Produktion waren Industrie 4.0-Lösungen im Jahr 2020 bereits bei 58 Prozent der Unternehmen verbreitet, von denen 47 Prozent dadurch bereits ihren negativen Umweltimpact reduzieren konnten. Im Idealfall – bei einer Steigerung der Industrie 4.0-Wertschöpfung um jährlich 4 Prozent und 4,5 Prozent bei nachhaltigen Lösungen – kann der Anteil der Unternehmen, die Industrie 4.0-Anwendungen nutzen, bis 2030 auf 86 Prozent gesteigert werden, wodurch eine nachhaltige Wertschöpfung in Höhe von 327 Milliarden Euro möglich würde (siehe Abbildung 11). Gleichzeitig könnte die Energieeffizienz bis 2030 so um 76 Prozent gegenüber 2019 gesteigert werden, wodurch sektorale Umweltkosten in Höhe von 13,1 Milliarden Euro vermieden werden könnten.

Eine zentrale Herausforderung zur Stärkung der ökologischen Nachhaltigkeit des Produktionssektors ist die Reduktion des Ressourcenbedarfs durch verbesserte Rohstoffrückgewinnung. Während bestehende digitale Lösungen – auch aus Kostenreduktionsgründen – vor allem die lineare Ressourcenoptimierung fokussieren, ist eine funktionierende Kreislaufwirtschaft der effektivere Hebel für eine Steigerung der ökologischen Nachhaltigkeit des Produktionssektors. Dafür sind, zusätzlich zu digitalen Lösungen, weitere – potenziell auch digital unterstützte – Vorarbeiten nötig: einerseits eine umfassende Bewertbarkeit von Nachhaltigkeit entlang der Wertschöpfungskette, andererseits eine Nachverfolgbarkeit der Rohstoffe innerhalb



der Wertschöpfungskette. Hier bieten sukzessive in die Anwendung kommende Produktpässe entsprechende Potenziale.

Hemmnisse zur Stärkung der Digitainability liegen in mangelnder Datenverfügbarkeit sowie der Schnittstellenheterogenität zwischen einzelnen Prozessen und Akteuren in der Wertschöpfungskette der Produktion. Zwar wurden Initiativen zum vertieften Einsatz von Standards und Referenzarchitekturen (RAMI 4.0, OPC UA etc.) gestartet, diese bedürfen aber einer stärkeren sektoralen Verbreitung. Bezogen auf Anreizsysteme für die Stärkung ökologischer Nachhaltigkeit ist zu beobachten, dass die ökologische Bewertung von Produkten aktuell vor allem

auf CO₂-Äquivalenten aus dem Produktionsprozess basiert; gleichzeitig sind die Umweltauswirkungen des Sektors deutlich komplexer und langfristiger (siehe Ressourcenbedarf etc.), können aber bisher nur bedingt erfasst werden. Durch diese eingeschränkte Abbildung der Umweltfolgen spielt ökologische Nachhaltigkeit zum Beispiel im Produktdesign bisher nur eine untergeordnete Rolle, obwohl hier große Potenziale liegen, etwa durch ein modulares Design oder einfach abtrennbare Komponenten. Die ökologische Bewertung von Umwelteinflüssen über die CO₂-Äquivalente hinaus und die Nachverfolgbarkeit von Produkten sind also Voraussetzungen für die Nutzung der Digitainability-Potenziale in der Produktion.

Status quo auf einen Blick	
22,5 % THG- Emissionen (Anteil an Gesamt 2020)	6,8 % Wasser- bedarf (Anteil an Gesamt 2020)
10,2 TJ/Mio. € BWS* Energieintensität	10,1 Mrd. € IKT-Vorleistungen

Kosten für Energie und Umwelt	
47,1 Mrd. € Kosten Energievorleistung (Likely Case 2030)	32,4 Mrd. € Kosten Energievorleistung (Best Case 2030)
-4,045 Mrd. € Umweltkosten vs. 2019 (Likely Case 2030)	-13,102 Mrd. € Umweltkosten vs. 2019 (Best Case 2030)

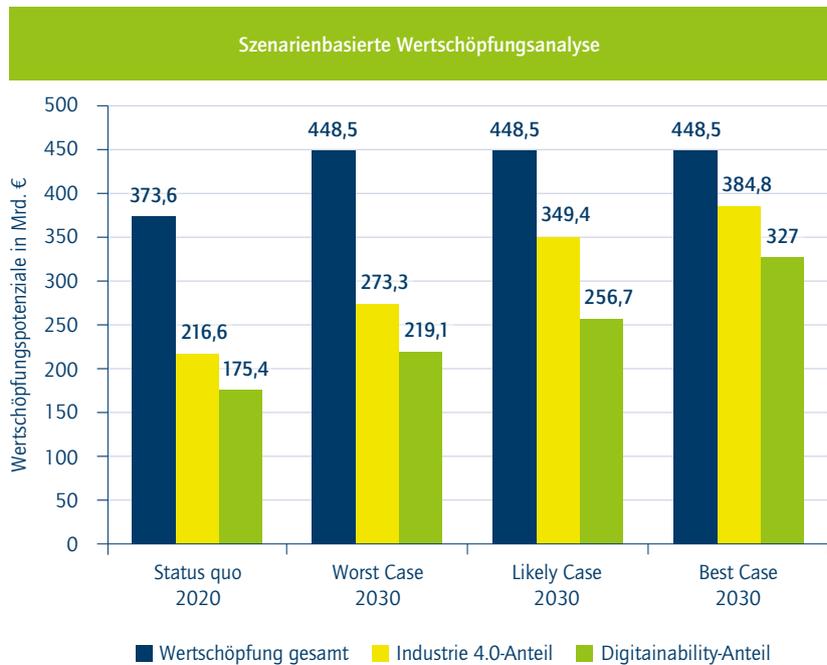


Abbildung 11: Zentrale Ergebnisse der ökonomischen Marktanalyse im Sektor Produktion; Abkürzungen: THG – Treibhausgas, TJ/ Mio. € BWS – Terajoule pro eine Million Euro Bruttowertschöpfung, IKT – Information- und Kommunikationstechnologien (Quelle: eigene Darstellung)

3.2.7 Elektrotechnik und Maschinenbau

Der Bereich Elektrotechnik und Maschinenbau erzielte im Jahr 2020 eine Wertschöpfung in Höhe von 134,2 Milliarden Euro und ist bezüglich der Digitalisierung, ähnlich wie die Produktion, einer der am weitesten fortgeschrittenen Sektoren, was auch hier am verbreiteten Industrie 4.0-Paradigma liegt. Ähnlich wie in der Produktion herrscht auch in diesem Sektor ein besonders hoher Energieverbrauch und Rohstoffeinsatz; zudem sind die Treibhausgasemissionen sowie der Flächenverbrauch nicht unerheblich. Die bereits genutzten digitalen

Lösungen zur Steigerung ökologischer Nachhaltigkeit überschneiden sich hinsichtlich der relevanten Lösungsgruppen und Technologien stark mit dem Bereich der Produktion, da auch hier der Fokus auf der Digitalisierung und Vernetzung der eingesetzten Maschinen liegt, Virtualisierung oder intelligente Datenauswertung dienen zur Unterstützung in der Planung und Optimierung der Produktion.

Entsprechend liegt der Fokus bezüglich der verwendeten Technologien auf modernen Kommunikationstechnologien sowie Cloud- und Edge-Computing, die als Basis für die Vernetzung

und Systemintegration der verwendeten Anlagen dienen. In diesem Zusammenhang werden außerdem bereits auf Internet of Things, Anywhere Operations, cyber-physische Systeme, KI und Big Data basierende Anwendungen genutzt, um die Datenbasis zu den Produktionsprozessen zu erweitern und diese Daten auch systematisch auszuwerten. Augmented und Virtual Reality finden aktuell bereits teilweise Anwendung im Kontext der virtuellen Wartungsunterstützung sowie im virtuellen Produktdesign. Aufgrund der hauptsächlich betriebsinternen Anwendungen wird Distributed-Ledger-Technologien aktuell kaum genutzt, da die Datenhaltung über bereits verfügbare Systeme geregelt wird.

Eingesetzte digitale Lösungen

Bezüglich der verwendeten Lösungsgruppen steht auch hier, ähnlich wie in der Produktion, die Effizienzsteigerung bei bestehenden Prozessen im Vordergrund. Neben Anwendungen zur datenbasierten Optimierung etwa der Intralogistik stellt die Virtualisierung hier einen zentralen Baustein dar. Dabei werden Maschinen und Komponenten virtuell geplant und anschließend als digitaler Zwilling abgebildet, um basierend darauf neben den beschriebenen Prozessoptimierungen eine vorausschauende Wartung zu etablieren (siehe Use Case). Dies führt vor allem zu Energie- und Ressourceneinsparungen und beeinflusst so indirekt auch die ökologische Nachhaltigkeit des Sektors.

Trotz der bereits weit verbreiteten Nutzung digitaler Technologien besteht hier noch weiteres Potenzial für Effizienzsteigerungen, wobei die Verbreitung bereits durch den zugrunde liegenden ökonomischen Mehrwert befördert wird. Allerdings werden in diesem Sektor noch kaum Lösungen mit Hebelwirkungen für die ökologische Nachhaltigkeit eingesetzt. Ähnlich wie in der Produktion steht hier die Reparatur- und Adaptionfähigkeit bisher nicht im Vordergrund, und technologische Obsoleszenz wird aufgrund fehlender ökonomischer Anreize zur ökologischen Nachhaltigkeit in Kauf genommen. Hier kann die bereits verbreitete Virtualisierung großes Potenzial bieten, zum Beispiel für ausführlicheres und gleichzeitig ressourcenschonenderes Prototyping, das die Langlebigkeit und Recyclingfähigkeit der Komponenten priorisiert. Dadurch und durch die Integration von Produktpässen in die Wertschöpfungskette könnte der Sektor effektiv in eine Kreislaufwirtschaft integriert werden.

Use Case: Asset Administration Shell (ASS)

Unter Asset Administration Shell (ASS) ist die Umsetzung des digitalen Zwillings für Industrie 4.0 zu verstehen. Hier werden die Informationen, Merkmale und Verhaltensweisen eines Assets digital dargestellt. Auf diese Weise kann der gesamte Lebenszyklus von Produkten, Geräten, Maschinen und Anlagen abgebildet werden. Mit dieser digitalen Lösung wird herstellerübergreifende Interoperabilität ermöglicht und die Grundlage für durchgehende Wertschöpfungsketten geschaffen.

Mit der ASS können die Betriebsparameter eines Produkts während dessen gesamter Lebensdauer aufgezeichnet werden. Die dabei entstehenden Informationen können zwischen allen Partnern in der Wertschöpfungskette ausgetauscht werden. So kann sowohl eine längere Lebensdauer des Assets durch frühzeitige Wartung und Reparatur sichergestellt als auch die Entwicklung neuer Modelle mit Informationen aus der Nutzung unterstützt werden. Dies kann die Ressourceneffizienz erhöhen.³⁰

Ökonomisches Potenzial

Im Idealfall kann die Digitainability-Wertschöpfung in Elektrotechnik und Maschinenbau so bis zum Jahr 2030 im Vergleich zu 2020 mehr als verdoppelt werden – das entspricht der größten Wachstumsrate unter den betrachteten Sektoren: Schon im Jahr 2020 betragen die IKT-Vorleistungen 2,5 Prozent des Produktionswerts des Sektors, und 64 Prozent der Unternehmen nutzten Industrie 4.0-Lösungen. Die vergleichsweise weit fortgeschrittene Digitalisierung in diesem Sektor zeigte sich 2020 bereits in einer digitalen nachhaltigen Wertschöpfung in Höhe von 69,3 Milliarden Euro. Trotzdem bestehen auch im Bereich Elektrotechnik und Maschinenbau noch klare Wachstumspotenziale, insbesondere über Synergieeffekte durch Standardisierung und Interoperabilität (siehe Use Case). So kann der Anteil Industrie 4.0 nutzender Unternehmen bis 2030 im besten Fall auf 94 Prozent gesteigert werden. Dadurch könnte eine nachhaltige Wertschöpfung von 140,3 Milliarden Euro in diesem Bereich erzielt werden, und es würden Umweltkosten in Höhe von 584 Millionen Euro vermieden, wenn die Energieeffizienz um jährlich 5,9 Prozent bis

30 | Vgl. Plattform Industrie 4.0 2019.



