

SEED-Index 2023

Sustainable
Economic
Efficiency through
Digitalization

seed⁺





**Sustainable Economic
Efficiency through Digitalization**

Der neu geschaffene SEED-Index ist ein Pulsmesser für die Digitalisierung der deutschen Wirtschaft. Er verknüpft Dekarbonisierung und Profitabilität, zwei zentrale Effekte der Digitalisierung, und bewertet die Entwicklung in fünf Schlüsselsektoren. Damit zeigt der Index, wie weit die Unternehmen bei der doppelten Transformation, der sogenannten Twin Transition, sind. Die dem Index zugrunde liegende Studie ermittelte dafür, in welchem Maße Unternehmen heute schon digitale Technologien nutzen, um ihre CO₂-Emissionen zu senken und ihre Profitabilität zu steigern. Sie beantwortet die Frage, wie zukunftsfähig die deutsche Wirtschaft ist.

seed

Sustainable Economic
Efficiency through Digitalization



**Besuchen Sie die Webmag-Version,
um die Studie interaktiv zu erleben.**



Inhalt

| | |
|---|-----------|
| 1 SEED-Index | 9 |
| 1.1 Einführung | 9 |
| 1.2 Dekarbonisierung | 18 |
| 1.3 Profitabilität | 22 |
| 1.4 Adaption digitaler Technologien | 25 |
| 2 Sektorauswertung | 30 |
| 2.1 Sektor Gebäude | 32 |
| 2.2 Sektor Industrie | 42 |
| 2.3 Sektor Landwirtschaft | 56 |
| 2.4 Sektor Logistik | 68 |
| 2.5 Sektor Strom | 78 |
| 3 Ausblick und Empfehlungen | 92 |
| 4 Beteiligte Institute und Projektteam | 94 |
| 5 Anhang | 97 |



Vorwort

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

die Zeit, in der Klimaschutz für Unternehmen als Minusgeschäft galt, ist vorbei. Die SEED-Index-Studie des Vodafone Instituts zeigt: Nachhaltigkeit und Profitabilität sind keine Gegensätze, sondern gehen Hand in Hand. Dieser Paradigmenwechsel ist essenziell für die Zukunft unserer Wirtschaft und unseres Planeten.

Deutschland steht vor der Herausforderung, die ambitionierten Klimaziele der Regierung zu erreichen. Unsere Studie zeigt: Die Digitalisierung ist der Schlüssel, um diesen Wandel nicht nur zu meistern, sondern auch wirtschaftlich davon zu profitieren. Mit einem SEED-Indexwert von 53 von 100 nutzen deutsche Unternehmen bisher nur die Hälfte des vorhandenen Potenzials. Die Digitalisierung bietet jedoch die einmalige Chance, Effizienz zu steigern, Emissionen zu senken und gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit zu erhöhen.

Als führendes Digitalisierungsunternehmen sieht Vodafone sich in der Verantwortung, diesen Wandel aktiv zu gestalten. Wir sind überzeugt: Die Zukunft ist digital und nachhaltig. Digitale

Technologien sind kein zusätzlicher Kostenfaktor, sondern ein Invest in die Zukunft – ein Profitabilitätsbooster, der zugleich dem Planeten zugutekommt.

Der SEED-Index dient als Indikator für die Zukunftsfähigkeit der deutschen Wirtschaft. Und die Ergebnisse der Studie sind ein Appell an alle Unternehmen, die Digitalisierung als Perspektive zu begreifen. Durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz, Augmented Reality, IoT und Co. können Deutschlands Unternehmen bis 2030 36 Prozent mehr CO₂ einsparen und ihren EBIT-Zuwachs sogar um 90 Prozent steigern. Dies zeigt: Es gibt keinen Widerspruch zwischen ökologischer Verantwortung und ökonomischem Erfolg.

Die Zukunft beginnt jetzt. Gemeinsam können wir eine nachhaltige und prosperierende digitale Wirtschaft gestalten. Lasst uns dafür sorgen, dass Deutschland wettbewerbsfähig bleibt.

Mit besten Grüßen
Michael Jungwirth



Michael Jungwirth

Geschäftsführer Public Affairs,
Regulierung, Externe Kommunikation und
Nachhaltigkeit, Vodafone Deutschland

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

in einer Zeit, die von unserer Wirtschaft ambitionierten Klimaschutz und anhaltende Wettbewerbsfähigkeit erfordert, darf die Twin Transformation – die Verschmelzung digitaler und nachhaltiger Transformation – nicht länger nur ein Schlagwort sein. Diese Studie zeigt, dass sie gelingen kann. Sie belegt, wie Digitalisierung und Dekarbonisierung einander ergänzen, um ambitionierte Klimaziele zu erreichen und zugleich die Profitabilität der Unternehmen zu steigern. Ein Ergebnis, das Hoffnung macht. Der Status Quo in der deutschen Wirtschaft zeigt allerdings noch erheblichen Aufholbedarf.

Als international tätige Technologie- und Strategieberatung wissen wir, wie essenziell die verstärkte Nutzung digitaler Technologien für die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen ist – und für die Dekarbonisierung der Wirtschaft. Die Studie beleuchtet den Zusammenhang anhand von konkreten Anwendungsfällen in fünf zentralen Wirtschaftssektoren: Von der präziseren Düngung landwirtschaftlicher Flächen durch Satellitendaten bis hin zur Energieeinsparung in Fabriken durch

Künstliche Intelligenz und digitale Zwillinge – die Möglichkeiten sind bereits vorhanden, das Potenzial ist enorm.

Kernstück der Studie ist der neuartige SEED-Index, der die Dekarbonisierungs- und die Profitabilitätseffekte der Digitalisierung verknüpft. Er ist Gradmesser für die Nutzung digitaler Technologien in den Unternehmen und zeigt, wo die deutsche Wirtschaft steht und welche Potenziale sich noch erschließen lassen: Im Jahr 2030 könnte der jährliche CO₂-Ausstoß mithilfe digitaler Technologien um rund 42 Mio. Tonnen reduziert und das EBIT in den fünf Schlüsselsektoren um rund 53 Mrd. EUR gesteigert werden.

Die Studie ist ein dringender Appell an Unternehmen, Verbände, Politik und Wissenschaft, die Digitalisierung als wesentlichen Faktor für mehr Klimaschutz und mehr Profitabilität zu erkennen und konsequent voranzutreiben: Für die Zukunftsfähigkeit unserer Wirtschaft.

Ich wünsche Ihnen eine interessante Lektüre!
Christina Raab



Christina Raab

Vorsitzende der Accenture Ländergruppe
Deutschland, Österreich und Schweiz

Index und Studie auf einen Blick

Innovativ, vergleichbar, nutzenorientiert

Innovativ: Der SEED-Index ist ein Indikator für die Zukunftsfähigkeit von Deutschlands Wirtschaft

Der SEED-Index verknüpft zwei Effekte der Digitalisierung: Dekarbonisierung und Profitabilität.

Für 2023 wurde ein sektorübergreifender SEED-Indexwert ermittelt. Um diesen zu berechnen, wurden die Dekarbonisierungs- und Profitabilitätseffekte digitaler Technologien in deutschen Unternehmen im Jahr 2023 mit denen im Jahr 2030 verglichen.^a

Je höher der SEED-Indexwert, desto zukunftsfähiger ist Deutschlands Wirtschaft in beiden Bereichen aufgestellt. Dabei gelten 0–59 Punkte als „unzureichend“, 60–74 als „ausbaufähig“, 75–89 als „gut“ und 90–100 als „exzellent“.^b

Vergleichbar: Aufgrund gleicher Indikatoren können die Sektoren miteinander verglichen werden

Ziel der Studie ist es, Unternehmen und Politik Ansatzpunkte aufzuzeigen, wie sowohl die Dekarbonisierung als auch die Profitabilität gesteigert werden können.

Dazu werden folgende Kennzahlen ermittelt:^a

- aktuelle und mögliche Adaptionenraten^c von Use Cases digitaler Technologien
- CO₂-Einsparungen 2023 und Einsparpotenziale 2030
- Profitabilitätswirkung 2023 und Wirkungspotenziale 2030

Nutzenorientiert: Insgesamt wurden dazu in fünf Sektoren 26 Use Cases analysiert

Die Studie zeigt anhand von fünf Sektoren und zwölf Subsektoren insgesamt 26 Use Cases digitaler Lösungen auf. Diese wurden aufgrund ihres hohen Beitrags zur Dekarbonisierung für Unternehmen ausgewählt.

Für die Ermittlung der Use-Case-Kennzahlen wurden im Zeitraum vom 1. Juni bis zum 15. September 2023 insgesamt 201 Unternehmensbefragungen durch das Marktforschungsunternehmen Atheneum durchgeführt.

Anmerkungen: a) Weitere Erläuterungen zur Methodik finden sich auf [S.12](#) und im Anhang, Kap. 5.1, [S. 97 ff.](#); b) Siehe auch [S.13](#); c) Siehe auch Definitionen auf [S.14](#).

Index und Studie auf einen Blick

Zahlen, Fakten und Argumente

31 Megatonnen

CO₂ sparten deutsche Unternehmen im Jahr 2023 dank digitaler Technologien ein.

1,5

ist der Faktor, mit dem deutsche Unternehmen die Digitalisierung beschleunigen müssen, um gegenüber globalen Benchmarks aufzuholen.

53 Milliarden EUR

lassen sich als absolute EBIT-Steigerung durch die Use Cases digitaler Technologien im Jahr 2030 prognostizieren, 90 % mehr als heute.

53 von 100

ist der SEED-Indexwert für 2023: Deutsche Unternehmen schöpfen die Dekarbonisierungs- und Profitabilitätspotenziale der Digitalisierung nur zur Hälfte aus.

9 %

EBIT-Steigerung ist 2023 in den fünf Schlüsselsektoren auf den Einsatz der in der Studie beschriebenen Anwendungen (Use Cases) digitaler Technologien zurückzuführen.

Verdopplung

der aus den Use Cases digitaler Technologien resultierenden EBIT-Marge ist bis 2030 möglich.

10 %

können Unternehmen durch den Einsatz digitaler Technologien im Jahr 2030 zum CO₂-Emissionssziel der Bundesregierung beisteuern.

Nur 49 von 100

ist der Wert des Subindex zur Dekarbonisierung – ein Beweis, dass die deutsche Wirtschaft ihre Dekarbonisierungspotenziale bei Weitem nicht ausschöpft.

29 %

beträgt die Adaptionrate digitaler Technologien aktuell in deutschen Unternehmen (2023).

45 %

ist die von Unternehmen erwartete Adaptionrate digitaler Technologien im Jahr 2030 – nur 16 Prozentpunkte mehr als heute.

6–7

ist die Spanne des Enablement-Faktors digitaler Technologien; also das Verhältnis zwischen den CO₂-Einsparungen und dem CO₂-Fußabdruck digitaler Technologien.

26

Use Cases digitaler Technologien, die aufgrund ihres hohen Beitrags zur Dekarbonisierung ausgewählt wurden, zeigt die Studie in zwölf Subsektoren auf.

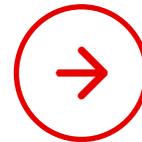
1 SEED-Index

1.1 Einführung

Warum die Studie? Warum ein Index? Impulse für die Transformation

Vor welchen Herausforderungen stehen Deutschlands Unternehmen?

- 1. Doppelte Transformation** – Die Aufgabe ist nicht nur für Deutschlands Unternehmen groß: Sie müssen gleichzeitig nachhaltiger und digitaler werden. Die Verknüpfung der Nachhaltigkeits- mit der digitalen Transformation ist entscheidend, um langfristig erfolgreich zu sein.^{1,2}
- 2. Wachsender Wettbewerbsdruck** – Die Schlüsselsektoren in Deutschland ringen mit steigenden Kosten und einer schwachen Präsenz in den Wachstumsmärkten. Sie müssen sich strategischen Veränderungen stellen und klug investieren, um weiter Spitzenpositionen zu besetzen.³⁻⁸
- 3. Dekarbonisierung als Business Case** – Der Einsatz digitaler Technologien für die Dekarbonisierung muss finanziell und ökologisch sinnvoll sein. Wenn Dekarbonisierung dank Digitalisierung mit Profitabilitätssteigerung einhergeht, ist der Business Case eindeutig.⁹
- 4. Die digitale Lücke** – Viele Unternehmen wissen nicht genau, wie digitale Technologien zur Dekarbonisierung und zugleich zur Profitabilitätssteigerung beitragen können. Messung, Vergleich und Nachweis dieser Effekte helfen, die Lücke zu schließen.¹⁰



Welche Kernfragestellungen adressiert diese Studie?