2030 gesteigert werden kann (siehe Abbildung 12). Einhergehen wird dies in jedem Fall mit einer Reduktion von Energievorleistungskosten, die im Jahr 2019 bei 3,3 Milliarden Euro lagen. Im Idealfall können diese bis 2030 um 42 Prozent reduziert werden.

Der Übergang zu einer zirkulären Wirtschaftsweise ist aufgrund des hohen Ressourcen- und Energieverbrauchs in der Elektrotechnik und im Maschinenbau ähnlich wichtig wie im Produktionssektor. Entsprechend stehen hier auch die Nachver-

folgbarkeit und die Steigerung der Transparenz entlang der Wertschöpfungskette im Vordergrund, die über digitale Zwillinge und Produktpässe gestärkt werden können. Aber auch in der Elektrotechnik und im Maschinenbau mangelt es an Anreizen für die Entwicklung zirkulärer Geschäftsmodelle oder von Geschäftsmodellen, die ein ökologisch nachhaltiges Nutzungs- und Nutzenversprechen fördern. Ähnlich wie in der Produktion ist die Schnittstellenheterogenität trotz wachsender Standardisierungsbemühungen ein weiteres Problem für die Nutzung der Digitainability-Potenziale.

Status quo auf einen Blick	
56,1 % PFC-Emissionen (Anteil an Gesamt 2020)	6,3 % Inl. Rohstoff-äquivalente (Anteil an Gesamt 2020)
1,8 TJ/Mio. € BWS* Energieintensität	9,1 Mrd. € IKT-Vorleistungen

Kosten für Energie und Umwelt	
2,7 Mrd. € Kosten Energievorleistung (Likely Case 2030)	1,9 Mrd. € Kosten Energievorleistung (Best Case 2030)
+0,030 Mrd. € Umweltposten vs. 2019 (Likely Case 2030)	-0,584 Mrd. € Umweltposten vs. 2019 (Best Case 2030)

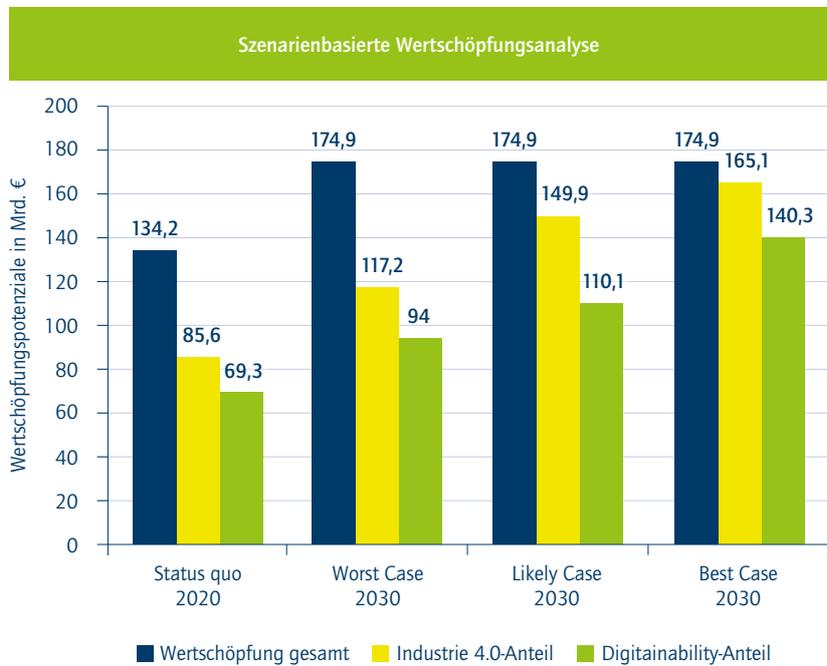


Abbildung 12: Zentrale Ergebnisse der ökonomischen Marktanalyse im Sektor Elektrotechnik und Maschinenbau; Abkürzungen: PFC – Per- und polyfluorierte Chemikalien, Inl. – Inländisch, TJ/Mio. € BWS – Terajoule pro eine Million Euro Bruttowertschöpfung, IKT – Information- und Kommunikationstechnik (Quelle: eigene Darstellung)

3.2.8 Informations- und Kommunikationstechnik

Der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)-Sektor erzielte 2020 eine Wertschöpfung in Höhe von 169,7 Milliarden Euro bei einer vergleichsweise geringen Energieintensität von 1,8 Terajoule pro eine Million Euro Bruttowertschöpfung. Der Sektor nimmt im Rahmen der Analyse eine Sonderrolle ein, da einerseits die Digitalisierung innerhalb dieses Bereichs evaluiert wird und andererseits die technologischen Entwicklungen im IKT-Sektor gleichzeitig eine Enabler-Funktion zur Digitalisierung in allen anderen Sektoren innehaben. Entsprechend bildet dieser Sektor die Basis für einen Ausbau von digitalen Technologien und damit auch für Digitainability in der deutschen Wirtschaft. Der IKT-Sektor ist mit negativen Umweltauswirkungen

insbesondere im Hinblick auf den Energieverbrauch von Rechenzentren und Software(-Entwicklung) sowie auf den Rohstoffeinsatz und insbesondere den Ressourcenbedarf (zum Beispiel seltene Erden) verbunden. Viele verfügbare digitale Lösungen zielen daher auf Effizienzsteigerungen, beispielsweise durch energieeffizientere Algorithmen und optimiertes Produktdesign.

Die zur Steigerung der ökologischen Nachhaltigkeit des IKT-Sektors eingesetzten digitalen Lösungen basieren vor allem auf Cloud- und Edge-Computing, modernen Kommunikationstechnologien wie 5G und 6G sowie Big Data. KI und Internet-of-Things-Anwendungen, beispielsweise zur Ermittlung des Energiebedarfs von Hardware, spielen eine immer wichtigere Rolle.

Eingesetzte digitale Lösungen

Hinsichtlich der Lösungsgruppen können vor allem Daten-ökosysteme und virtuelle Produktdesigns die ökologische Nachhaltigkeit des IKT-Sektors stärken. Anwendungen zur Datenanalyse, die datenbasierte Optimierung oder Smart Energy Supply wirken sich im Sinne von Green IT selektiv auf die Treibhausgasemissionen beziehungsweise den Energieverbrauch aus. Konkrete Anwendungen in diesem Bereich betreffen zum Beispiel die KI-basierte Kühlung von Datenzentren oder die Entwicklung von Cloud-Anwendungen und Open Source Frameworks zum Edge-Computing, wobei diese über den Sektor hinaus Anwendung finden können.

Rebound-Effekt

Von Rebound-Effekten bei Effizienzsteigerungen spricht man, wenn die Effizienzsteigerung eine vermehrte Nachfrage beziehungsweise Nutzung bewirkt und damit entgegen dem ursprünglichen Ziel ökologische Nachhaltigkeit schwächt statt stärkt. Dies kann in verschiedener Weise geschehen: Die durch Effizienzsteigerung frei gewordenen Ressourcen können eingesetzt werden, um die effizientere Lösung öfter zu nutzen als die vorherige Lösung (direkter Rebound-Effekt), oder die frei gewordenen Ressourcen können eingesetzt werden, um sie für die Nutzung anderer Güter oder Dienstleistungen zu verwenden (indirekter Rebound-Effekt). Schließlich gibt es auch globalere Rebound-Effekte: Wenn beispielsweise Energiepreise sinken und dadurch Zwischen- und Endprodukte günstiger werden, kann dies ganze Produktions- oder Konsummuster verändern.³¹

Viele bestehende nachhaltigkeitssteigernde Lösungen im IKT-Sektor zielen auf Effizienzsteigerungen ab. Effizientere IKT-Anwendungen bergen aber die Gefahr, Rebound-Effekte zu provozieren und damit einen indirekten negativen Umwelteinfluss zu erzeugen, der den direkten positiven Umwelteinfluss einer effizienteren IKT-Anwendung deutlich übersteigt. Als holistisch nachhaltigkeitssteigernder Ansatz für die Zukunft steht Green IT im Fokus: der umwelt- und ressourcenschonende Einsatz von IKT über den gesamten Lebenszyklus (Herstellung, Nutzung, Entsorgung) hinweg in Verbindung mit einer steigenden Energieeffizienz und einer gesamtwirtschaftlichen Kostensenkung. Effektive digitale Lösungen, die eine Nutzungs-

änderung von IKT ermöglichen, wurden dagegen bisher kaum fokussiert. Die Konzentration liegt primär auf der Entwicklung grüner Technologien oder dem Einsatz digitaler Lösungen zur grüneren Produktion von IKT-Lösungen.

Ökonomisches Potenzial

Im Idealfall kann die Digitainability-Wertschöpfung im IKT-Sektor bis 2030 im Vergleich zu 2020 um knapp 80 Prozent erhöht werden: Die IKT-Vorleistungen lagen bereits 2020 nicht unerwartet mit 9,7 Prozent des Produktionswerts des Sektors deutlich über dem Durchschnitt der in dieser Studie betrachteten Bereiche. 67 Prozent der Unternehmen im IKT-Sektor nutzen bereits Industrie 4.0-Anwendungen, wobei hier ein Potenzial zur Steigerung auf 98 Prozent bis 2030 besteht. Dadurch könnte eine Digitainability-Wertschöpfung von 163,2 Milliarden Euro erzielt werden (siehe Abbildung 13). Gleichzeitig könnte die Energieeffizienz des Sektors im besten Fall bis 2030 um 96 Prozent verbessert werden. Die Kosten für den Vorleistungsaufwand Energie sind so in allen betrachteten Szenarien reduzierbar. Im besten Fall kann gegenüber Kosten von 7,8 Milliarden Euro im Jahr 2019 eine Reduktion um 45 Prozent auf noch 4,3 Milliarden Euro für den Energievorleistungsaufwand im Jahr 2030 erzielt werden. Auch Umweltkosten könnten in diesem Bestfall im Vergleich zu 2019 um 1,9 Milliarden reduziert werden. Doch selbst im schlechtesten Fall ist eine Einsparung der Umweltkosten von mehr als 1,4 Milliarden Euro im Jahr 2030 im Vergleich zu 2019 erwartbar.

Es zeigt sich zudem, dass insbesondere Green-IT-Technologien große Einsparungspotenziale freisetzen: Im Bestfall ist bei einer jährlichen Abnahme des Leistungsbedarfs um 0,5 Prozent von 2019 bis 2030 die Senkung von Stromkosten um 7,5 Milliarden Euro und von Umweltkosten um 2,3 Milliarden Euro im Jahr 2030 im Vergleich zu 2019 möglich. Der Erreichung dieser Ziele steht allerdings aktuell noch entgegen, dass es bisher kaum nachprüfbar Kriterien für die Messung des Beitrags von Green IT zur ökologischen Nachhaltigkeit gibt. Beispielsweise existiert noch keine geeignete Indikatorik, die im Programmierprozess Orientierungspunkte bietet, wie energieeffizient ein bestimmter Algorithmus sein wird. Außerdem ist unklar, inwieweit Green IT by Design Rebound-Effekte abmildern beziehungsweise verhindern könnte. Die Einsparpotenziale zeigen, dass trotz möglicher Rebound-Effekte Effizienzsteigerungen in der Produktion digitaler Lösungen sowie die Entwicklung digitaler Lösungen explizit zur Steigerung

31 | Vgl. Bitkom 2021.



ökologischer Nachhaltigkeit im Bereich der IKT-Nutzung unabdingbar für mehr Digitainability in der deutschen Wirtschaft sind. Es fehlt hier aber noch an Evidenz, wie Software energie-

effizienter und wie Hardware ressourcenschonender hergestellt und genutzt werden kann.

Status quo auf einen Blick	
0,25 % THG-Emissionen (Anteil an Gesamt 2020)	1,7 % Primärenergieverbrauch (Anteil an Gesamt 2020)
1,8 TJ/Mio. € BWS* Energieintensität	46,8 Mrd. € IKT-Vorleistungen

Kosten für Energie und Umwelt	
5,9 Mrd. € Kosten Energievorleistung (Likely Case 2030)	4,3 Mrd. € Kosten Energievorleistung (Best Case 2030)
-1,662 Mrd. € Umweltkosten vs. 2019 (Likely Case 2030)	-1,941 Mrd. € Umweltkosten vs. 2019 (Best Case 2030)

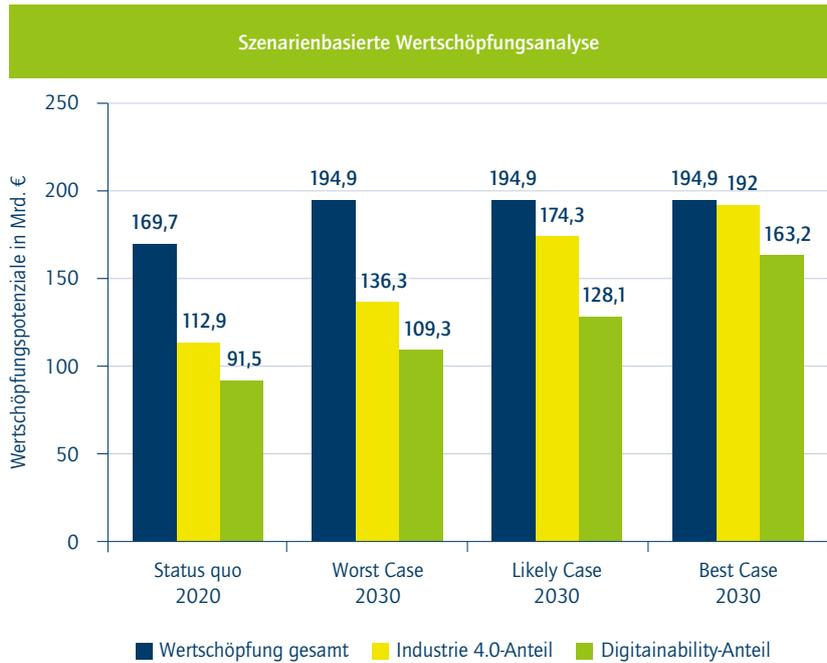


Abbildung 13: Zentrale Ergebnisse der ökonomischen Marktanalyse im Sektor IKT; Abkürzungen: THG – Treibhausgas, TJ/Mio. € BWS – Terajoule pro eine Million Euro Bruttowertschöpfung, IKT – Information- und Kommunikationstechnik (Quelle: eigene Darstellung)

3.3 Lösungsgruppen und Technologien im ökologischen Nachhaltigkeitsvergleich

Die sektorspezifische Analyse digitaler Lösungen, die die ökologische Nachhaltigkeit stärken, verdeutlicht unterschiedliche Diffusionsgrade von digitalen Lösungen je nach Technologie, betrachtetem Einfluss auf Umweltindikatoren oder Nachhaltigkeitshebel, an dem die Technologie ansetzt. Um daraus mögliche

Transferpotenziale, -hemmnisse, generelle Trends sowie Sektorspezifika abzuleiten, ist eine übergreifende Betrachtung der Analyseergebnisse erforderlich.

3.3.1 Technologien

Ein Vergleich der Technologien über die Sektoren hinweg (siehe Abbildung 14) zeigt einen sich wiederholenden Trend: Die betrachteten Technologien unterscheiden sich in ihrer Anwendungsbreite und lassen sich grob in drei Gruppen einteilen.



Status quo und Potenziale digitaler Lösungen

Abbildung 14: Überblick über die Nutzung ausgewählter Technologien in den jeweiligen Sektoren; Abkürzungen: IoT – Internet of Things, CPS – Cyberphysische Systeme, Auton. – Autonome, Ops. – Operations, DLT – Distributed-Ledger-Technologien, KI – Künstliche Intelligenz (Quelle: eigene Darstellung)



Die erste Gruppe bilden Kommunikationstechnologien, KI, Big-Data-Ansätze sowie Cloud- und Edge-Computing; diese finden unabhängig vom Sektor bereits breite Anwendung, da sich hier sehr direkt Use Cases mit klar erkennbarem ökonomischem Mehrwert ableiten lassen. Gleichzeitig ist die Investitionshürde im Vergleich geringer, da die notwendigen Daten oft schon vorliegen und hauptsächlich die betriebsinterne IT-Infrastruktur verbessert werden muss.

Für die zweite Gruppe (Internet-of-Things- und cyber-physische Systeme) finden sich oft ähnlich konkrete und rentable Anwendungsbeispiele; allerdings sind hier die Anfangsinvestitionen höher. Die Forschung zur Industrie 4.0-Transformation zeigt, dass insbesondere KMU diese Anfangsinvestitionen häufig nicht leisten können und wollen – der ökologische Nachhaltigkeitsmehrwert ist in einer proprietären Wirtschaftsweise für diese Unternehmen oftmals nicht ökonomisch attraktiv umsetzbar.³²

In der dritten Gruppe finden sich Distributed-Ledger-Technologien, Anywhere Operations, autonome Roboter, Augmented (AR) und Virtual Reality (VR); hier bedarf es, vor allem für autonome Roboter, AR und VR, größerer Anfangsinvestitionen, zudem ist ihr technologischer Reifegrad erst seit Kurzem auf einem mit der ersten Gruppe vergleichbaren Niveau. Nachhaltigkeitspotenziale, insbesondere im Predictive-Maintenance-Bereich, versprechen aber eine künftig steigende Diffusion dieser Technologien und die Umsetzung in attraktive Lösungen in diversen Sektoren. Entsprechend könnten hier Maßnahmen zur Investitionsförderung zu einer effektiveren Nutzung führen, auch wenn technologische Besonderheiten betrachtet werden müssen:

- Distributed-Ledger-Technologien (DLT): Der ökologische und ökonomische Mehrwert von DLT hat sich für Unternehmen bisher nur begrenzt erschlossen; für den Einsatz DLT-basierter Lösungen gibt es in der Regel deutlich kostengünstigere Substitute. Es ergibt für viele Unternehmen deshalb schlicht keinen Sinn, auf DLT-basierte Lösungen zu setzen. Zudem ist die Technologie aktuell nicht nachhaltig genug digitalisiert, als dass ihr Einsatz für Unternehmen attraktiv sein könnte. Werden – wie immer wieder postuliert – künftig aber die Energiebedarfe von DLT deutlich reduziert, kann die Technologie über ihre Trust- und Storage-Eigenschaften by Design insbesondere für zirkuläre Geschäftsmodelle interessant sein (zum Beispiel für die Datenhaltung digitaler Produktpässe).
- Anywhere Operations: Die Messung, inwieweit Anywhere Operations zur ökologischen Nachhaltigkeit beitragen, war für viele der betrachteten Bereiche nur schwer möglich, da

der Einsparungspunkt oft außerhalb der Sektoren insbesondere im geänderten (Mobilitäts-)Verhalten von Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmern liegt. Anywhere Operations katalysieren insbesondere das Arbeiten aus dem Homeoffice. Bei einer generellen Einführung von durchschnittlich zwei Tagen Homeoffice pro Woche besteht bis 2030 für die Einsparung von Pendlerkosten, Zeit (Opportunitätskosten) und Umweltkosten ein Potenzial von bis zu 312 Millionen Euro. Homeoffice ist damit ein herausragendes Beispiel für geändertes Nutzungsverhalten, das die ökologische Nachhaltigkeit stärkt. Es findet sich mittlerweile in breiter Anwendung, die technologischen Potenziale von Anywhere Operations werden entsprechend teilweise schon ausgeschöpft, auch wenn sich dies nicht direkt in der sektororientierten Marktstudie widerspiegelt.

Daraus lässt sich folgern, dass vor allem digitale Lösungen auf Basis von AR, VR oder autonomen Robotern in der Entwicklungs- und Anwendungsförderung besondere Beachtung finden sollten, um weitere ökologische Nachhaltigkeitspotenziale erschließen zu können.

3.3.2 Lösungsgruppen

Betrachtet man die Effekte der Lösungsgruppen auf die Umweltindikatoren sektorübergreifend, so zeichnet sich eine Zweiteilung ab zwischen digitalen Lösungen mit begrenzten Auswirkungen (10 bis 30 Prozent Verbesserung) bei selektiven Umweltfaktoren und denjenigen mit universeller Hebelwirkung auf alle betrachteten Umweltfaktoren. Grundsätzlich besteht das Potenzial für deutlich verbesserte ökologische Nachhaltigkeit in der deutschen Wirtschaft über die betrachteten Lösungen.

In die Kategorie der Technologien mit Effekten auf selektive Umweltfaktoren fallen „Grüne“ ERP-Systeme, virtualisierte Anwendungen zum Produktdesign, zur Wartung oder Schulung, integrierte Maschinen- und Anlagensteuerung, datenbasierte Optimierung und Elektrifizierung von Fahrzeugen und Logistik sowie Smart Energy Supply und Management. Im Vergleich dazu haben Datenökosysteme, Tools zur Datenanalyse und zur Entscheidungsunterstützung, digitale Produktpässe, digitale Zwillinge sowie Sustainable Procurement das Potenzial, alle betrachteten Umweltindikatoren positiv und in größerem Ausmaß zu beeinflussen (siehe Abbildung 15).

Gleichzeitig zeigen sich auch noch große Unterschiede in der Verbreitung der Lösungsgruppen und daraus folgend auch in

32 | Vgl. acatech 2022.

der jeweils damit erzielten Wertschöpfung. Während digitale Zwillinge und datenbasierte Optimierung sektorübergreifend bereits umfassend genutzt werden, finden vor allem Techno-

logien mit Hebelwirkung in Bezug auf die ökologische Nachhaltigkeit, wie zum Beispiel Sustainable Procurement und digitale Produktpässe, noch kaum Anwendung.