In welchem Ausmaß tragen digitale Technologien zur Dekarbonisierung und Profitabilitätssteigerung in deutschen Unternehmen bei?

Wie hoch sind die Dekarbonisierungs- und Profitabilitätseffekte heute schon, und wie hoch werden sie im Jahr 2030 sein?

Wie lassen sich diese Effekte einfach und regelmäßig für Deutschlands Wirtschaft messen und vergleichen (Monitoring)?

Wie groß wird der Abstand der Adaption digitaler Technologien in deutschen Unternehmen zu globalen Benchmarks^a im Jahr 2030 sein?

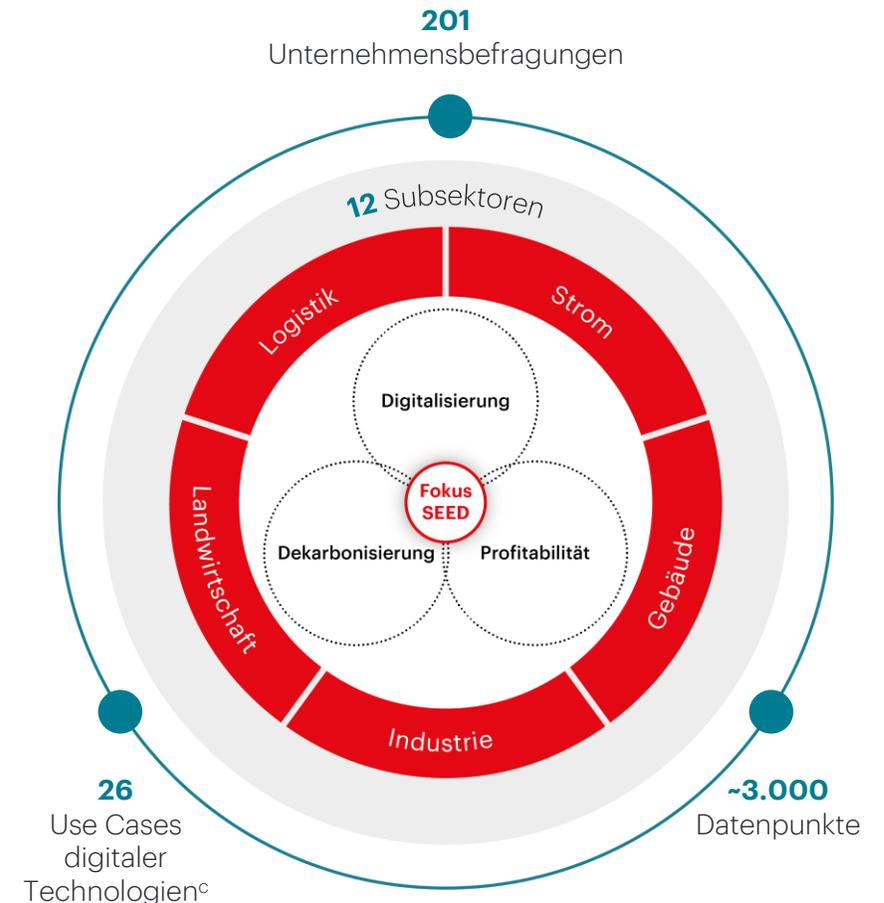
Anmerkung: a) Theoretisch mögliche Implementierungsgrade digitaler Technologien, die auf Sekundärdaten und Experteneinschätzungen basieren. Als Anhaltspunkte dienen (i) weltweit führende Unternehmen oder (ii) Länder mit umfangreicher Implementierung der Use Cases sowie (iii) Wachstumsraten zu technologischen Entwicklungen, siehe auch S. 13. Quellen: 1) Bertelsmann Stiftung, 2023; 2) Fraunhofer IAO, 2023; 3) Grömling, 2022; 4) Handelsblatt, 2019; 5) Olk, 2023; 6) Tagesschau, 2023; 7) WEF, 2022; 8) Wirtschaftsdienst, 2023; 9) WEF, 2024; 10) Nachtwey & Schmid, 2022.

Was wird untersucht und was soll erreicht werden? Fakten für Prognosen und Entscheidungen

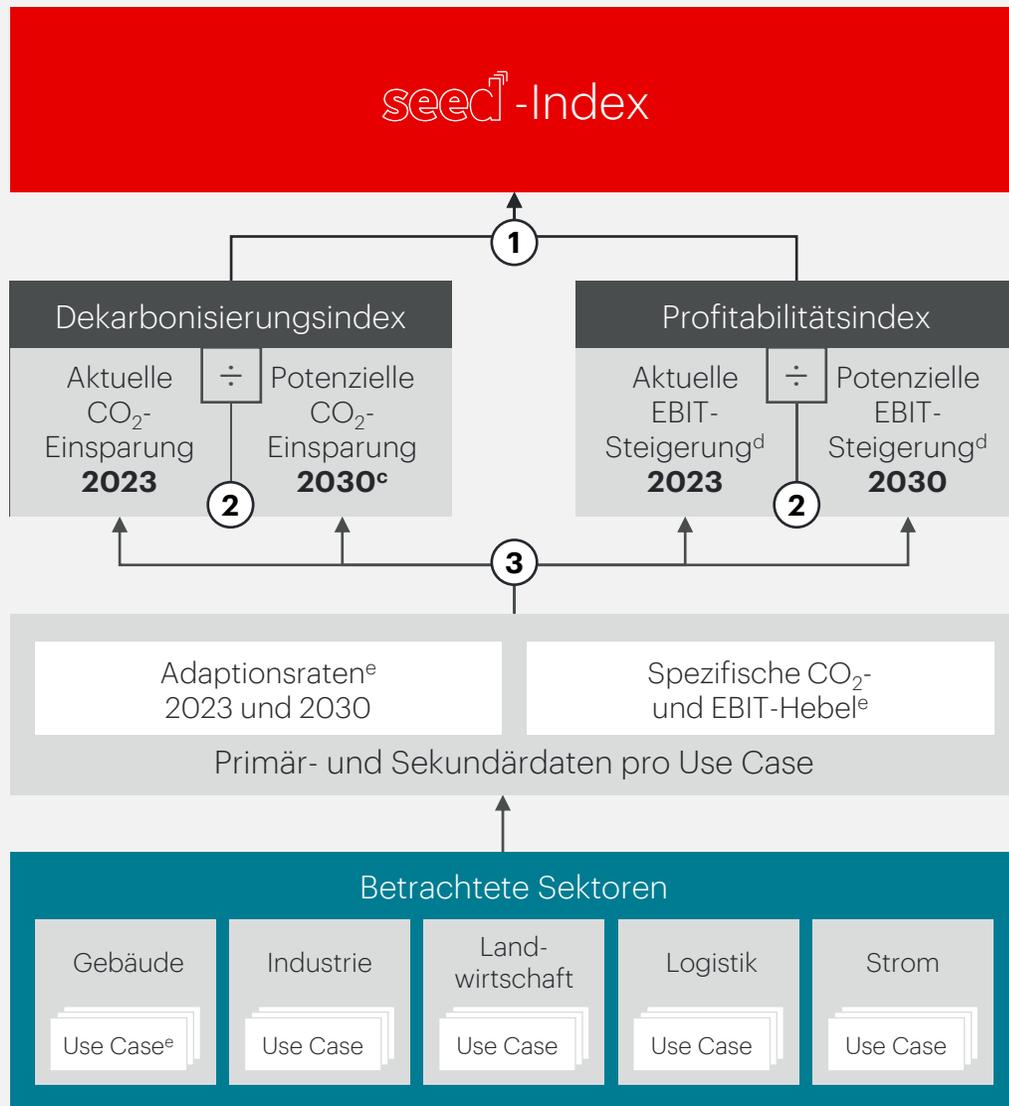
Fokus – Die Untersuchung fokussiert sich auf die Schnittstelle der Themenfelder Digitalisierung, Dekarbonisierung und Profitabilität (siehe Abb.), um die zuvor genannten Herausforderungen und Fragestellungen zu adressieren. Die vorab durchgeführte Metaanalyse von über 300 Publikationen zeigt: Eine eingehende Untersuchung an dieser Schnittstelle, speziell für Deutschland und seine CO₂^a-intensivsten Sektoren^b (siehe Abb.), hat einen großen Erkenntnisgewinn für die Unternehmenspraxis.

Idee und Scope – Auf Basis einer Befragung von 201 Unternehmen sowie einer Recherche, die über 3.000 Datenpunkte ergab, verdichtet der SEED-Index Status und Entwicklung zweier wichtiger Erfolgsindikatoren für die deutsche Wirtschaft in den Jahren 2023 und 2030: (1) Die Adaptionrate^c digitaler Technologien in Unternehmen als Maßstab für die Nutzung und (2) die damit erzielten CO₂-Einsparungen und Profitabilitätssteigerungen in den Unternehmen – dies entlang von 5 Sektoren, 12 Subsektoren und 26 Use Cases^c digitaler Technologien.

Ziel – Der SEED-Index misst als neuer Indikator, wie zukunftsfähig deutsche Unternehmen sind, indem sie durch den Einsatz digitaler Technologien ihre CO₂-Emissionen senken und zugleich ihre Profitabilität steigern. Der Fokus auf den aktuellen Status sowie das Jahr 2030 ermöglicht Vergleiche und Prognosen, die Entscheidern in Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft Orientierung bieten.



Anmerkungen: a) Gemeint sind Kohlenstoffdioxidäquivalente, die als Maßeinheit dienen, um das Erwärmungspotenzial verschiedener Treibhausgase im Verhältnis zu Kohlenstoffdioxid (CO₂) auszudrücken. In der Studie wird dies vereinfachend mit CO₂ abgekürzt, um die Lesbarkeit zu verbessern; b) Die fünf gewählten Sektoren (einschließlich Energie) repräsentieren 99,4 % der nationalen Emissionen von insgesamt 745,7 Megatonnen (MT) im Jahr 2022, gemäß UBA, 2023m. Die Zahlen zu den Jahren 2023 lagen zum Zeitpunkt der Untersuchung noch nicht vor; c) Siehe Definitionen auf S. 14.



Wie wird der SEED-Index ermittelt? Kombination von zwei Subindizes

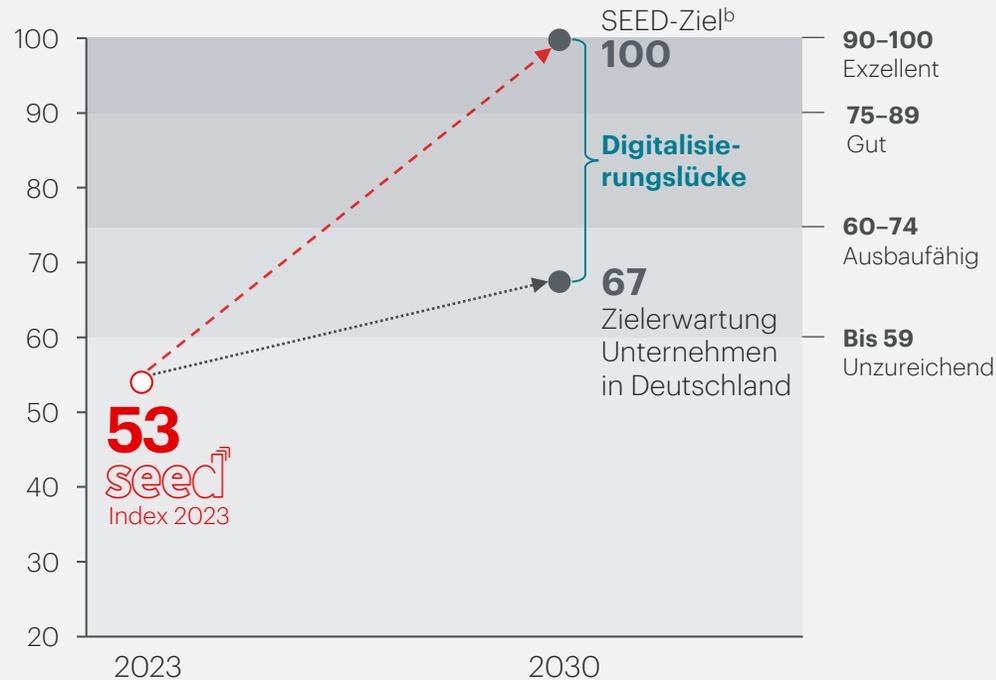
Aussage und Zusammensetzung^a – Der SEED-Index zeigt, inwieweit Unternehmen in Deutschland heute schon in der Lage sind, ihre Potenziale zur Dekarbonisierung und zur Profitabilitätssteigerung auszuschöpfen.^b Er setzt sich deshalb aus zwei Subindizes zusammen (siehe Abb., Punkt 1): dem Dekarbonisierungsindex, der die CO₂-Einspareffekte durch digitale Technologien quantifiziert, und dem Profitabilitätsindex, der die entsprechenden EBIT-Effekte quantifiziert. Die verknüpfte gleichgewichtige Betrachtung ökologischer und ökonomischer Effekte drückt sich auch im Namen des Index aus: Sustainable Economic Efficiency through Digitalization (SEED). Sowohl Forschung als auch Praxis zeigen, dass Dekarbonisierung und Profitabilität oft komplementär sind bzw. sich gegenseitig ergänzen – insbesondere durch die zunehmende Internalisierung von CO₂-Emissionen durch direkte oder indirekte Bepreisung.¹⁻⁴

Berechnungsweise^a – Die beiden Subindizes errechnen sich aus dem Verhältnis der Effekte des Jahres 2023 zu den potenziellen Effekten im Jahr 2030 (siehe Abb., Punkt 2). Das heißt: Für den jeweiligen Indexwert werden die aktuellen CO₂-Einsparungen bzw. EBIT-Steigerungen durch die für das Jahr 2030 jeweils prognostizierten Werte geteilt. Da anzunehmen ist, dass die Adaption digitaler Technologien und technische Verbesserungen künftig zunehmen, wird das Potenzial für 2030 höher eingeschätzt als für 2023.