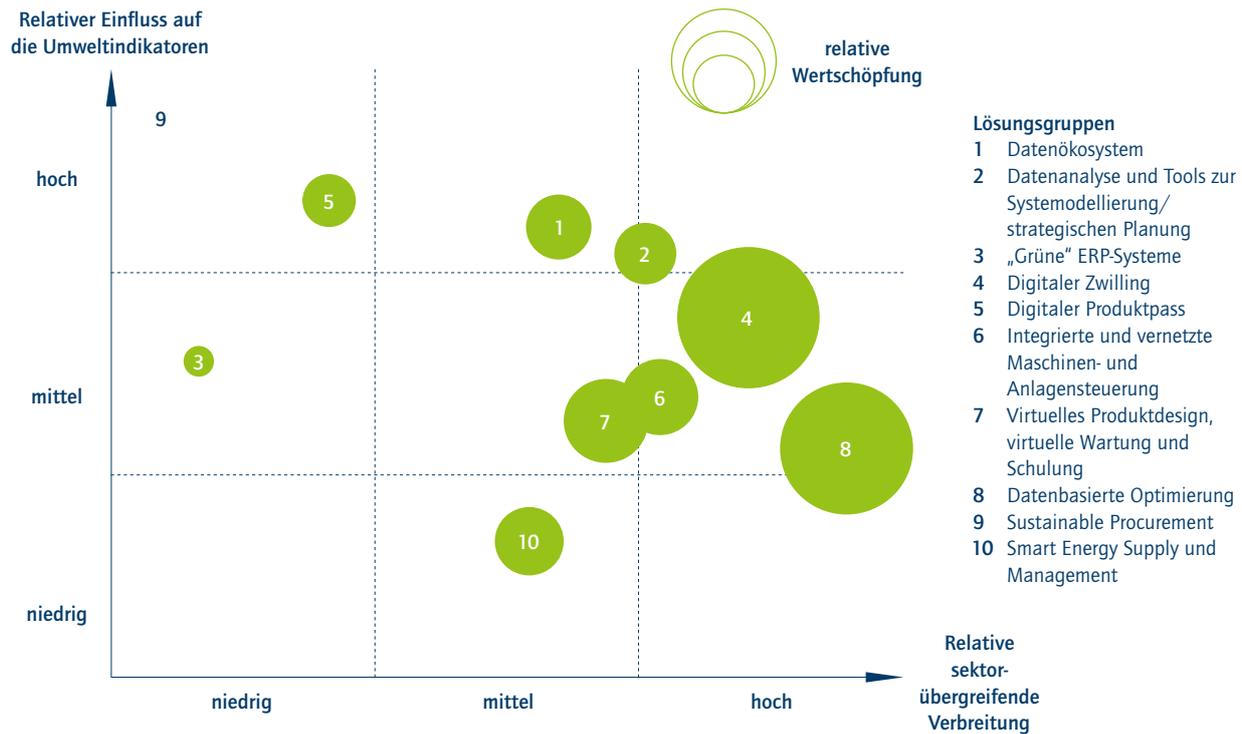


Abbildung 15: Zentrale Ergebnisse der ökonomischen Marktanalyse im Sektor Bau- und Immobilienwirtschaft;³³ Abkürzungen: Inl. – Inländisch, Tj/Mio. € BWS – Terajoule pro eine Million Euro Bruttowertschöpfung, IKT – Information- und Kommunikationstechnik (Quelle: eigene Darstellung)

Letztere sind wichtig für eine Stärkung der Kreislaufwirtschaft. Digitale Technologien könnten zur Schließung von Stoffkreisläufen beitragen, um dadurch ressourceneffizienter und nachhaltiger produzieren, konsumieren und verwerten (recyceln) zu können. Zudem könnte die Digitalisierung einen Beitrag zu dringend erforderlichen Verbesserungen der Recyclingfähigkeit der Produkte (zirkuläre Produktdesigns) und der Recyclingtechnologien leisten. Gerade für klimaneutrale Energie spielt

eine höhere Materialeffizienz und -substitution eine wichtige Rolle. Hierfür könnten digitale Technologien, darunter auch KI-Verfahren, die in der Materialforschung angewandt werden, eine wichtige Rolle spielen, um mögliche Potenziale zu erschließen. Diese Potenziale werden aktuell aber durch die eher geringe Verfügbarkeit entsprechender digitaler Lösungen kaum ausgeschöpft.

33 | In Bezug auf Sustainable Procurement (Lösungsgruppe 9) konnten keine konkreten digitalen Lösungen identifiziert werden, weswegen hier auch keine qualitative Abschätzung der Wertschöpfung vorgenommen werden konnte, da diese auf der Verbreitung der Lösungsgruppe in Verbindung mit der jeweiligen sektoralen Wertschöpfung basiert.



Wertschöpfungspotenziale der Kreislaufwirtschaft

Die Kreislaufwirtschaft wird 2030 gemessen am Umsatz ein Marktpotenzial von bis zu ca. 150 Milliarden Euro aufweisen, wovon knapp die Hälfte auf die Abfallbehandlung und -verwertung, gut ein Viertel auf die Sammlung und der Rest auf den Handel mit Altmaterialien und die Technologie(-Entwicklung) entfallen dürften. Im Jahr 2030 wird knapp ein Fünftel des Marktpotenzials der Kreislaufwirtschaft Ansatzpunkte für die Digitalisierung bieten (ein etwa doppelt so hoher Anteil wie 2020), was bis zu 26 Milliarden Euro entspricht.

Die Studie verdeutlicht: Unternehmen zielen vor allem auf die Effizienzsteigerung ihrer Produkte durch digitale Lösungen ab, da dies sowohl ökologisch als auch ökonomisch wertschöpfend ist. Da der Fokus primär auf die ökonomisch und ökologisch nachhaltigere Gestaltung betriebsinterner Prozesse und Lösungen gerichtet wird, wird eine Änderung des Nutzungsverhaltens oder eine Zirkularisierung der Wirtschaftsweise von vielen Unternehmen nicht bedacht. Auch sektorübergreifende Transferpotenziale digitaler Lösungen konnten aus dieser nach innen gerichteten Perspektive bisher nicht strategisch erschlossen werden.

Folglich ist eine der wichtigsten Beobachtungen dieser Studie, dass der Großteil der betrachteten digitalen Lösungen ent-

weder am Nachhaltigkeitshebel der **grünen Produktion** oder der **grünen Lösungen** ansetzt. Digitale Lösungen, die die Nachhaltigkeit digitaler Tools an sich stärken (nachhaltige digitale Lösungen), also **grüne Technologien**, existieren bisher nur sehr vereinzelt, stehen aber im Fokus der Green-IT- und Clean-IT-Initiativen. Digitale Lösungen, die explizit eine **grüne Nutzung** fokussieren, bestehen bisher kaum. Digitale Produktpässe und digitale Zwillinge befähigen den Umstieg auf eine zirkuläre Wirtschaftsweise (**Circular Economy**), ansonsten mangelt es aber auch in diesem Bereich an digitalen Lösungen.

Daraus ergibt sich folgendes Bild: Verfügbare digitale Lösungen in der deutschen Wirtschaft setzen vor allem an Effizienzhebeln an (Technologie, Produktion, Lösung) und reduzieren den negativen Umwelteinfluss des Sektors, in dem sie eingesetzt werden, unter dem bestehenden Paradigma einer linearen Wirtschaftsweise. Es mangelt jedoch bis auf einzelne Ausnahmen an verfügbaren digitalen Lösungen, die effektiv eine Stärkung der ökologischen Nachhaltigkeit über verändertes nachhaltiges Nutzungsverhalten und eine zirkulär orientierte Wirtschaftsweise ermöglichen. Das unterstreicht die Bedeutung einer forcierten Kreislaufwirtschaftsstrategie als komplementäre Rahmensetzung. Es bedarf also umfangreicher Anreize und eines Wandels im unternehmerischen Selbstverständnis, um die ökologischen Nachhaltigkeitspotenziale und die damit verbundenen ökonomischen Wertschöpfungspotenziale des Einsatzes digitaler Lösungen umfassender zu erschließen.

4 Gestaltungsoptionen zur digital-nachhaltigen Potenzialmaximierung

Die Marktanalysen verdeutlichen: Digitale Technologien bieten grundsätzlich Potenziale zur Stärkung der ökologischen Nachhaltigkeit in Leitsektoren der deutschen Wirtschaft. Aktuell verfügbare digitale Lösungen setzen vor allem darauf, die Effizienz in bestehenden Prozessen zu steigern und auf diese Weise Energie- und Ressourcenverbrauch sowie Treibhausgasemissionen zu senken. Dieser inkrementelle Ansatz stärkt die ökologische Nachhaltigkeit und sollte auch in Zukunft weiter ausgebaut werden.

Die effektiven Hebel, die für das Erreichen der deutschen Klimaziele unbedingt fokussiert werden müssen, liegen aber in grundsätzlichen Anpassungen des Nutzungsverhaltens und der wirtschaftsweise mithilfe digitaler Lösungen – es geht darum, neue Geschäftsmodelle zu etablieren und Wertschöpfungs-systeme zu transformieren. Die Marktanalysen zeigen, dass diese Hebel noch nicht weitreichend genutzt werden – nicht zuletzt, weil sie die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle oder die Anpassung von Prozessen erfordern, also mit betriebswirtschaftlichen Herausforderungen in der ganzheitlichen Betrachtung von Digitalisierung und Nachhaltigkeit einhergehen.

Digitale Technologien sind „General Purpose Technologies“, die in der Wirtschaft mit unterschiedlichen Zielsetzungen Anwendung finden können. Das bedeutet, dass über den praktischen Einsatz für die Verringerung der Umweltbelastung die Rahmenbedingungen und damit zuletzt auch die Kosten für die Inanspruchnahme der Umwelt bei den Unternehmen entscheiden. Wird das Engagement zur Ressourcenschonung ökonomisch attraktiver, weil entweder die Preise des Ressourceneinsatzes steigen oder die staatliche Förderung dies günstiger macht, so werden digitale Lösungen auch vermehrt für die Ressourcenschonung eingesetzt. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass bei steigenden Kosten für die Unternehmen die Gefahr besteht, dass Produktion aus Deutschland in andere Regionen verlagert wird, wo geringere Umweltstandards vorherrschen – und somit insgesamt ein Schaden für die Umwelt entsteht.

Für wirkliche Digitainability, die neue Marktchancen über Effizienzsteigerung hinaus ermöglicht, bedarf es also intensiver Anstrengungen seitens aller Stakeholder in Politik und Wirtschaft. An diese Stakeholder richten sich die hier entwickelten Gestaltungsoptionen entlang der betrachteten Nachhaltigkeitshebel (digitale grüne Technologie, digitale grüne Produktion, digitale grüne Lösung, digitale grüne Nutzung und Circular Economy) in den Handlungsfeldern Effizienz und Effektivität. Ergänzt werden diese um Gestaltungsoptionen im Handlungsfeld Rahmenbedingungen, die für eine intensivere Nutzung digitaler Lösungen im Sinne der ökologischen Nachhaltigkeit angegangen werden sollten.

4.1 Handlungsfeld Effizienz

Die Marktstudie hat einerseits gezeigt, dass digitale Lösungen in allen betrachteten Sektoren eingesetzt werden, um die Effizienz bestehender Prozesse zu steigern und dadurch ökonomisch wie ökologisch positive Effekte zu erzielen. Andererseits wurde auch deutlich, dass diese Potenziale bisher in keinem Sektor komplett ausgeschöpft wurden und durch die weitere Diffusion digitaler Lösungen bestehende Lösungen durch ressourcenschonendere Alternativen substituiert oder optimiert werden können.