Anmerkungen: a) Siehe auch Kap. 5.1 Methodik, S. 98 ff.; b) Deswegen wird deren Interpretation im Text auch als „Dekarbonisierungspotenziale“ bzw. „Profitabilitätspotenziale“ bezeichnet; c) Das Jahr 2030 dient als zentrales Referenzjahr, hauptsächlich aufgrund seiner Bedeutung in globalen Klimavereinbarungen wie der Pariser Klimaschutzvereinbarung von 2015; d) Der EBIT-Effekt wird als Erhöhung der EBIT-Marge in Prozentpunkten gemessen, siehe Kap. 5.1 Berechnungen, S. 108 ff.; e) Siehe Definitionen, S. 14. Quellen: 1) Accenture, 2021; 2) Vigna et al., 2023; 3) Crispeels et al., 2023; 4) WEF, 2022.

Mit 53 von 100 Punkten zeigt der aktuell ermittelte Indexwert, dass Deutschlands Unternehmen die Potenziale digitaler Technologien gerade mal zur Hälfte ausschöpfen.

SEED-Indexwert



- Ist-Wert in 2023 - - - Zielpfad des SEED-Index
- Erwartete Entwicklung laut Unternehmen in Deutschland

Anmerkungen: a) Siehe auch SEED-Adaptionspfad, S. 26; b) Siehe Definition in der Definitionsbox.

Was sagt der SEED-Index aus? Die Digitalisierungslücke wächst

Deutschlands Wirtschaft wird die Adaption digitaler Technologien massiv beschleunigen müssen, um die Digitalisierungslücke bis 2030 zu schließen.

Der Vergleich der SEED-Indexwerte von 2023 und 2030 zeigt eine wachsende Digitalisierungslücke auf. Diese Lücke resultiert aus der Diskrepanz zwischen dem angestrebten SEED-Zielwert von 100 (siehe Definition) und dem für das Jahr 2030 prognostizierten SEED-Indexwert von 67, der unter anderem auf den Erwartungen deutscher Unternehmen zur Adaption digitaler Technologien basiert.

Je höher der SEED-Indexwert, desto zukunftsfähiger ist Deutschlands Wirtschaft bei der Dekarbonisierung und Profitabilität aufgestellt. Dabei gelten 0–59 Punkte als „unzureichend“, 60–74 als „ausbaufähig“, 75–89 als „gut“ und 90–100 als „exzellent“. Aktuell ist der SEED-Index mit 53 Punkten unzureichend.

Definitionen

SEED-Zielwert: Der SEED-Zielwert für 2030 ergibt sich aus den von den Unternehmen erwarteten Adaptionsraten und globalen Benchmarks.^a

Benchmarks: Theoretisch mögliche Implementierungsgrade digitaler Technologien, die auf Sekundärdaten und Experteneinschätzungen basieren. Als Anhaltspunkte dienen (i) weltweit führende Unternehmen oder (ii) Länder mit umfangreicher Implementierung der Use Cases sowie (iii) Wachstumsraten zu technologischen Entwicklungen.

Wie werden die Subindizes für den SEED-Index ermittelt?

Subindizes basieren auf Bottom-up-Berechnung

Sektorindizes als Basis – Die Ermittlung der beiden vorgenannten Subindizes basiert auf sektorspezifischen Daten. So wird für jeden Sektor ein eigener Dekarbonisierungs- und ein eigener Profitabilitätsindex berechnet. Zusammengekommen und gewichtet ergeben diese Sektorindizes dann die sektorübergreifenden Subindizes.^a

Berechnung der CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerung – Die Berechnungen der beiden Werte werden für jedes Jahr – 2023 und 2030 – separat durchgeführt (siehe Abb., Seite 12, Punkt 3). Die CO₂-Einsparungen hängen hauptsächlich von der Adaptionrate des Use Case und dem spezifischen CO₂-Reduktionshebel ab (siehe Definitionen). Gleiches gilt für die EBIT-Steigerung (siehe Definitionen). Sowohl die angenommenen Adaptionraten als auch die Hebel basieren auf Daten aus der Unternehmensbefragung sowie auf Sekundärdaten.^b Eine ausführliche

Erläuterung der Datengrundlage, Berechnungsmethoden und Quellen ist im Anhang unter Kapitel 5, S. 98 ff. zu finden.

Auswahl Sektoren und Use Cases – Bei der Auswahl der Sektoren und Use Cases (siehe Definition) lag der Hauptfokus auf einer effektiven Dekarbonisierung. Die Kernfrage war: Welche Sektoren, Subsektoren und Use Cases adressieren den größten Teil der unternehmensbedingten CO₂-Emissionen? Somit wurden Use Cases ausgewählt, die die emissionsintensivsten Sektoren und Subsektoren in Deutschland adressieren.

Die fünf ausgewählten Sektoren Gebäude, Industrie, Landwirtschaft, Logistik und Strom repräsentieren 99,4 %¹ der nationalen CO₂-Emissionen.^c Sie gelten deshalb als Schlüssel-sektoren für die Dekarbonisierung. Die untersuchten 26 Use Cases decken wiederum 94,5 %^d der von Unternehmen adressierten CO₂-Emissionen Deutschlands ab.

Definitionen

Adaptionrate: Die Adaptionrate zeigt, in welchem Ausmaß digitale Technologien in Unternehmen eingesetzt werden. Sie spiegelt den Implementierungsgrad spezifischer Use Cases wider, der durch die Unternehmensbefragung für das Jahr 2023 sowie als prognostizierte Adaption für 2030 erfasst wurde. Quantifiziert wurde die Adaptionrate mithilfe einer Likertskala, oft als 5er-Skala bezeichnet, in einem Bereich von 0 bis 100 %.

CO₂- und EBIT-Hebel: Diese Kennzahlen bestimmen in Prozent den Einfluss eines spezifischen Use Case auf die Reduktion der CO₂-Emissionen oder die Steigerung des EBIT pro Bezugsgröße (z.B. pro Gebäude). Sie wurden auf Basis konkreter Wirkungshebel (z.B. Energieeinsparung, Personalkostensenkung) mittels der Unternehmensbefragung sowie durch Auswertungen von Sekundärdaten ermittelt.

Use Case: Ein Use Case stellt den konkreten Anwendungsfall einer digitalen Lösung in der Unternehmenspraxis dar – wobei in der Regel verschiedene digitale Technologien miteinander kombiniert zum Einsatz kommen.

Anmerkungen: a) Zur Gewichtungslogik siehe Kap. 5.1 Methodik, S. 114; b) Detaillierte Zahlen und Quellen finden sich im Anhang, Kap. 5.2, S. 117 ff.; c) Die CO₂-Emissionen der fünf Sektoren (inkl. Energie) betragen 741,4 MT CO₂ von insgesamt 745,7 MT CO₂ im Jahr 2022 gemäß [UBA, 2023m](#). Die Zahlen zu den Jahren 2023 lagen zum Zeitpunkt der Untersuchung noch nicht vor; d) Siehe Kap. 5.1 Methodik, S. 100. Quelle: 1) [UBA, 2023n](#).

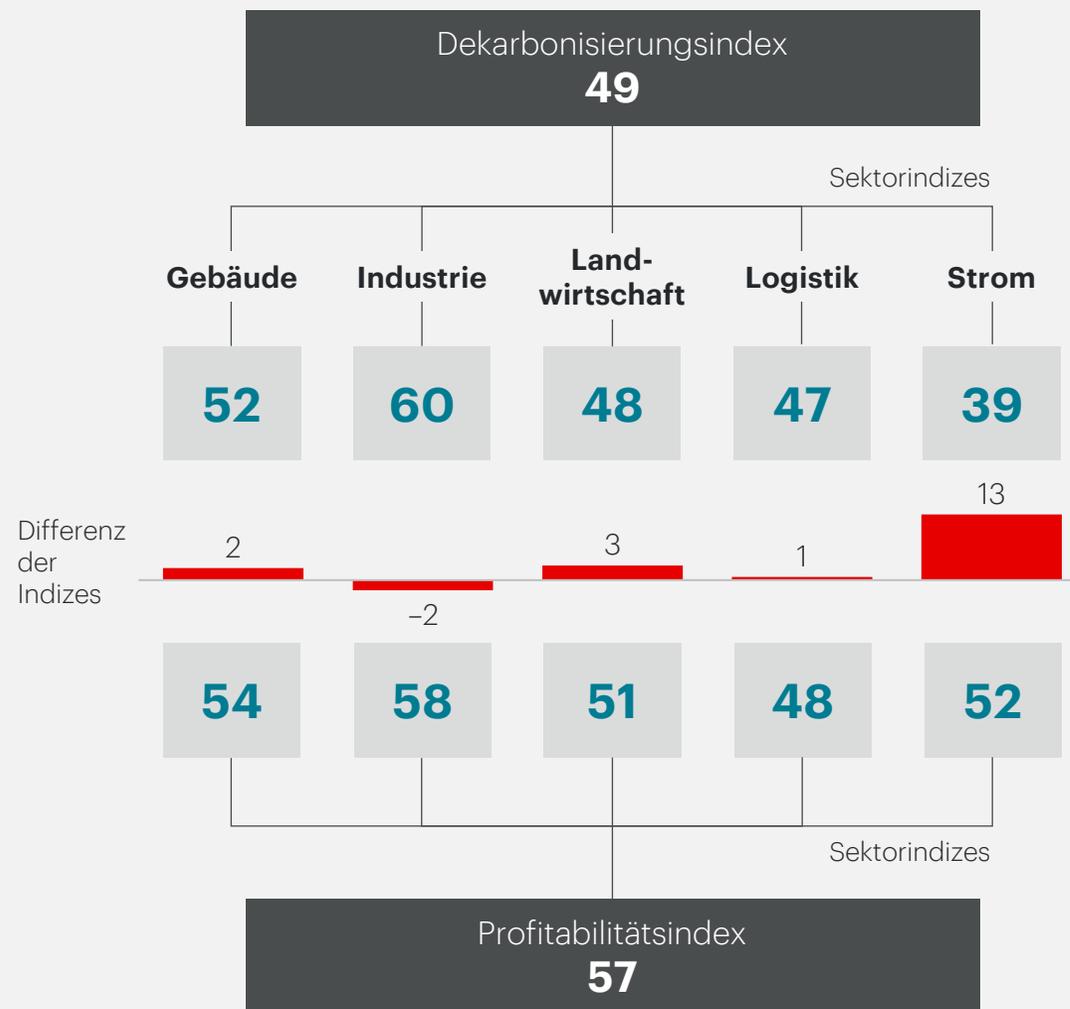
Wie werden Potenziale bewertet? Die Subindizes im Sektorvergleich

In allen Sektoren bestehen noch große Dekarbonisierungs- und Profitabilitätspotenziale.^a Letztere werden im Schnitt etwas besser ausgeschöpft.

Die Abbildung stellt die Subindizes für Dekarbonisierung und für Profitabilität einander gegenüber – sowohl sektorübergreifend als auch auf die fünf Sektoren bezogen. Der Vergleich zeigt, dass sich beim Einsatz digitaler Technologien die Steigerung der Profitabilität (Indexwert 57) stärker materialisiert als deren Beitrag zur Dekarbonisierung (Indexwert 49).

Der Vergleich der sektorspezifischen Subindizes zeigt, dass der Stromsektor die größte Differenz (13 Indexpunkte) zwischen beiden Subindizes aufweist. Die Profitabilitätspotenziale werden hier deutlich besser ausgeschöpft als die Dekarbonisierungspotenziale. Im Industriesektor ist das Gegenteil der Fall: Der Fokus liegt hier stärker auf der Dekarbonisierung (Indexwert 60) als auf der Profitabilität (Indexwert 58).

Die Erkenntnisse aus dem Vergleich der Dekarbonisierungs- und der Profitabilitätsindizes sind in den Kapiteln 1.2 bzw. 1.3 dargestellt.



Anmerkung: a) Die Subindizes messen, inwieweit Unternehmen in Deutschland heute schon in der Lage sind, ihre Potenziale zur Dekarbonisierung und zur Profitabilitätssteigerung auszuschöpfen. Deswegen wird deren Interpretation im Text auch als „Dekarbonisierungspotenziale“ bzw. „Profitabilitätspotenziale“ bezeichnet (siehe auch S. 12 zur Bedeutung der Subindizes). Ein niedriger Wert bedeutet ein hohes Potenzial durch die Digitalisierung bis zum Jahr 2030 bzw. eine relative niedrige Potenzialausschöpfung heute gegenüber 2030.

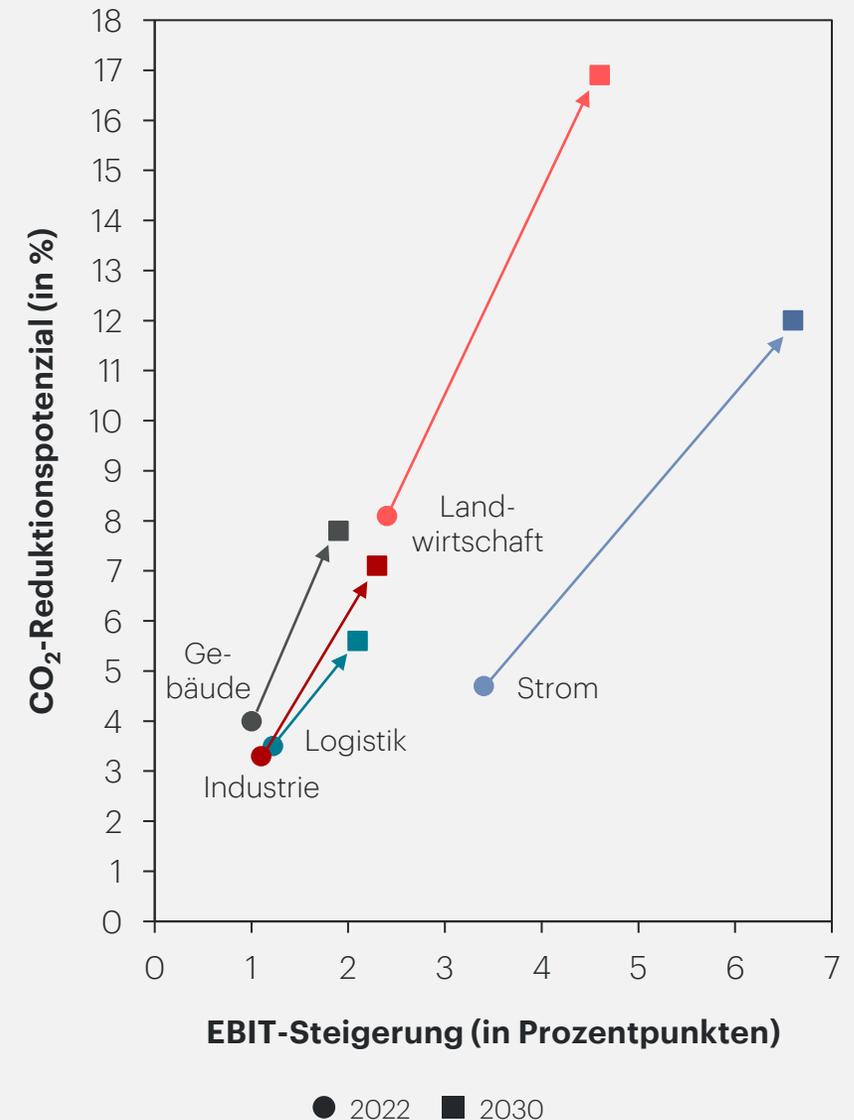
Warum steht der Index für Zukunftsfähigkeit? CO₂- und EBIT-Effekte im Vergleich

Die Adaption digitaler Technologien in Unternehmen wirkt sich in hohem Maße auf CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerungen aus. Beide Effekte sind zentral für die Zukunftsfähigkeit der Unternehmen.

Der Sektorvergleich zeigt (siehe Abb.): Die Anwendung digitaler Technologien trägt in allen fünf betrachteten Sektoren sowohl zu CO₂-Einsparungen als auch zu EBIT-Steigerungen bei. Besonders hervorzuheben sind die Sektoren Strom und Landwirtschaft, bei denen durch Digitalisierung die größten prozentualen Effekte in Bezug auf Dekarbonisierung und Profitabilität erwartet werden. Warum das so ist, erklärt sich mit zwei additiven Gründen.

Erstens: Für 2030 wird eine hohe Adaptionrate^a digitaler Technologien im Landwirtschafts- (63 %) und im Stromsektor (60 %) prognostiziert – im Vergleich zu den anderen Sektoren. Diese Prognose basiert auf der signifikanten Steigerung der Adaptionraten – um +31 Prozentpunkte in der Landwirtschaft und +27 Prozentpunkte im Stromsektor zwischen 2023 und 2030. Zu den Gründen siehe auch Kapitel 1.4 Adaption digitaler Technologien (S. 25 ff.).

Zweitens: In beiden Sektoren sind die CO₂- und EBIT-Hebel^a größer im Vergleich zu den anderen Sektoren. Digitale Technologien führen zu einer deutlichen Reduzierung der CO₂-Emissionen – um bis zu 14 % pro Hektar oder Nutztier. Bei Betreibern von Wind- und Solaranlagen ergeben sich neben Kosteneinsparungen zusätzlich Umsatzsteigerungen von bis zu 8 %, die aus Effizienzsteigerungen und der damit verbundenen Erhöhung der Kapazitäten resultieren.^b



Anmerkungen: a) Siehe auch Definitionen, S. 14; b) Siehe auch Kap. 5.1 Datengrundlage, S. 101. und Kap. 5.2 Zahlen im Detail, S. 117 ff.

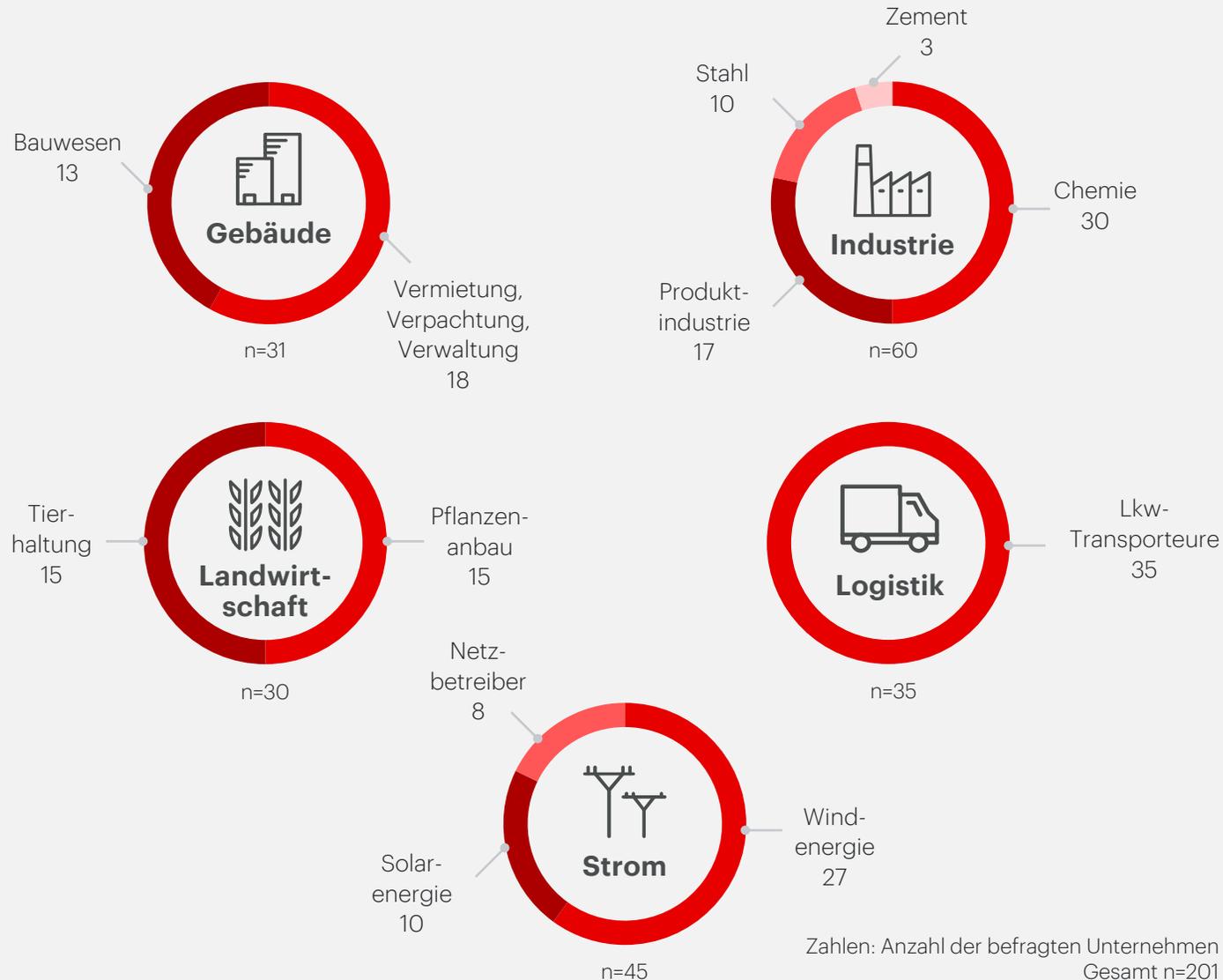
Worauf fußen die Daten? Unternehmen befragt

Um aktuelle Adaptionsraten sowie CO₂- und EBIT-Hebel zu ermitteln, wurden Unternehmen aus den Schlüssel-sektoren befragt.

Insgesamt 201 Unternehmen aus fünf Sektoren und zwölf Subsektoren gaben im Jahr 2023^a Antwort zu Adaptionsraten, CO₂- und EBIT-Hebeln (siehe auch Definitionen auf S. 14). Diese Kennzahlen wurden für jeden einzelnen Use Case spezifisch erhoben.

Die Adaptionsrate wurde in einem Bereich von 0 bis 100 % quantifiziert. Die CO₂- und EBIT-Hebel wurden anhand verschiedener Wirkungshebel, wie beispielsweise Energieverbrauch und Personalkosten, in Form von Minimal- und Maximalwerten erfasst.

Ergänzend zu diesen Primärdaten wurden zu den erfassten Datenpunkten auch Sekundärdaten hinzugezogen.^b



Anmerkungen: a) Im Zeitraum 1. Juni bis 15. September 2023; b) Weitere Informationen zum Erhebungsdesign finden sich in Kap. 5.1 Methodik – Datengrundlage, S. 101.

1 SEED-Index

1.2 Dekarbonisierung



Dekarbonisierung Potenziale im Sektorvergleich

Die Dekarbonisierungspotenziale^a werden in allen Sektoren noch unzureichend ausgeschöpft. Die möglichen CO₂-Einsparungen bis 2030 zeigen große Chancen auf.

Zwei Sektoren stechen besonders hervor, wie die Faktoren^b in der Abbildung verdeutlichen.