Digitale Technologien umweltschonender gestalten: Für eine ökologisch nachhaltige Digitalisierung – unabhängig davon, ob sie direkt zum Ziel hat, ökologische Nachhaltigkeit zu stärken oder nicht – muss der ökologische Fußabdruck der Erzeugung digitaler Lösungen reduziert werden. Dies betrifft insbesondere KI (herausragender Hebel für digitale Nachhaltigkeit) und Distributed-Ledger-Technologien (begrenzter Hebel für digitale Nachhaltigkeit). Für Softwareprodukte ist gezielte Grundlagenforschung zur ressourcenschonenden Programmierung notwendig, da diese in der Softwareentwicklung bislang nur sehr schwer messbar und daher wenig verbreitet ist. Weiterhin sollte eine Taxonomie entwickelt werden, die anwendungsbezogen die für das jeweilige Unternehmen bestmöglich geeignete Technologie zur Entwicklung einer digital-nachhaltigen Lösung darstellt. Sie sollte dem Grundsatz „so ressourcenintensiv wie nötig, so umweltschonend wie möglich“ entsprechen. Im Kontext des angesprochenen Green-IT-Ansatzes sollten in der Entwicklung von Software beziehungsweise der Herstellung von Hardware darauf aufbauend neben Effizienzindikatoren wie Rechenzeit und Kosten Nachhaltigkeitsindikatoren (zum Beispiel Energieeffizienz, Ressourceneffizienz) als Qualitätsindikatoren verankert werden, damit digitale



Lösungen selbst ökologisch nachhaltiger produziert werden. Standardisierungs- und Zertifizierungsregime (zum Beispiel DIN, ISO) sind hier zielführende Ansatzpunkte. Öffentliche und private Förderprogramme sollten Anreize für die Entwicklung von ökologisch nachhaltigen Lösungen, die auf verschiedenen digitalen Technologien beruhen, schaffen; hier besteht eine Marktchance für den deutschen Wirtschaftsstandort. Im Hinblick auf die öffentliche Förderung sind ressortübergreifende Initiativen wünschenswert, wie zum Beispiel der aktuelle Greentech-Förderrahmen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz und des Bundesministeriums für Bildung und Forschung.

Verfügbarkeit von digitalen nachhaltigen Lösungen popularisieren: Für eine vertiefte Nutzung von digitalen und nachhaltigen Lösungen müssen anwendende Unternehmen über alle Sektoren hinweg besser über deren Verfügbarkeit sowie insbesondere deren ökologische Nachhaltigkeits- und ökonomische Wertschöpfungspotenziale informiert werden. Die vorliegende acatech STUDIE macht hierfür den Anfang: Sie soll Initialzündung für die Entwicklung einer marktüberblickenden, fortlaufend aktualisierten Systematik sein, die potenziellen Anwendenden einem „Bauchladen“-Ansatz folgend einen Überblick über verfügbare digitale Lösungen mitsamt ihrer Umwelt- und Wertschöpfungseinflüsse bietet („Digitainability-Verzeichnis“). Dieser Marktüberblick könnte auf einer offenen Technologieplattform („Digitainability-Plattform“) abgebildet werden. Entwicklerinnen und Entwickler digitaler Lösungen könnten sich für die Aufnahme in das „Digitainability-Verzeichnis“ bewerben; so würde eine indirekte Incentivierung ermöglicht, und die Anwendenden hätten einen schnellen Überblick darüber, wie sie ihre eigene ökologische Nachhaltigkeit stärken könnten.

Adaption digitaler nachhaltiger Lösungen fördern: Bezüglich der in dieser Studie identifizierten Hebeltechnologien und digitalen Lösungen sollte in Folgeprojekten geklärt werden, warum diese bisher nur eingeschränkt angewandt werden – und darauf aufbauend, welche Anreize zur weiteren Verbreitung notwendig sind. Insbesondere KMU scheuen aufgrund hoher Anschaffungskosten oder mangelnden digitalen Know-hows oftmals den Einsatz digital-nachhaltiger Lösungen in Produktion und Entwicklung ihrer Produkte und/oder Services. Über Best-Practice-Kommunikation (siehe zum Beispiel KI-Landkarte der Plattform Lernende Systeme³⁴) könnte ihnen der langfristige Nachhaltigkeits- und Wertschöpfungsmehrwert digitaler und nachhaltiger Lösungen verdeutlicht werden. Anreize für die Adaption könnten zudem über Finanzierungs-

unterstützungen bei der Umrüstung auf ökologisch nachhaltigere, digitale Lösungen gesetzt werden. Gleichzeitig zeigt die Studie, dass ein Ausbau der digitalen Infrastruktur unabdingbar für eine gesteigerte Nutzung digitaler Technologien ist.

Nutzung digitaler Lösungen „as a Service“ stärken: Wesentlich für den kostengünstigen und zugleich ökologisch nachhaltigen Einsatz digitaler Lösungen sind die Bedarfsoptimierung durch einzelne Anwendende und die Bedarfsauslastung der digitalen Lösung insgesamt. Durch die Nutzung digitaler Lösungen „as a Service“ können entwickelnde Anbieter ihren Kundenstamm verbreitern und Einnahmen optimieren, während Nutzende die Lösung nur im Bedarfsfall und damit kostengünstig und umweltschonend einsetzen. „As a Service“-Modelle erfordern Schnittstellenoffenheit; Standardisierung und Open-Source-Ansätze sind hier hilfreiche Vehikel.

Rebound-Effekten digitaler Technologien entgegenwirken: Rebound-Effekte sind ein zentrales Hemmnis bei der Ausschöpfung der Potenziale für die ökologische Nachhaltigkeit durch Effizienzsteigerung, da die frei gewordenen Ressourcen (häufig Zeit oder Geld) für weitere Investitionen oder eine vermehrte Nutzung verwendet werden. Diese Effekte sind dem Prozess der Effizienzsteigerung inhärent, müssen aber reduziert oder vermieden werden, um ein möglichst großes Nachhaltigkeitspotenzial digitaler Lösungen auszuschöpfen. Eine nachhaltige Nutzung der frei gewordenen Ressourcen wäre beispielsweise das Investieren dieser Ressourcen in (noch) ökologischere Alternativen. So könnte durch die Effizienzsteigerung eine positive Spirale erzeugt werden. Dies ist jedoch in den meisten Kontexten nur dann ein zu erwartendes Szenario, wenn hinreichende Anreize bestehen, diese ökologischen Alternativen aufzugreifen.

4.2 Handlungsfeld Effektivität

Die bisher adressierten Gestaltungsoptionen zielen auf Effizienzsteigerungen durch den Einsatz digitaler Lösungen ab (doing the things right), die sich für Unternehmen sowohl aus Nachhaltigkeits- als auch aus Kostenperspektive (zum Beispiel durch reduzierten Energieverbrauch in der Produktion) kurz- bis mittelfristig amortisieren. Zur Erreichung der Klimaziele und zur Wahrung der planetaren Grenzen reichen Effizienzsteigerungen im Rahmen traditioneller Wertschöpfungsparadigmen (zum Beispiel Produktnutzung im Eigentum, Cradle-to-Grave) allerdings nicht aus: Sie ignorieren Rebound-Effekte

34 | Vgl. <https://www.plattform-lernende-systeme.de/ki-landkarte.html>.

der Nutzung und setzen kaum Anreize für eine kreislauforientierte Betrachtung der Produktnutzung. Es bedarf effektiver Ansätze (doing the right things), und diese erfordern für die volle Entfaltung des Nachhaltigkeitspotenzials eingesetzter digitaler Technologien die Bereitschaft, neue digitale nachhaltige Geschäftsmodelle zu entwickeln. Dabei muss zwangsläufig auf kurzfristige, aber umweltschädliche Rentabilität zugunsten langfristiger, aber dafür ökologisch und ökonomisch nachhaltiger Wertschöpfung verzichtet werden, um der kreislauforientierten Wirtschaftsweise ein Primat vor der produkt- und Output-orientierten Wirtschaftsweise einzuräumen.

Technische Plattformen stärken: Brancheninterne und -übergreifende Synergien für ökologische Nachhaltigkeit werden bisher nur bedingt genutzt. Digitale Plattformen, die die Zusammenführung von sektorspezifischen Daten und den Zugriff sowie die Aus- und Verwertung vorhandener Daten für unterschiedliche Akteure ermöglichen, können ökologische Nachhaltigkeits- und Wertschöpfungspotenziale schaffen. Sie gilt es zu stärken, auch um die Neuentwicklung digital-nachhaltiger Geschäftsmodelle voranzutreiben – sowohl im B2B- als auch im B2C-Bereich (grüne Nutzung). In einigen Sektoren besteht hier besonderes Potenzial:

- **Verkehr und Logistik:** Im Sektor Verkehr kann durch die Vernetzung bestehender Mobilitätsanbieter und die Integration ihrer Services auf einer einzigen digitalen Plattform den Nutzerinnen und Nutzern ein barrierefreies Angebot zur ökologischen Nachhaltigkeitsoptimierung ihres Mobilitätsverhaltens gemacht werden, indem Anreize für eine stärkere Nutzung des öffentlichen Personennahverkehrs oder von Sharing-Angeboten gesetzt werden und damit der Individualverkehr reduziert wird. Anbieter sehen in solchen Plattformen allerdings die Gefahr, Kundenbindung zu verlieren. Ein Ansatzpunkt könnte sein, alle Mobilitätsservices zwar auf einer digitalen Plattform zu vereinen, die für alle Anbieter nutzbar ist (IT-Backbone), ihnen aber die Möglichkeit zu bieten, ihre eigene Benutzeroberfläche zu verwenden. Um solche Anwendungen zu fördern und gleichzeitig die Nutzerinnen und Nutzer mit den bestmöglichen Daten zu versorgen, sollte die öffentliche Hand mit gutem Beispiel vorangehen und die ihr zugänglichen Verkehrsdaten zur Verfügung stellen. Eine Förderung von Plattformen, die explizit nachhaltige Mobilitätslösungen bevorzugen, ist zusätzlich angebracht. Erste Schritte in diese Richtung werden vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr bereits unternommen.³⁵
- **Immobilienwirtschaft:** In der Immobilienwirtschaft fallen Daten zum Ressourcenverbrauch in Gebäuden an, die durch digitale Lösungen, wie beispielsweise Smart Meter oder intelligente Wärmemengenzähler, erfasst werden. Die daraus hervorgehenden Informationen sind für alle beteiligten Parteien im Wertschöpfungsnetzwerk der Bau- und Immobilienwirtschaft relevant. Aktuell sind diese Daten einerseits jedoch oft nicht zeitnah zugänglich, andererseits bestehen für viele Beteiligte derzeit keine Anreize, sparsam mit den Ressourcen umzugehen. Mit einer echtzeitfähigen Verbrauchskontrolle wäre die Schaffung von mehr Transparenz für die tatsächlichen Nutzerinnen und Nutzer der Ressourcen möglich; gleichzeitig ließen sich geeignete ökonomische Anreize setzen. Der Zugang zu den Daten würde zudem vielfältige Alternativen durch Vergleichbarkeit mit anderen Nutzenden ermöglichen. So könnten Einsparpotenziale identifiziert oder ressourcenschonende Routinen geteilt werden. Die Gebäudeverwaltung könnte durch eine offenere Datenkultur und den schnelleren Zugang zu Verbrauchsdaten frühzeitig durch bauliche Maßnahmen oder Modernisierungen in den Gebäuden mit dem relativ gesehen höchsten Verbrauch aktiv werden. Digitale Lösungen könnten den Wärmeverbrauch von Gebäuden mittels Einzelraumregelung, wetterbasierter Regulation und anderer Werkzeuge signifikant reduzieren.
- **Baugewerbe:** Im Baugewerbe können Plattformlösungen einerseits zur Effizienzsteigerung beitragen und andererseits neue Konzepte wie die Modularisierung in der Planungsphase neuer Gebäude fördern. Zentral ist hierbei das „Building Information Modeling“ (BIM), auf dessen Basis eine durchgehende Digitalisierung der Informationen, die für die Planung sowie die Realisierung von Bauprojekten relevant sind, umsetzbar ist. Auf dieses Modell können alle am Bauprojekt Beteiligten zugreifen. Dies ermöglicht mehr Transparenz sowie verbesserte Planungs- und Koordinationsmöglichkeiten, die schließlich zu Ressourceneinsparungen und somit positiven ökologischen Effekten führen können. Der hohe Grad an Digitalisierung in der frühen Planungsphase erlaubt, zum Beispiel durch eine verbesserte Vernetzung mit der Wasserwirtschaft, auch die Identifikation neuer Einsparmöglichkeiten mit ökonomischem und ökologischem Mehrwert, wie etwa der Modularisierung von Bauelementen, wodurch die Vorteile einer Massenfertigung genutzt werden, ohne die Individualität der Gebäude aufgeben zu müssen. Algorithmen können dann in der digitalen Planung unterstützend genutzt werden, um Einsatzmöglichkeiten für die modularisierten Bauteile zu identifizieren.