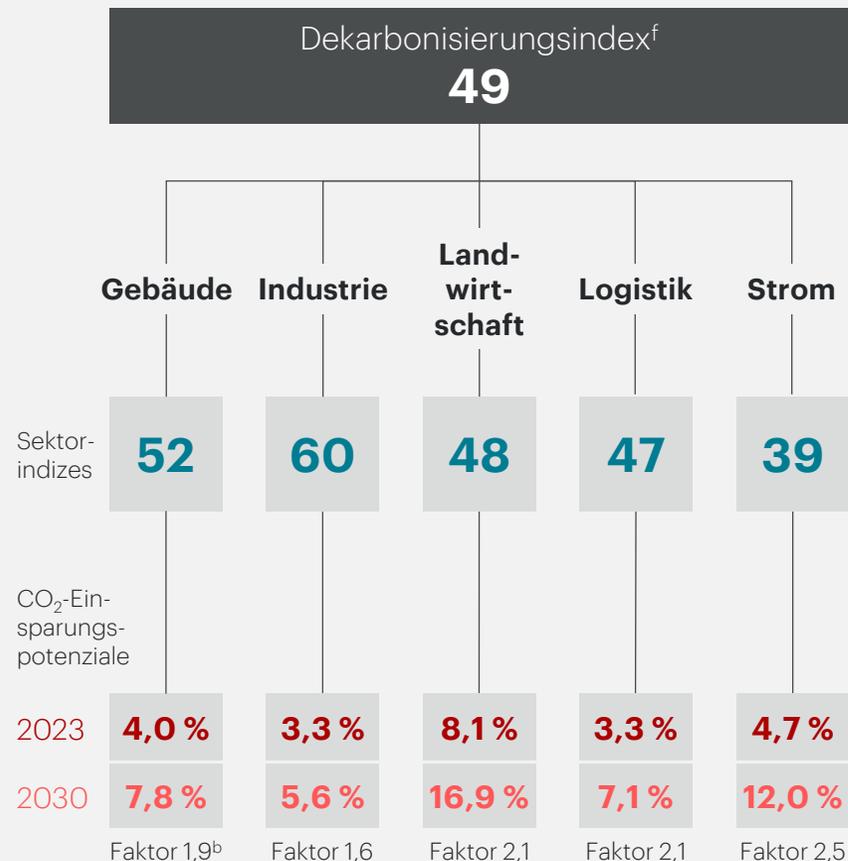
Unternehmen im Sektor Strom können sich durch digitale Technologien ein 2,5-faches^c Dekarbonisierungspotenzial erschließen.

Insbesondere den Erzeugern von Wind- und Solarenergie bieten effizienzsteigernde digitale Technologien die Chance, die CO₂-Einsparungen von 4,7 % im Jahr 2023 auf 12 % im Jahr 2030 zu steigern (siehe Abbildung). Die geplante Ausweitung der regenerativen Stromproduktion in Deutschland¹ fördert dieses Wachstum.

Der Industriesektor benötigt eine beschleunigte Adaption digitaler Technologien, um sein Dekarbonisierungspotenzial zu steigern.

Für das Jahr 2030 weist der Industriesektor mit 5,6 % ein im Vergleich zu den anderen Sektoren niedrigeres Dekarbonisierungspotenzial auf, trotz bestehender CO₂-Reduktionshebel von 9 % bis 12 %.^d Das liegt vor allem an der erwarteten geringen Adaptionrate digitaler Technologien bis 2030.^e Um diese zu steigern, sind Anreize, vor allem finanzielle Unterstützung und Förderprogramme für mittelständische Industrieunternehmen, wichtig.

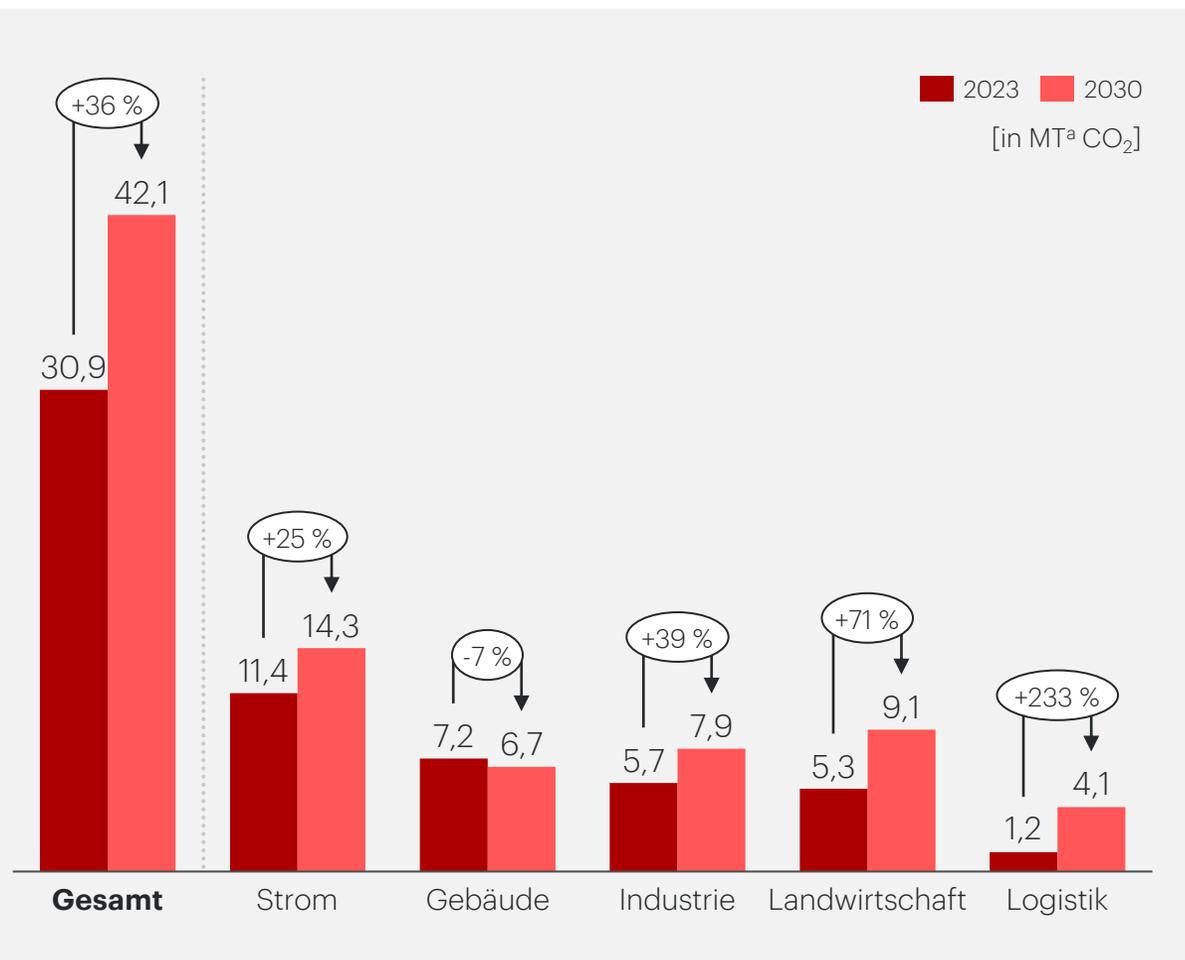
Mit 49 von 100 Punkten zeigt der Dekarbonisierungsindex, dass die deutsche Wirtschaft die aktuell durch Digitalisierung erreichte Dekarbonisierung noch verdoppeln kann.



Anmerkungen: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren; a) Siehe zur Erläuterung auch S. 12; b) Faktor = Prozentzahl 2030 / Prozentzahl 2023; c) Siehe Abbildung: 39/100 = 2,56 oder = 12,0 %/4,7 %; d) Siehe auch Kap. 5.2 Zahlen im Detail, S. 119; e) Siehe auch Kap. 1.4 Adaption digitaler Technologien, S. 25 ff.; f) Der Wert wird über eine Gewichtung der Sektoren nach CO₂-Intensität ermittelt, d.h. wie hoch die CO₂-Emissionen des Sektors sind (siehe auch S. 112 und S. 114). Quelle: UBA, 2023j.

Dekarbonisierung

Absolute CO₂-Einsparungen je Sektor 2023 und 2030



Digitale Technologien ermöglichen deutschen Unternehmen 2023 eine CO₂-Einsparung von rund 31 Megatonnen^a.

Schon jetzt tragen digitale Technologien zur Reduktion von CO₂-Emissionen bei, wobei die größten Einsparungen in den Sektoren Strom, Gebäude und Industrie zu verzeichnen sind. Die ermittelten Einsparungen summieren sich auf rund 31 Megatonnen (MT) CO₂, was ungefähr 4,7% der mit dieser Studie adressierten Gesamtemissionen (661 MT) sowie 4,1% der Gesamtemissionen Deutschlands (746 MT)¹ im Jahr 2022 entspricht. Obwohl der Logistiksektor im Vergleich die geringsten CO₂-Einsparungen verzeichnet, zeichnet er sich in einer anderen Kennzahl besonders aus.

Im Logistiksektor ist bis 2030 der stärkste prozentuale Anstieg der CO₂-Einsparungen zu erwarten.^b

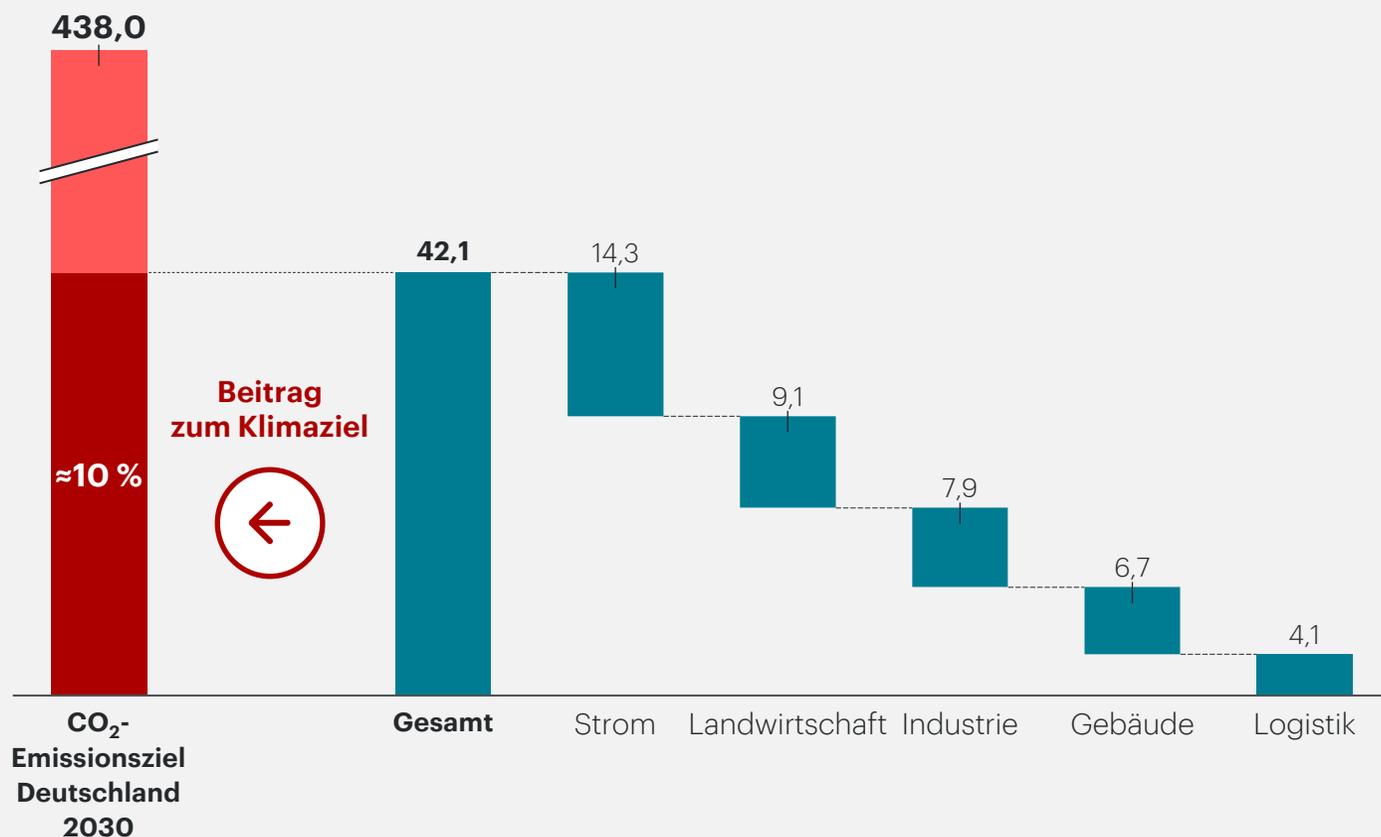
Die CO₂-Einsparpotenziale im Logistiksektor könnten von 1,2 auf 4,1 MT CO₂ steigen – eine Steigerung um mehr als 200 %. Gründe dafür sind zum einen das erwartete Wachstum des Güterverkehrs^c von 515 Tonnenkilometer (tkm) im Jahr 2023 auf 533 tkm² im Jahr 2030, das zu steigenden absoluten Reduktionspotenzialen führt. Zum anderen ist im Logistiksektor bis 2030 eine Verdopplung der Adaptionsrate zu erwarten.^d

Anmerkungen: a) MT = Megatonnen bzw. Mio. Tonnen; b) Untersucht wurde der Lkw-Güterverkehr; c) Gemessen anhand der Güterverkehrsleistung in Tonnenkilometern (tkm); d) Von durchschnittlich 17 % im Jahr 2023 auf durchschnittlich 34 % im Jahr 2030, siehe Kap. 1.4 Adaptionsraten, S. 25.
Quellen: 1) UBA, 2023n; 2) UBA, 2023l, im Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) des Projektionsberichts.

Dekarbonisierung

Beitrag zum Klimaziel der Bundesregierung für 2030

CO₂-Einsparungen im Jahr 2030 – pro Sektor und gesamt
[in MT CO₂]



Deutsche Unternehmen können durch den Einsatz von digitalen Technologien mit einer Reduktion um rund 42 MT CO₂ – etwa so viel, wie die Einwohner von Rheinland-Pfalz jährlich verursachen^a – zum CO₂-Emissionsziel 2030 der Bundesregierung beisteuern.

Die Bundesregierung hat sich 2021 mit der Novellierung des Klimaschutzgesetzes von 2019 das Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen bis 2030 gegenüber 1990 um 65% zu reduzieren. Dies entspricht einer Emission von 438 MT CO₂ im Jahr 2030.¹

Die in der Studie für die Sektorsektoren prognostizierten Einsparungen im Jahr 2030 summieren sich auf rund 42 MT CO₂.^b Das entspricht 9,6% des CO₂-Emissionsziels der Bundesregierung.¹

Anmerkungen: a) Die Vergleichsberechnung basiert auf der Gesamtbevölkerung von Rheinland-Pfalz (rund 4,2 Mio. in 2022 gemäß [Demografie-Portal, 2022](#)) und den durchschnittlichen jährlichen CO₂-Emissionen pro Kopf in Deutschland (rund 10,8 Tonnen gemäß [UBA, 2023m](#)); b) Siehe auch Kap. 5.2 Zahlen im Detail, S. 117 ff. Quelle: 1) [UBA, 2023](#).

1 SEED-Index

1.3 Profitabilität



Profitabilität Potenziale im Sektorvergleich

Die Profitabilitätspotenziale^a der Digitalisierung werden bereits etwas besser ausgeschöpft. Dennoch zeigen mögliche EBIT-Effekte bis 2030 erhebliche Chancen auf, die Profitabilität durch Nutzung digitaler Technologien zu steigern.

Während für das Jahr 2023 zwei Sektoren besonders hervorstechen, zeichnen sich bis 2030 dagegen einheitliche Ergebnisse über alle Sektoren hinweg ab:

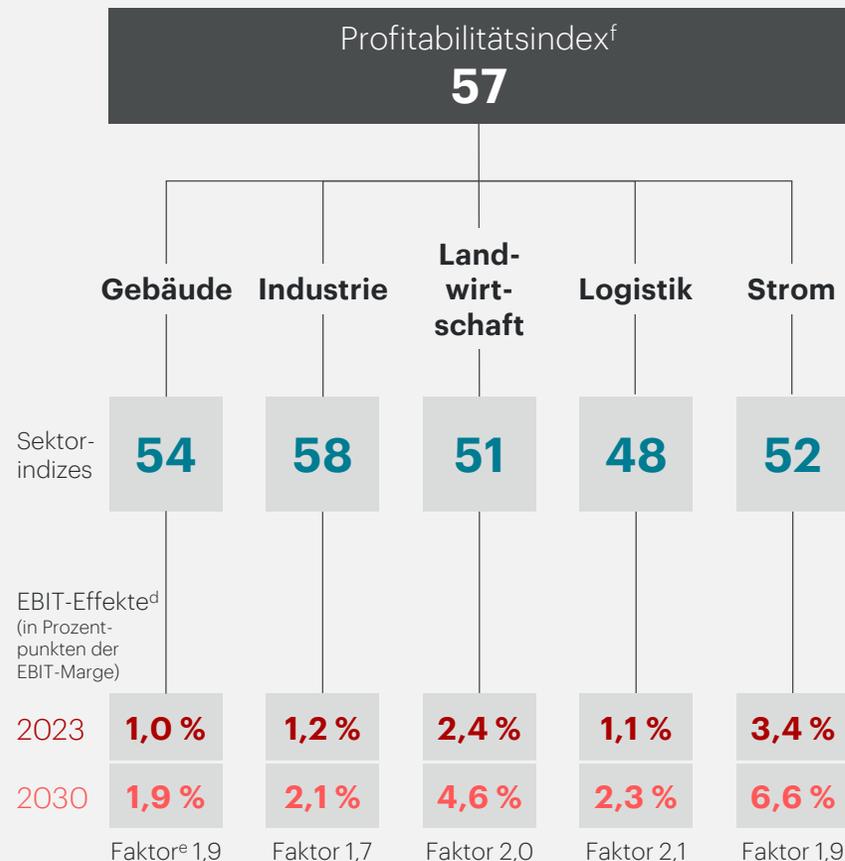
In den Sektoren Landwirtschaft und Strom waren die EBIT-Effekte der Digitalisierung im Jahr 2023 mit einer um 2,4 bis 3,4 % erhöhten Marge am größten.

In der Landwirtschaft halfen digitale Technologien im Jahr 2023, die gestiegenen Kosten, die vor allem auf höhere Ausgaben für Dünge- und Futtermittel zurückzuführen sind, gezielt zu mindern.^{1,2} Bei den Erzeugern von Wind- und Solarstrom dienten digitale Technologien der Effizienzverbesserung bei der Stromproduktion und erhöhen den Umsatz so um bis zu 8 %, wie die Datenauswertungen zeigen.^b

Nahezu alle Sektoren haben die Chance, die durch Digitalisierung erzielte EBIT-Marge bis 2030 zu verdoppeln.^{c,d}

Für alle Sektoren werden bis 2030 gleichbleibend hohe oder sogar steigende Kosten prognostiziert, beispielsweise für Wartungspersonal, Dünge- und Futtermittel, Treibstoffe oder durch CO₂-Abgaben bedingte Mautkosten.^{3,4} Hier können digitale Technologien durch Effizienzgewinne ihre Wirkung entfalten: Ein Anstieg des EBIT-Effekts^d auf 4,6 % in der Landwirtschaft und 6,6 % im Stromsektor ist möglich.

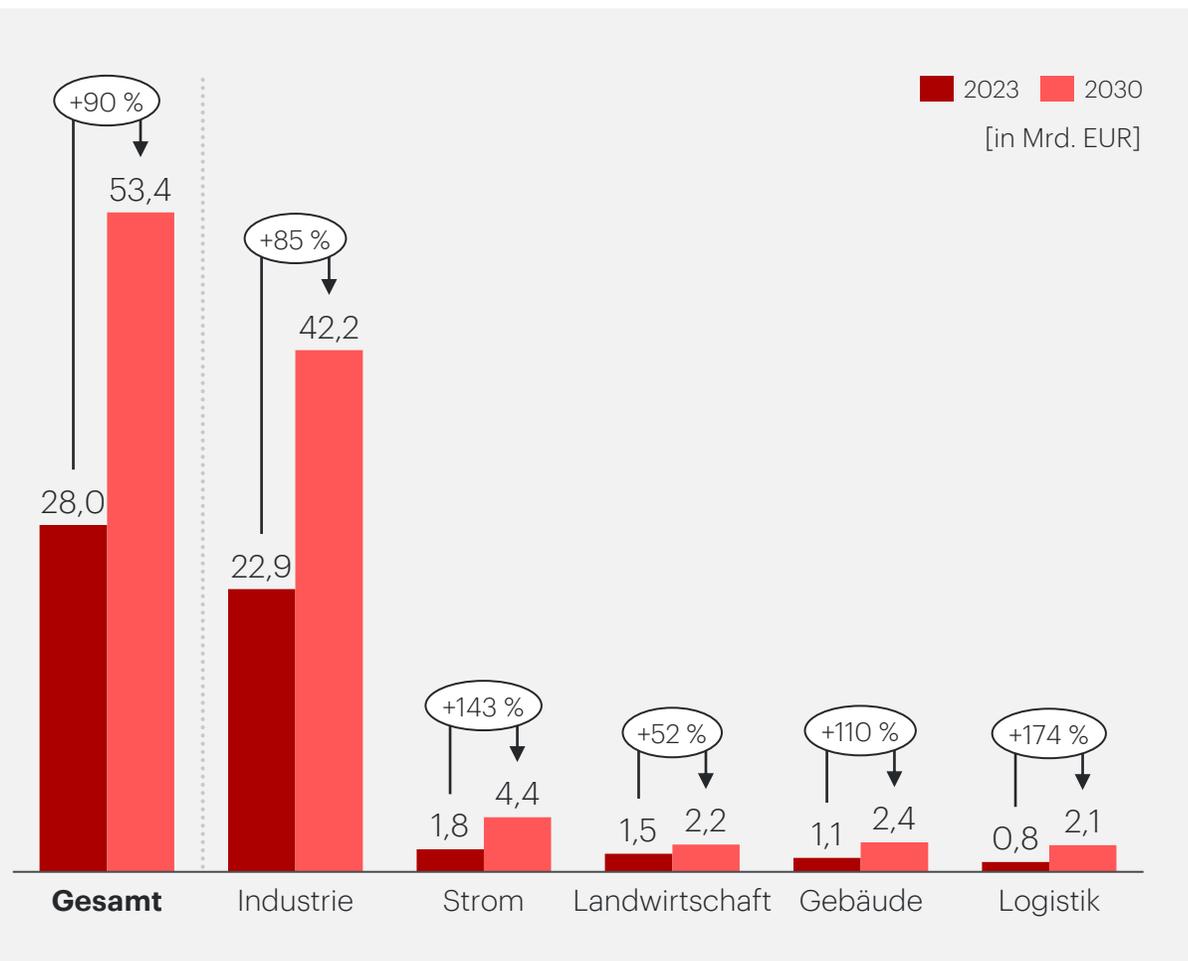
Mit 57 von 100 Punkten zeigt der Profitabilitätsindex, dass die deutsche Wirtschaft die aktuell durch Digitalisierung erreichte Profitabilität noch um das 1,8-Fache erhöhen kann.



Anmerkungen: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren; a) Siehe zur Erläuterung auch S. 12; b) Siehe auch Kap. 5.2 Zahlen im Detail, S. 117 ff.; c) Siehe auch Faktoren unten in der Abbildung; d) Der EBIT-Effekt wird als Erhöhung der EBIT-Marge in Prozentpunkten gemessen (siehe auch Kap. 5.1 Methodik, S. 108 ff.); e) Faktor = Prozentzahl 2030/ Prozentzahl 2023; f) Der Wert wird über eine Gewichtung der Sektoren nach Umsatz ermittelt (siehe Kap. 5.1 Berechnungen, S. 113 f.). Quellen: 1) BMEL, 2024; 2) Deutscher Bundestag, 2022; 3) Michel, 2022; 4) Schlautmann, 2023.

Profitabilität

Absolute EBIT-Erhöhung je Sektor 2023 und 2030



Digitale Technologien erhöhten das EBIT der fünf Schlüsselsektoren im Jahr 2023 im Schnitt um rund 9 %.^a Das entspricht etwa 28 Mrd. EUR.

Schon jetzt tragen digitale Technologien in allen fünf Sektoren zur Erhöhung des EBIT bei. Absolut betrachtet konzentriert sich die EBIT-Zunahme mit fast 23 Mrd. EUR auf den Industriesektor, der mit 86 %^b im Vergleich zu den anderen Sektoren den weitaus höchsten Anteil am Gesamtumsatz der untersuchten Sektoren hat.

Bis 2030 ist eine absolute EBIT-Erhöhung durch Digitalisierung auf 53 Mrd. EUR möglich. Das wäre fast eine Verdoppelung.

In allen Sektoren bestehen Chancen, das EBIT bis 2030 durch den Einsatz digitaler Technologien zu steigern. Am größten werden die EBIT-Effekte in den Sektoren Logistik, Strom und Gebäude sein (siehe Abb.). Absolut betrachtet allerdings wird die Steigerung des EBIT im Industriesektor mit rund 42 Mrd. EUR im Jahr 2030 am höchsten ausfallen (siehe Abb.).

Anmerkungen: a) EBIT-Erhöhung 2023 im Verhältnis zum Gesamt-EBIT 2023 der betrachteten Sektoren: 28,1 Mrd. EUR/308,1 Mrd. EUR; b) Umsatz im Sektor Industrie 2023 im Verhältnis zum Gesamtumsatz 2023 der betrachteten Sektoren: 1.870 Mrd. EUR/2.164 Mrd. EUR.