35 | Vgl. <https://bmdv.bund.de/DE/Themen/Digitales/Mobilithek/mobilithek.html>.



Hierfür müsste eine digitale Plattform zur Harmonisierung der Daten und zur Standardisierung der Modularisierung geschaffen werden. Zusätzlich könnte ein Einsatz von BIM als Standard in öffentlichen Bauprojekten eine Sogwirkung auf die privaten Bauprojekte haben. Die Virtualisierung von Baugenehmigungsprozessen über BIM würde zudem signifikante Bürokratisierungshürden reduzieren und sollte ebenfalls in Betracht gezogen werden.

Einsatz digitaler Lösungen für Circular Economy fördern:

Circular Economy als Gegenkonzept zur derzeit größtenteils vorherrschenden Linearwirtschaft ist eine ganzheitliche Systemlösung, um die planetaren Belastungsgrenzen wahren und auch zukünftigen Generationen ein gutes Leben auf der Erde ermöglichen zu können.³⁶ Digitale Lösungen können einen Wandel in Richtung Circular Economy nicht aus sich heraus anstoßen, haben jedoch das Potenzial, eine entscheidende Rolle bei der Umsetzung zirkulärer Geschäftsmodelle zu spielen, insbesondere zur Ressourcenoptimierung. Gerade die in einigen Sektoren bereits in Anwendung beziehungsweise Entwicklung befindlichen digitalen Zwillinge, Produktpässe (zum Beispiel Batterypass³⁷) und Datenräume (zum Beispiel Mobility Data Space³⁸) sind hier geeignete Ansatzpunkte, wenn sie umfassend genutzt werden. Die Entwicklung von auf diesen Lösungen aufbauenden kreislauforientierten Geschäftsmodellen könnte mit einem eigenen Förderrahmen umfangreicher adressiert werden. Forschungsbedarf besteht zudem hinsichtlich Sustainable Procurement, also dahingehend, welche Produkte beziehungsweise Rohstoffe einerseits durch nachhaltige Alternativen substituiert werden können und welche regulatorischen Bedingungen andererseits dafür notwendig sind. Gleichzeitig ermöglichen digitale Lösungen durch die Virtualisierung ein nachhaltigeres Produktdesign in Bezug auf die Reparaturfähigkeit, Modularisierbarkeit sowie Trennbarkeit der Komponenten am Ende des Lebenszyklus. Diese Faktoren verbessern dementsprechend die Kreislauffähigkeit zum Beispiel im Bereich der Produktion oder der Chemie- und Pharmaindustrie und sollten folglich incentiviert werden.

Win-win-Geschäftsmodelle für grüne Nutzung stärken: Die Entwicklung grüner Lösungen, die eine Änderung des Nutzungsverhaltens bewirken, ist ein entscheidender effektiver Hebel für die Stärkung ökologischer Nachhaltigkeit. Entwickelnde fürchten jedoch häufig, dass solche Lösungen ihre Umsätze kannibalisieren (zum Beispiel, dass Shared Mobility die

Verkaufszahlen von Autos drücken könnte). Hier bedarf es intensiverer Öffentlichkeitsarbeit, die die Vorteile grüner Lösungen verdeutlicht, und konkreter Anwendungsfälle, die eine grünere Nutzung katalysieren und so Unternehmen den ökonomischen Mehrwert von digitalen nachhaltigen Lösungen vor Augen führen. Ein Anwendungssektor für die Entwicklung von Modellprojekten kann in diesem Zusammenhang die Landwirtschaft sein, da hier bereits Projekte mit Bezug zu grüner Nutzung existieren (zum Beispiel Smart Services für Landmaschinen, die Umsätze diversifizieren und Nachhaltigkeit stärken, oder regionale Vertriebsplattformen zur Direktvermarktung von lokalen Produkten). Deren Analyse sowie die Weiterentwicklung von Geschäftsmodellen verdeutlichen wechselseitige Konsumenten-Produzenten-Anreize, also Win-win-Geschäftsmodelle für grüne Nutzung – sie gilt es in andere Sektoren zu übertragen: Ideenwettbewerbe, Hackathons oder Geschäftsmodell-Contests böten sich hierfür an.

Interdisziplinäre Forschung zu Umwelteinflüssen und Effektivitätshebeln stärken:

Grundsätzlich ist es angesichts des beschriebenen Mangels an verfügbaren digitalen Lösungen nötig, die ökologische Nachhaltigkeit effektiv zu stärken und einen anwendungsnahen Forschungs- und Entwicklungsaufbruch zu forcieren. Erste Schritte in diese Richtung wurden beispielsweise mit dem GreenTech-Innovationswettbewerb vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz und Bundesministerium für Bildung und Forschung unternommen, aber ein weiterer Ausbau wäre hinsichtlich folgender Punkte zielführend: Es bedarf praxisnaher, strategisch angelegter und vor allem interdisziplinärer Forschung und Entwicklung zu digitalen Lösungen, die ökologisch nachhaltige Nutzungsanpassungen beziehungsweise zirkuläre Geschäftsmodelle vorantreiben. Forschungsinitiativen sollten explizit darauf abzielen, digitale Lösungen so zu gestalten, dass sie über durch sie angestoßene Transformationen des Nutzungsverhaltens und/oder die Stärkung einer zirkulären Wirtschaftsweise den Umwelteinfluss einer entsprechenden Branche effektiv reduzieren. Ein dedizierter öffentlicher Förderauftrag in diese Richtung könnte hilfreich sein. In der Zusammenstellung der Forschungs- und/oder Entwicklungsteams – insbesondere, wenn sie auf eine nachhaltigkeitssteigernde Änderung des Nutzungsverhaltens zielen – sollte Interdisziplinarität Kernvoraussetzung sein: Vor allem psychologische und soziologische Expertise ist für die effektive, ökologisch nachhaltige Änderung des Nutzungsverhaltens durch digitale Lösungen hilfreich.

36 | Vgl. acatech 2021.

37 | Vgl. <https://www.acatech.de/projekt/batteriepass-made-with-germany-umsetzung-einer-neuen-generation-digitaler-produkthandhabung>.

38 | Vgl. <https://www.mobility-data-space.de/>.

4.3 Handlungsfeld Rahmenbedingungen

Da eine Vielzahl an digitalen Lösungen, die positive Effekte auf die ökologische Nachhaltigkeit haben, aufgrund von Anschaffungskosten und aufwendiger Geschäftsprozessintegration oft mit ökonomischen Nachteilen einhergehen, werden diese von Unternehmen häufig nur vereinzelt und nicht strategisch eingesetzt. Um die gesetzten Nachhaltigkeitsziele der Bundesregierung bis 2030 zu erreichen, müssen die Rahmenbedingungen so ausgestaltet werden, dass eine schnellere und umfassendere digitale Nachhaltigkeitstransformation auch ökonomisch attraktiv ist.

CO₂-Bepreisung ausweiten: Ein zentrales Regulierungswerkzeug für eine Beschleunigung der Nachhaltigkeitstransformation ist weiterhin die Bepreisung des CO₂-Ausstoßes. Eine von vielen Akteuren geforderte höhere Bepreisung würde starke Anreize für eine nachhaltigere Nutzung schaffen und dadurch indirekt auch die Nutzung digitaler Werkzeuge und Technologien reduzieren, die mit einem sehr hohen Energieverbrauch einhergehen (zum Beispiel Bitcoin-Mining). Eine höhere CO₂-Bepreisung fördert auf diese Weise sowohl die ökologisch nachhaltige Digitalisierung als auch die digitale ökologische Nachhaltigkeit. Digitale Lösungen würden hierbei wieder als Enabler fungieren, um eine solche Regulierung umsetzbar und transparent zu gestalten. Das Werkzeug einer Bepreisung negativer Umwelteinflüsse könnte auch auf andere Umweltindikatoren (zum Beispiel Ressourcenverbrauch) übertragen werden und wurde beispielsweise bereits als Instrument zur Vermeidung von Rebound-Effekten erkannt, aber bisher nicht umgesetzt.³⁹ Der Gesetzgeber sollte daher nach eingehender Evaluierung der Wirksamkeit der CO₂-Bepreisung eine Ausweitung auf weitere Umweltindikatoren ins Auge fassen.

Sandboxing stärken: Für die Entwicklung digitaler Lösungen sind Innovationsräume erforderlich, in denen technische Machbarkeitsgrenzen, Umsetzbarkeit und Praxistauglichkeit getestet werden können. Das Konzept der „Regulatory Sandbox“ beziehungsweise des Reallabors, nach dem für einen begrenzten Zeitraum und für eine kleine Zahl an Beteiligten in einem Modellprojekt Regularien gelockert werden, ist auch für Digitainability-Projekte zu testen, insbesondere im Hinblick auf Regulatorik, die die Nutzung von Datensätzen verhindert. Auf diese Weise können neue digitale Lösungen, wie beispielsweise Smart Meter, in kleinem Maßstab in der Praxis getestet werden,

ohne dass im Vorfeld alle theoretischen Bedenken vollumfänglich geklärt werden müssen. Die Daten und Erfahrungen aus diesen Praxistests können dann für den Regulierungsprozess genutzt werden. Gleichzeitig können Entwickelnde die Sandboxing-Daten für die Erarbeitung neuer Lösungen verwenden. Ähnliches gilt für die vereinfachte Bereitstellung von Daten; zum Beispiel in der Wasserwirtschaft schränkt die föderale Datenhaltung eine nachhaltigere Wasserwirtschaft ein und sollte entsprechend vereinheitlicht werden. Somit kann der Innovationsprozess deutlich früher ansetzen, wodurch Marktchancen wahrgenommen werden können. Es ist ratsam, bis hin zur regionalen Ebene regulative Handlungsspielräume für die Etablierung von Reallaboren zu schaffen.