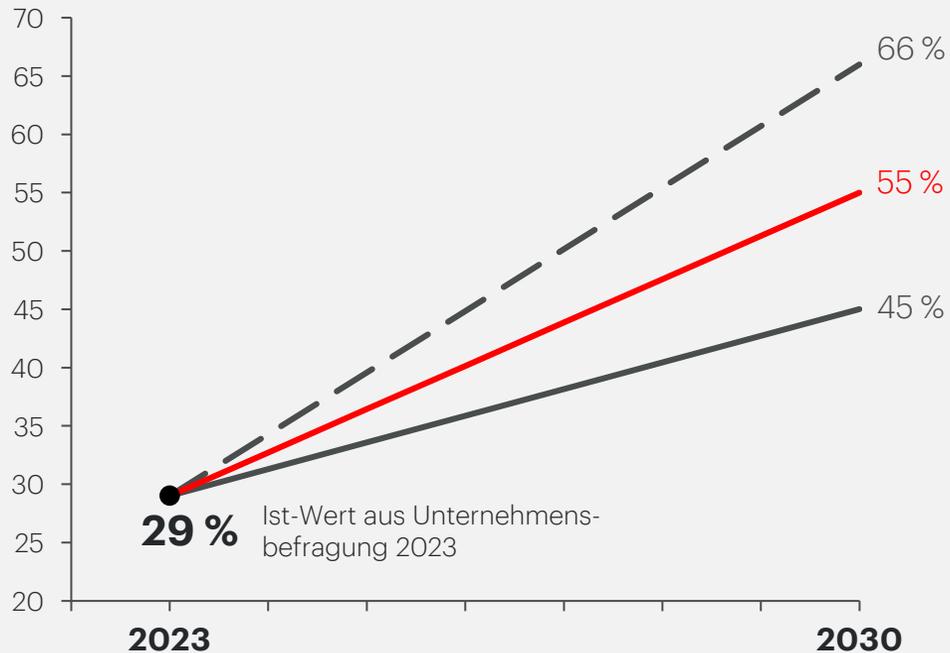
1 SEED-Index

1.4 Adaption digitaler
Technologien



Mit einer Adaptionrate^a digitaler Technologien von heute durchschnittlich 29 % haben deutsche Unternehmen klar Nachholbedarf.

Adaptionrate [%]



--- Ambitionierte Entwicklung

② — SEED-Adaptionpfad^b

① — Praktisch erwartete Entwicklung^c

Adaption digitaler Technologien 55 % bis 2030 sind möglich!

Der SEED-Adaptionpfad skizziert eine mögliche Entwicklung zwischen ambitionierter Digitalisierung weltweit und erwartbarer Zurückhaltung hierzulande. Er zielt ab auf eine 55%ige Adaption digitaler Technologien bis 2030 statt auf die aus den Unternehmensbefragungen abgeleiteten 45 %.

Der SEED-Adaptionpfad stellt auf Basis des Ist-Werts einen Entwicklungspfad für die Digitalisierung der deutschen Wirtschaft dar, der sowohl pragmatische als auch ambitionierte Ziele setzt. Er ermöglicht in den kommenden Jahren eine Fortschrittsmessung der Digitalisierung im Kontext dieser Untersuchung. Er kann und soll damit auch als Orientierung dafür dienen, was deutschen Unternehmen in Sachen Dekarbonisierung und Profitabilität durch digitale Technologien möglich ist, wenn sie über die aus der Befragung ableitbare Adaptionrate von 45 % hinausgehen.

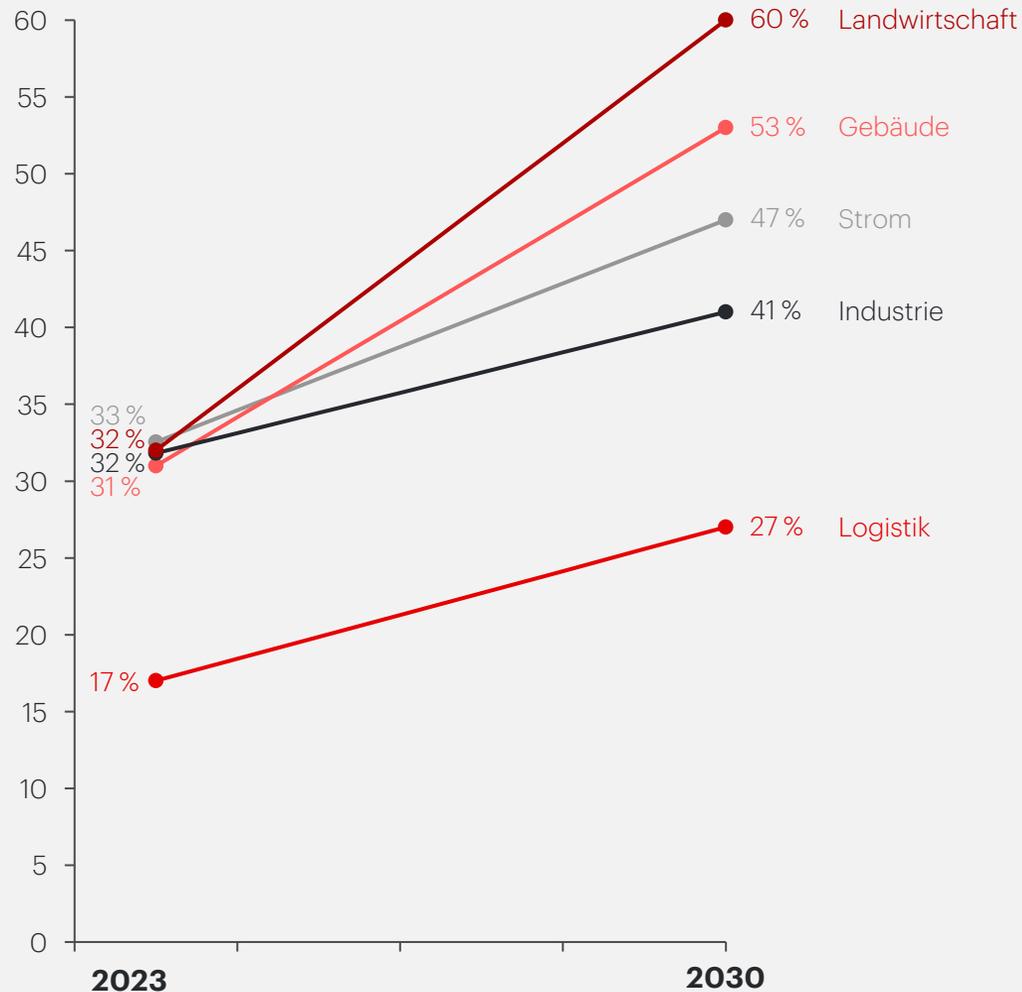
Der Zielwert von 55 % ergibt sich aus zwei Werten: Der erste ist die erwartete durchschnittliche Adaptionrate für 2030, die aus der Unternehmensbefragung resultiert und erfahrungsgemäß zurückhaltend eingeschätzt wurde. Der zweite Wert ist die erwartete durchschnittliche Adaptionrate, die sich aus Sekundärdaten, Prognosen für führende Länder, Unternehmen und Use Cases ergibt und mit durchschnittlich 66 % zu veranschlagen ist.

Anmerkungen: Die Nummern 1 und 2 in der Legende dienen als Referenz für die nächsten 3 Seiten; a) Zur Definition siehe [S.14](#); b) Abweichungen bei den Mittelwerten resultieren aus Rundungen; c) Auf Basis der Unternehmensbefragung.

1

Adaptionsraten deutscher Unternehmen 2030 laut Befragung^a

[in %]



Adaption digitaler Technologien Ambitionslos in die Zukunft. Warum?

In allen fünf Schlüsselsektoren zeigen die befragten Unternehmen nur geringe Ambitionen, die Digitalisierung bis 2030 in hohem Maße zu beschleunigen.

Mehrere Gründe können diese Entwicklung erklären:

- 1. Regulatorische Herausforderungen:** Die im internationalen Vergleich strengeren Datenschutzgesetze und Vorschriften¹ in Deutschland führen in den Unternehmen zu zusätzlichem Aufwand und damit zur verzögerten Einführung von Technologien, vor allem solchen, die auf Künstlicher Intelligenz und Big Data basieren.
- 2. Fehlende digitale Infrastruktur:** In einigen Regionen Deutschlands, vor allem in ländlichen Gebieten, mangelt es an einer ausreichenden digitalen Infrastruktur, insbesondere bei der Breitbandversorgung.² Die Einführung digitaler Technologien wie Cloud-Echtzeitdaten, die große Datenbandbreiten benötigen, ist dort schwierig.
- 3. Fachkräftemangel:** Viele Unternehmen haben Schwierigkeiten, qualifizierte Fachkräfte zu finden, die über die notwendigen digitalen Kompetenzen, auch zu Randthemen wie Daten- und Cybersicherheit, verfügen.

Der Mittelstand ist von diesen Einschränkungen stärker betroffen als die großen Unternehmen, da seine Möglichkeiten, Risiken zu streuen, geeignetes Personal anzuwerben und hohe Investitionen zu tätigen, begrenzter sind.

Anmerkungen: Abweichungen bei den Mittelwerten resultieren aus Rundungen; a) Adaptionsraten für 2023 und 2030 basieren auf Daten aus der Unternehmensbefragung.

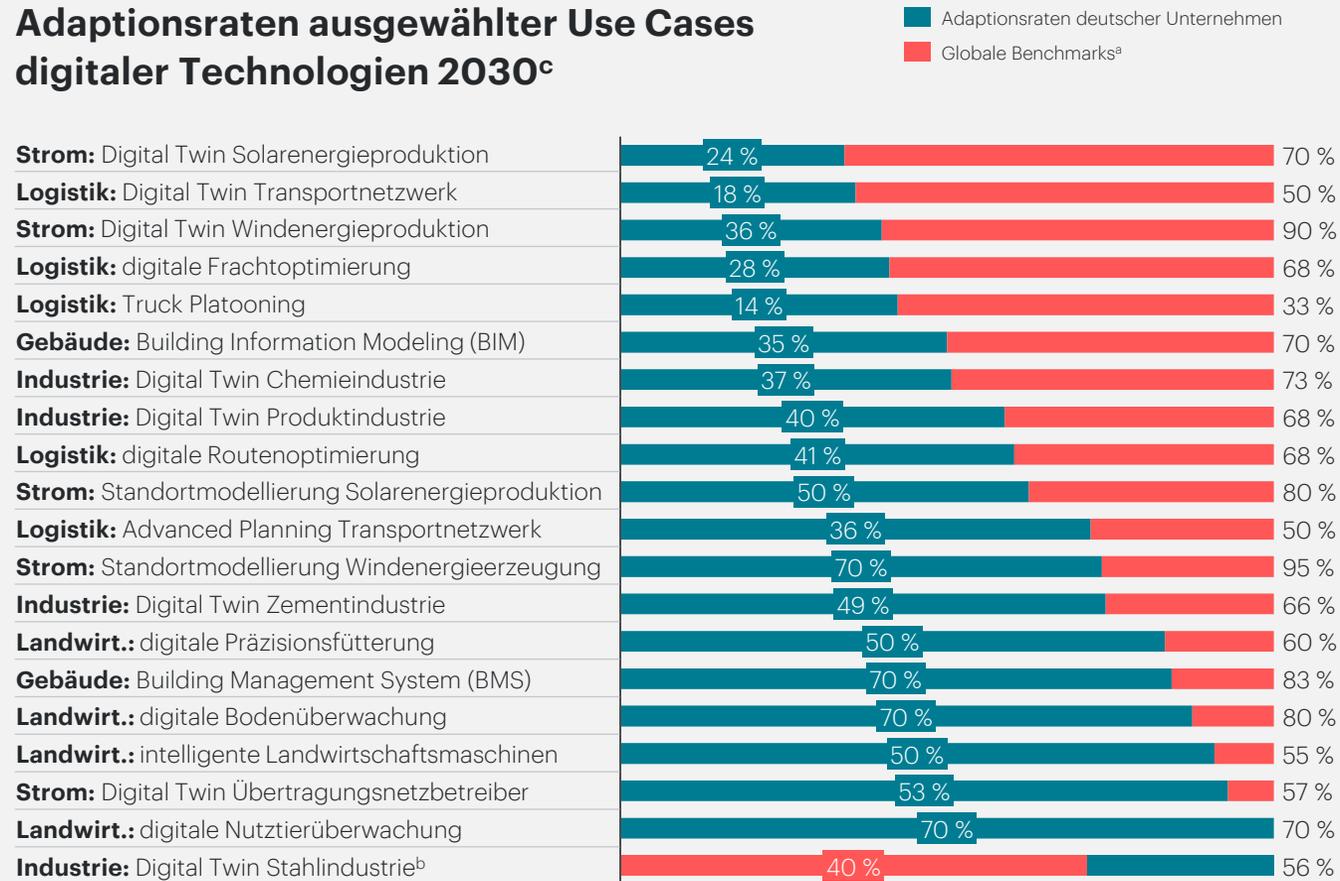
Quellen: 1) Bitkom, 2022; Handelsblatt, 2022; 2) Handelsblatt, 2021.