Monitoring-System für die Messung von Umwelteinflüssen von Branchen und digitalen Lösungen etablieren: Nicht in allen, aber doch in vielen Sektoren mangelt es an einer belastbaren Datenlage zur Bewertung des Umwelteinflusses sowie potenzieller ökologischer Wertschöpfungspotenziale digitaler Lösungen (speziell im Sektor Wasserwirtschaft sowie in Verkehr und Logistik). Aktuell gibt es kein einheitliches Konzept zur Bewertung von Umwelteinflüssen. Häufig liegt der Fokus allein auf Teilaspekten der ökologischen Nachhaltigkeit, wie im Fall der CO₂-Äquivalente. Die Sustainable-Development-Goals-Indikatoren stellen hier einen Ausgangspunkt dar, jedoch sollte im Dialog aus Wissenschaft und Wirtschaft untersucht werden, welche Daten zur allgemeinen Nachhaltigkeitsbewertung notwendig sind, inwieweit diese bereits erfasst werden beziehungsweise überhaupt erfasst werden können und wie daraus eine vereinheitlichte Bewertung zur Einordnung von Digitalisierungsmaßnahmen abgeleitet werden kann. Darauf aufbauend wäre die Entwicklung einer fundierten und kontinuierlich aktualisierter Indikatrix hilfreich, die den jeweiligen negativen Umwelteinfluss misst, der einzelnen Branchen zuzurechnen ist; Rebound-Effekte müssten hierbei mitbetrachtet werden. Daraus kann eine Dringlichkeitsmatrix entwickelt werden, die die Priorisierung und Ausrichtung von Forschungs- und Entwicklungsinitiativen digitaler nachhaltiger Lösungen innerhalb von Sektoren und über Sektorengrenzen hinweg evidenzbasiert anleiten kann. Gleichzeitig bedarf es eines Monitoring-Systems der Umwelteinflüsse digitaler Lösungen, damit es Unternehmen – Entwickelnden wie Anwendenden – möglich ist, Digitalisierung und ökologische Nachhaltigkeit strategisch gemeinsam zu betrachten. Dieses Monitoring-System könnte auf einer Digitainability-Plattform integriert werden, die zudem als Heimat für Tools dienen könnte, die auf einem zu entwickelnden Reifegradmodell für ökologisch nachhaltige Digitalisierung basieren.



Anreizsysteme entlang eines Digitainability-Monitoring-Systems ausrichten: Um Digitainability als Wettbewerbsfaktor der deutschen Wirtschaft zu verankern, ist es ratsam, die Entwicklung digitaler nachhaltiger Lösungen und deren Einsatz entlang klarer, aus dem zu entwickelnden Digitainability-Monitoring-System entliehener Indikatoren zu incentivieren. Förderprogramme könnten beispielsweise auf die Verwendung bestimmter Technologien oder einen positiven Umwelteinfluss auf bestimmte Umweltindikatoren abzielen – ihr Erfolg wäre anhand dieser Indikatoren klar messbar. Gleiches gilt für entwickelte digitale Lösungen, die ihren Umwelteinfluss transparent und damit ihren Beitrag zur ökologischen Nachhaltigkeit als willkommenes Werbemittel auf dem Markt nutzen könnten. Zudem wäre die Incentivierung entlang des Monitoring-Systems ein sinnvolles Instrument, um dynamisch auf sich ändernde Umwelteinflüsse, neue Regulatorik oder angepasste Zielsetzungen reagieren zu können.

Interdisziplinären Stakeholder-Austausch zu Digitainability etablieren: Die Sensibilität für die entsprechenden Interdependenzen muss bei allen Stakeholdern gestärkt werden. Deshalb bedarf es der Vernetzung von Akteurinnen und Akteuren aus Wirtschaft, Wissenschaft, Gesellschaft und Politik, um (1) die Möglichkeiten der ökonomisch sinnvollen Digitalisierung aus-

zuloten, (2) deren ökologischen Effekt zu prognostizieren und (3) darauf aufbauend Rahmenbedingungen zu schaffen, die eine Digitalisierung zur rein ökonomischen Optimierung verhindern, möglichen Rebound-Effekten vorbeugen und wichtige Aspekte der Digitalisierung (zunehmende Bedeutung von Datenschutz und Cybersicherheit) miteinbeziehen. Dazu könnten konkrete, sektorspezifische Anwendungsfälle entwickelt werden, die zur Ableitung von Leitlinien dienen.

Digitainability ganzheitlich unter ökologischen, sozialen und ökonomischen Aspekten betrachten: Neben den beschriebenen Nachholbedarfen im Bereich der ökologischen Nachhaltigkeit schließt der Begriff Nachhaltigkeit immer auch soziale und ökonomische Aspekte, insbesondere in Bezug auf die Nutzung digitaler Technologien, mit ein. Im Rahmen dieser acatech STUDIE wurde ein Fokus auf Digitainability aus ökologischer Warte gesetzt – Digitainability umfasst aber neben der ökologischen auch die ökonomische und soziale Nachhaltigkeitsperspektive. Somit ist es unerlässlich, dass das Digitainability-Konzept dieser holistischen Perspektive entsprechend weiterentwickelt wird und auf ihm aufbauende Initiativen und digitale Lösungen Nachhaltigkeit ganzheitlich verstehen. Nur so kann Digitalisierung zum nachhaltigen Wohl der Gesellschaft genutzt werden!

Übersicht der Gestaltungsoptionen

Dimension/ Akteure	Politik	Gesellschaft	Unternehmen	Wissenschaft
-----------------------	---------	--------------	-------------	--------------

Handlungsfeld Effizienz

Steigerung der Verfügbarkeit und Adaption digital-nachhaltiger Lösungen	Initiation von ressort-übergreifenden Förderinitiativen für die Umrüstung auf ökologisch nachhaltige, digitale Lösungen	Aufbau von Kompetenzen zur nachhaltigen Nutzung von Digitalisierung bei den Anwendenden Aufbau eines Digitalability-Verzeichnisses für ökologisch nachhaltige, digitale Anwendungen	Weiterentwicklung der Prozesseffizienz bei gleichzeitiger Untersuchung des notwendigen Maßes an Digitalisierung	Forschung zur Entwicklung von Methoden zur Minimierung des Ressourcenverbrauchs (bspw. von Softwareanwendungen)
Vermeidung von Rebound-Effekten	Incentivierung von Langlebigkeit und Wiederverwertbarkeit sowie von ökologischen Alternativen bezogen auf die jeweiligen Geschäftsmodelle	Umsetzung einer aktiven Kommunikation der ökologischen Folgen von übermäßiger Technologiennutzung	Entwicklung alternativer, Geschäftsmodelle durch Digitalisierung oder Substitution Fokussierung der durch Effizienzsteigerungen generierten zusätzlichen Ressourcen auf ökologische Alternativen	Entwicklung von Methoden zur Vermeidung psychologischer Rebound-Effekte bei Nutzenden

Handlungsfeld Effektivität

Plattformlösungen	Ausbau der digitalen Infrastruktur sowie Sicherstellung der Datensicherheit Förderung der Nutzung von Crowd-Data	Aufbau von Kompetenzen zur nachhaltigen Nutzung von Digitalisierung bei den Anwendenden Definition von Sicherheitsanforderungen für die geteilte Datennutzung	Entwicklung einheitlicher Datenschnittstellen zum Aufbau von regionalen, anwendungsbezogenen Plattformen	Entwicklung von einheitlichen Datenstandards und Konzepten zur sicheren Datenteilung
Circular Economy	Einführung eines regulatorischen Rahmens für digitale Produktpässe Schaffung von ökonomischen Anreizen für die Umsetzung von Circular Economy	Förderung der intersektoralen Vernetzung zur Erschließung von Anknüpfungspunkten in bisher getrennten Wertschöpfungsketten	Fokussierung eines nachhaltigen Produktdesigns in Bezug auf Reparaturfähigkeit, Modularisierbarkeit und Recyclingfähigkeit	Erforschung von nachhaltigen Rohstoffen und Produkten als Basis für Sustainable Procurement Entwicklung von Metriken zur Bewertung der Nachhaltigkeit entlang der Wertschöpfungskette
Neue Geschäftsmodelle	Schaffung von Förderrahmen explizit für kreislauforientierte beziehungsweise digitalisierte Geschäftsmodelle	Kommunikation der Vorteile grüner Lösungen anhand konkreter Anwendungsfälle	Entwicklung von Modellprojekten zur Förderung von grüner Nutzung	Analyse von bestehenden Anwendungen mit grüner Nutzung Interdisziplinäre Erforschung von Anreizmechanismen für grüne Nutzung



Handlungsfeld Rahmenbedingungen

CO ₂ -Bepreisung	Festlegung einer CO ₂ -Bepreisung zur Beförderung einer ökologisch nachhaltigen Wirtschaft	Entwicklung von Korridoren für die CO ₂ -Bepreisung zur Kopplung von ökonomischen und ökologischen Interessen	Implementierung einer CO ₂ -Bewertung bezogen auf die gesamte Wertschöpfungskette	Entwicklung von Metriken für die CO ₂ -Bewertung von digitalen Geschäftsmodellen
Sandboxing	Ermöglichung von Test-szenarien mit vereinfachten Regularien Erweiterung des Handlungsspielraums auf regionaler Ebene zum Beispiel für die Etablierung von Reallaboren	Entwicklung von Modellszenarien zur Erprobung neuer Regularien	Umsetzung von Test-szenarien inklusive einer nachhaltigkeitsbezogenen Ergebnisbewertung Förderung des Austauschs von Sandboxing-Daten	Bereitstellung von Reallaboren durch Hochschulen und Universitäten
Monitoring und Incentivierung von Digitainability	Initiation von Förderprogrammen zur Steigerung der Nutzung von Technologien mit Hebelwirkung in Bezug auf ökologische Nachhaltigkeit	Entwicklung von sektorspezifischen Anwendungsfällen als Basis für ein Reifegradmodell für ökologisch nachhaltige Digitalisierung	Erweiterung der Datenerfassung in der Wertschöpfungskette als Basis für die Nachhaltigkeitsbewertung	Entwicklung von Modellen zur Vorhersage des Effekts von Digitalisierungsmaßnahmen auf die ökologische Nachhaltigkeit Entwicklung evidenzbasierter Reifegradmodelle zur Digitainability-Transformation

Tabelle 1: Übersicht der Gestaltungsoptionen in Abhängigkeit der Handlungsfelder und aufgeteilt nach Stakeholdern (Quelle: eigene Darstellung)





Literatur

acatech 2020

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten – UPDATE 2020*. URL: <https://www.acatech.de/publikation/industrie-4-0-maturity-index-update-2020/> [Stand: 08.02.2023].

acatech 2021

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Circular Economy Roadmap für Deutschland*. URL: <https://www.acatech.de/publikation/circular-economy-roadmap-fuer-deutschland/download-pdf?lang=de> [Stand: 11.05.2021].

acatech 2022

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Blinde Flecken in der Umsetzung von Industrie 4.0 – identifizieren und verstehen*. URL: <https://www.acatech.de/publikation/blinde-flecken-i40/download-pdf?lang=de> [Stand: 10.03.2022].

Bitkom 2021

Bitkom e. V. (Hrsg.): *Klimaeffekte der Digitalisierung*. URL: https://www.bitkom.org/sites/main/files/2021-10/20211010_bitkom_studie_klimaeffekte_der_digitalisierung.pdf [Stand: März 2021].

Bitkom 2022

Bitkom e. V. (Hrsg.): *Die Digitalisierung der Landwirtschaft*. URL: <https://www.bitkom.org/sites/main/files/2022-05/Bitkom-Charts%20Landwirtschaft.pdf> [Stand: 12.05.2022].

BMWi 2020

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *Schwerpunktstudie Digitalisierung und Energieeffizienz Erkenntnisse aus Forschung und Praxis Schwerpunkte Digitalisierung und Energieeffizienz 2020*. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/schwerpunktstudie-digitalisierung-energieeffizienz.pdf?__blob=publicationFile&v=12 [Stand: November 2020].

BMWi 2021

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *Trend- und Technologieradar*. URL: https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/DE/Digitalisierungsindex/Publikationen/publikation-download-technologie-trendradar-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [Stand: Oktober 2021].

Catena-X 2022

Catena-X Automotive Network e. V. (Hrsg.): *Catena-X: The First Open and Collaborative Data Ecosystem*. URL: <https://catena-x.net/en/about-us> [Stand: 10.02.2023].

DESI 2022

Europäische Kommission (Hrsg.): *Digital Economy and Society Index (DESI) 2022 Germany*. URL: <https://ec.europa.eu/news-room/dae/redirection/document/88705> [Stand: 06.01.2023].

DVGW 2023

Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs (Hrsg.): *Digitalisierung in der Wasserversorgung*. URL: <https://www.dvgw.de/themen/digitalisierung> [Stand: 27.01.2023].

DWA 2020

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA): *DWA-Positionen Digitalisierung in der Wasserwirtschaft – DWA nimmt die Herausforderungen der digitalen Entwicklung an*. URL: https://de.dwa.de/files/_media/content/01_DIE_DWA/Politikinformationen/Positionspapiere/Positionspapier_Digitalisierung_in_der_Wasserwirtschaft_2020_Netz.pdf [Stand: Januar 2020].

ERK 2022

Expertenrat für Klimafragen (ERK) (Hrsg.): *Zweijahresgutachten 2022. Gutachten zu bisherigen Entwicklungen der Treibhausgasemissionen, Trends der Jahresemissionsmengen und Wirksamkeit von Maßnahmen*. URL: https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2022/11/ERK2022_Zweijahresgutachten.pdf [Stand: 24.01.2023].

Gupta 2022

Gupta, S.: „Mindful Application of Digitalization for Sustainable Development: The Digitainability Assessment Framework“. In: *Sustainability*, 14: 5, 2022, S. 3114.

NOcsPS 2023

Universität Hohenheim (Hrsg.) URL: <https://nocps.uni-hohenheim.de/startseite> [Stand 24.01.2023]

Öko-Institut e. V. 2021

Öko-Institut e. V. (Hrsg.): *Anreizsysteme für eine ökologisch nachhaltige Digitalisierung in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU)*. URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Nachhaltige-Digitalisierung-KMU.pdf> [Stand: 03.12.2021].

Plattform Industrie 4.0 2019

Plattform Industrie 4.0 Geschäftsstelle (Hrsg.): *Die Verwaltungsschale im Detail – von der Idee zum implementierbaren Konzept*. URL: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/verwaltungsschale-im-detail-pr%C3%A4sentation.html> [Stand: 10.02.2023].

Ramesohl et al. 2021

Ramesohl, S./Gunnemann, A./Berg, H.: *Digitalisierung gestalten – Transformation zur Nachhaltigkeit ermöglichen*, Studie im Rahmen des Projekts „Shaping the Digital Transformation“, Wuppertal 2021.

Santarius 2020

Santarius, T.: „Digitalization and the Decoupling Debate: Can ICT Help to Reduce Environmental Impacts While the Economy Keeps Growing?“. In: *Sustainability*, 12: 18, 2020, S. 7496.

Statistisches Bundesamt 2008

Statistisches Bundesamt (Hrsg.): *Klassifikation der Wirtschaftszweige*. URL: <https://www.destatis.de/static/DE/dokumente/klassifikation-wz-2008-3100100089004.pdf> [Stand: Dezember 2008].

TCS 2021

Tata Consultancy Services Deutschland GmbH (Hrsg.): *Nachhaltig geht nur digital – Wie Deutschland mit KI und Co. die Zukunft gestaltet*. URL: https://www.tcs.com/content/dam/tcs-germany/pdf/TrendstudieDigitalisierung/2021_TCS-Studie_Nachhaltigkeit_digital.pdf [Stand: 31.03.2021].

TU Berlin 2022

Technische Universität Berlin (Hrsg.): *Digitalization for Sustainability (D4S), 2022: Digital Reset. Redirecting Technologies for the Deep Sustainability Transformation*. URL: https://digitalization-for-sustainability.com/wp-content/uploads/D4S_DigitalReset_Web.pdf [Stand: 19.10.2022].

UBA 2016

Umweltbundesamt (Hrsg.): *Rebound-Effekte: Wie können sie effektiv begrenzt werden?* URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rebound-effekte_wie_koennen_sie_effektiv_begrenzt_werden_handbuch.pdf [Stand: Juni 2016].

UBA 2022

Umweltbundesamt (Hrsg.): *Digitalisierung Wasserwirtschaft*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/recht-oekonomie-digitalisierung/digitalisierung-wasserwirtschaft> [Stand 19.07.2022].





Über acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

Weitere Informationen unter www.acatech.de



Herausgeber:

Prof. Dr. Dr. h. c. Christoph M. Schmidt

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Geschäftsstelle
Karolinenplatz 4
80333 München

Reihenherausgeber:

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2023

Geschäftsstelle	Hauptstadtbüro	Brüssel-Büro
Karolinenplatz 4	Pariser Platz 4a	Rue d'Egmont/Egmontstraat 13
80333 München	10117 Berlin	1000 Brüssel (Belgien)
T +49 (0)89/52 03 09-0	T +49 (0)30/2 06 30 96-0	T +32 (0)2/2 13 81-80
F +49 (0)89/52 03 09-900	F +49 (0)30/2 06 30 96-11	F +32 (0)2/2 13 81-89
info@acatech.de		
www.acatech.de		

Geschäftsführendes Gremium des Präsidiums: Prof. Dr. Ann-Kristin Achleitner, Prof. Dr. Ursula Gather, Dr. Stefan Oschmann, Manfred Rauhmeier, Prof. Dr. Christoph M. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner

Vorstand i.S.v. § 26 BGB: Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier

Empfohlene Zitierweise:

Schmidt, C. M. (Hrsg.): *Digitainability. Digitale Schlüsseltechnologien für ökologisch nachhaltiges Wirtschaften: Marktpotenziale und strategische Implikationen* (acatech STUDIE), München 2023. DOI: https://doi.org/10.48669/aca_2023-6

ISSN 2193-8962

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften • 2023

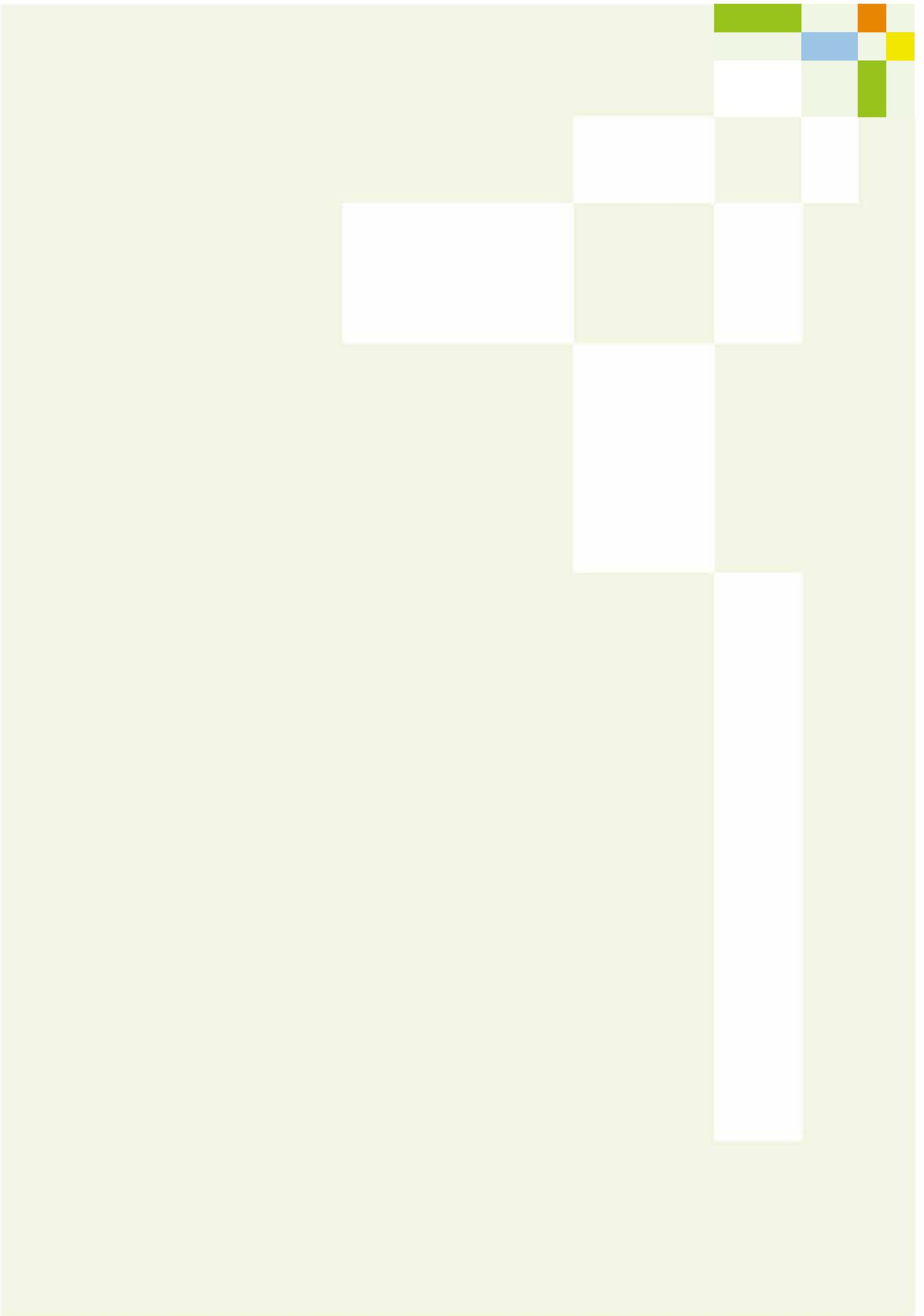
Koordination: Jan Biehler, Dr. Anna Frey

Lektorat: Lektorat Berlin

Layout-Konzeption, Konvertierung und Satz: GROOTHUIS. Gesellschaft der Ideen und Passionen mbH für Kommunikation und Medien, Marketing und Gestaltung; groothuis.de

Titelfoto: © Denny Müller

Die Originalfassung der Publikation ist verfügbar auf www.acatech.de.





Digitalisierung und Nachhaltigkeit sind die zwei großen Transformationen unserer Zeit. Die Verbindung beider Aspekte bietet die Möglichkeit, materiellen Wohlstand zu bewahren und zugleich die deutschen Klimaziele zu erreichen. Digitainability kann ein zentraler Ansatzpunkt sein, um Wirtschaftswachstum von den daraus entstehenden negativen ökologischen Folgen zu entkoppeln. Voraussetzung dafür ist die Weiterentwicklung digitaler Technologien und ökologisch nachhaltiger, digitaler Lösungen in Unternehmen, damit ein produktives Verhältnis zwischen ökonomischen Anreizen und ökologischer Nachhaltigkeit entsteht.

Die vorliegende acatech STUDIE evaluiert den Status quo von Digitainability in der deutschen Wirtschaft und zeigt Gestaltungswege zur Vertiefung auf: Mittels einer ökologischen Marktanalyse werden die aktuell verfügbaren digitalen Lösungen mit positiven Auswirkungen auf die ökologische Nachhaltigkeit identifiziert; im Fokus stehen acht Leitsektoren der deutschen Wirtschaft. Eine ökonomische Marktanalyse liefert Daten zur aktuellen Wertschöpfung von Digitainability und zeigt ihr Potenzial im Jahr 2030 auf. Darauf aufbauend liefert die Studie Gestaltungsoptionen, wie mit dem Einsatz digitaler Technologien die ökologische Nachhaltigkeit weiter verbessert werden kann.