1

Adaption digitaler Technologien

Entwicklung ausgewählter Use Cases bis 2030 im Vergleich

Adaptionsraten ausgewählter Use Cases digitaler Technologien 2030^c



Die weltweit zu erwartenden Adaptionsraten stellen die Ambitionen der deutschen Unternehmen meist in den Schatten.

Der Vergleich der Adaptionsraten digitaler Technologien zwischen deutschen Unternehmen und globalen Benchmarks^a zeigt, dass über die verschiedenen Use Cases hinweg bis 2030 unterschiedlich große Zielabweichungen bestehen. Während sich bei einigen Use Cases (z.B. im Strom-, Gebäude- und Logistiksektor) große Unterschiede zeigen, ist der Abstand in anderen Sektoren (z.B. in der Landwirtschaft) deutlich geringer. Bei der Nutzung von digitalen Zwillingen (Digital Twins) in der Stahlindustrie^b mit Sauerstoffhochöfen gelten deutsche Unternehmen sogar als führend.

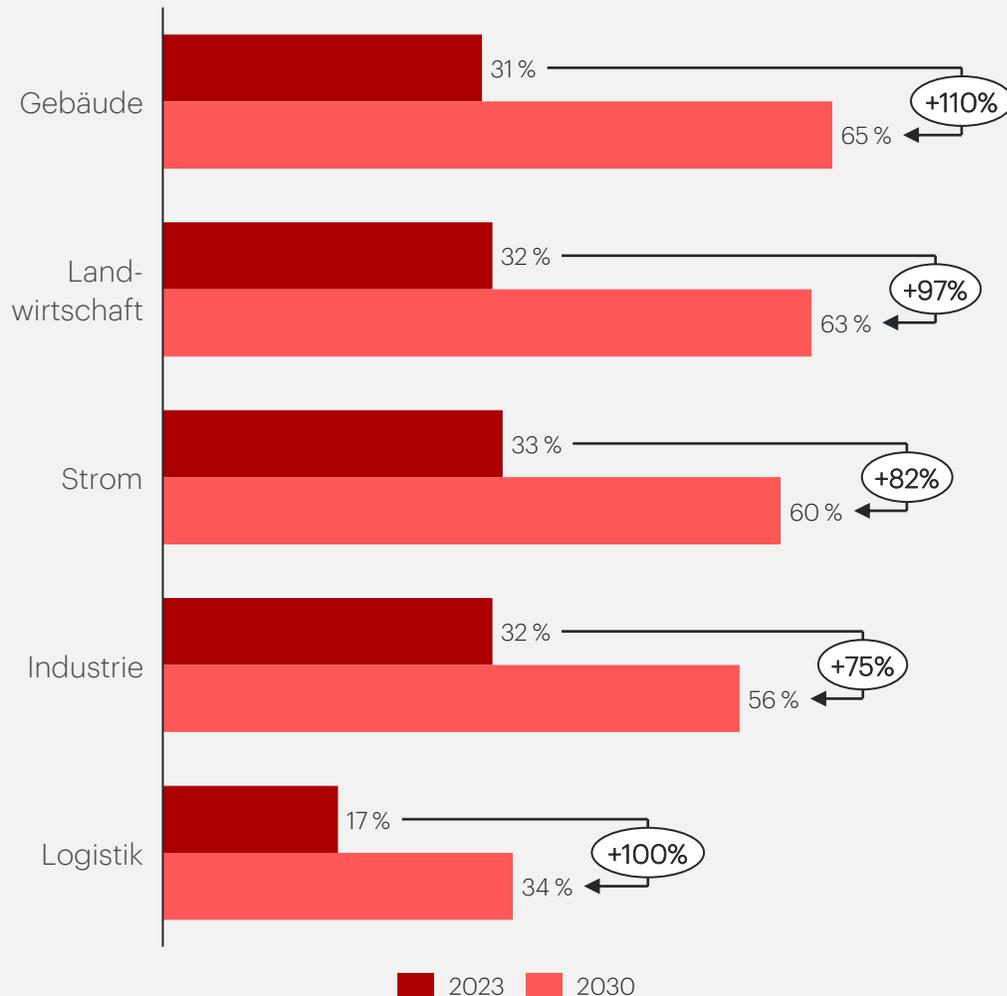
| Sektor | Durchschnittliche Differenz |
|----------------|-----------------------------|
| Gebäude | 24 % |
| Industrie | 16 % |
| Landwirtschaft | 6 % |
| Logistik | 23 % |
| Strom | 28 % |

Anmerkungen: a) Zur Definition siehe Definitionsbox, S. 14; b) Bei der Nutzung von Digital Twins in der Stahlindustrie mit Sauerstoffhochöfen gelten deutsche Unternehmen mit einer Adaptionsrate von 56 % als führend im Rahmen globaler Benchmarks (siehe auch Auswertung Stahlindustrie, S. 48); c) Einige Use Cases, wie z. B. der Digital Twin in der Zementindustrie, beinhalten weitere Sub-Use-Cases. Die in der Grafik dargestellten Werte sind Durchschnittswerte dieser Sub-Use-Cases. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die sechs zusätzlichen Sub-Use-Cases in der Grafik nicht einzeln aufgeführt.

2

Adaptionsraten gemäß SEED-Adaptionspfad^b

[Adaptionsraten in %; Anstiege in Prozentpunkten]



Anmerkungen: a) Siehe auch Use-Case-Beschreibung, S. 40 f.; b) Siehe SEED-Zielpfadlogik (siehe S. 26).
Quelle: 1) Kümmerlen, 2023.

Adaption digitaler Technologien Bis 2030 Verdopplung in fast allen Sektoren

Gemäß dem durchaus realistischen SEED-Adaptionspfad wird sich die Adaption digitaler Technologien zwischen 2023 und 2030 in fast allen Sektoren verdoppeln.

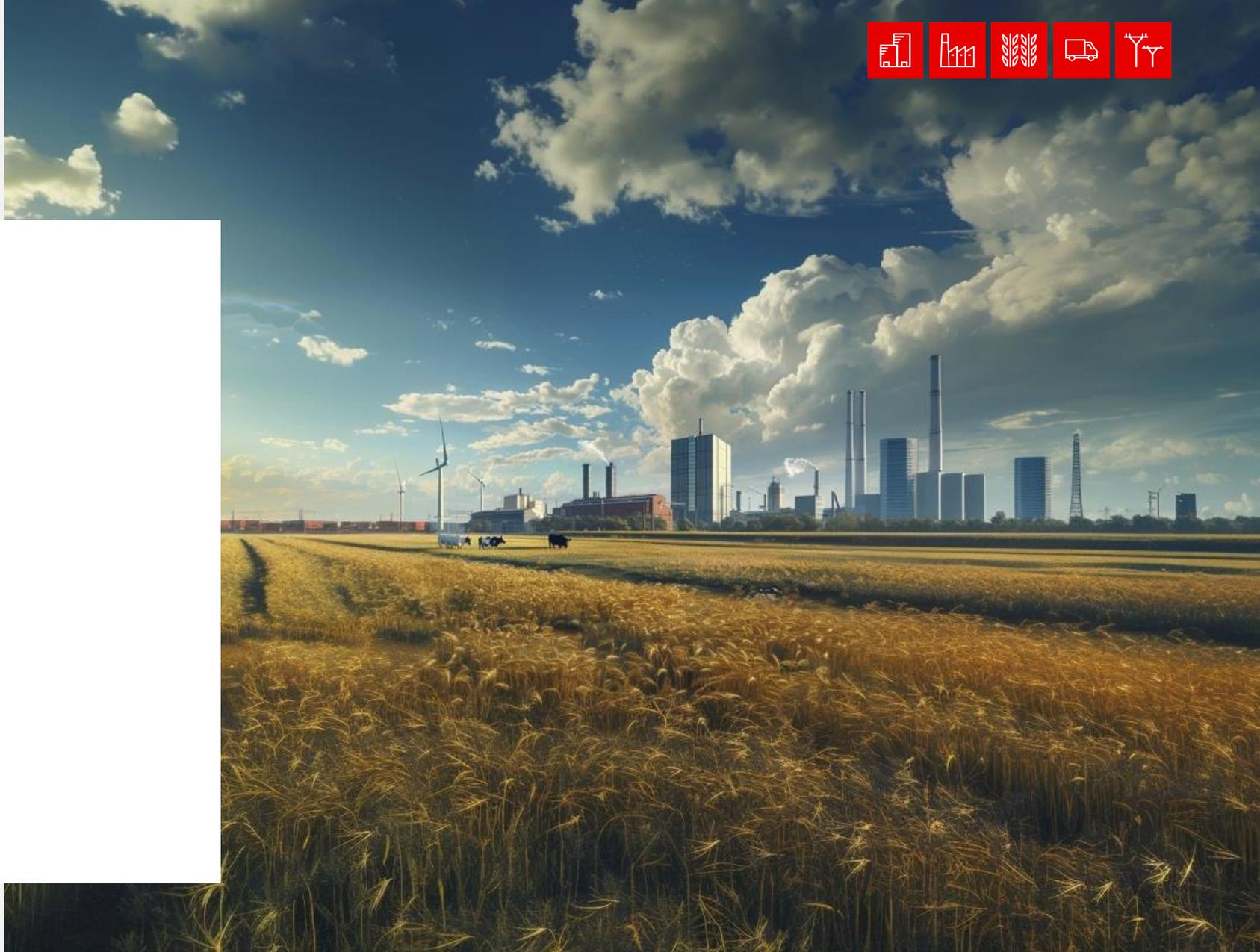
Aus der SEED-Zielpfadlogik (siehe S. 26) ergeben sich für alle Sektoren bis 2030 Adaptionsraten, die im Schnitt doppelt so hoch sind wie heute.

Am höchsten wird die Adaption digitaler Technologien von 2023 bis 2030 demnach im Gebäudesektor ausfallen. Für einen sprunghaften Anstieg der Adaptionsrate von 31 auf 65 % im Jahr 2030 werden insbesondere Gebäudemanagementsysteme (Building Management Systems – BMS) in Nichtwohngebäuden sorgen.^a

Dagegen wird vor allem der Logistiksektor, in dem Deutschland über viele Jahre ein Vorbild war,¹ aufgrund des Fachkräftemangels und der in hohem Maße mittelständisch^b geprägten Struktur Schwierigkeiten haben, bis 2030 hohe Adaptionsraten in der Breite zu erreichen.

Die folgenden Kapitel zur Sektorauswertung zeigen auf, welche Use Cases digitaler Technologien bei den aufgezeigten Adaptionspfaden zur Anwendung kommen und welche Effekte sie auf die Dekarbonisierung und die Profitabilität im jeweiligen Sektor haben.

2 Sektor- auswertung



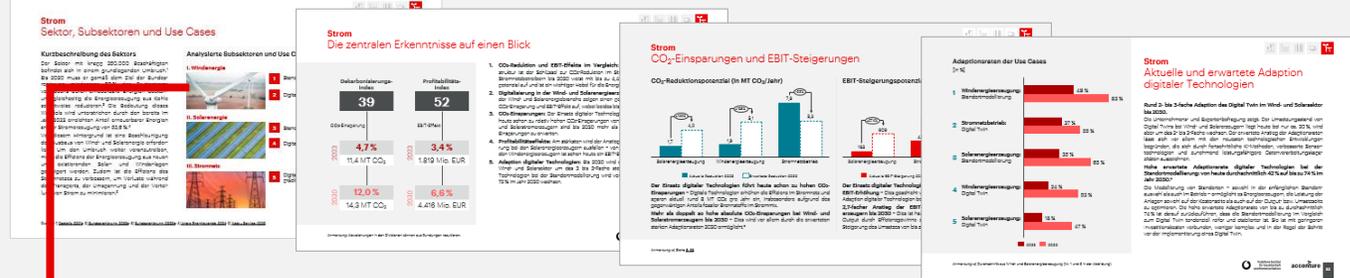
Sektor

Kurzbeschreibung des Sektors und Scope

Zentrale Erkenntnisse

CO₂-Reduktion und EBIT-Effekte im Vergleich^a

Adaption digitaler Technologien

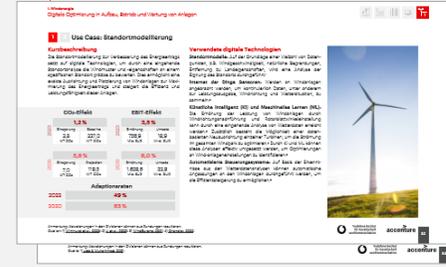


Subsektor



Beschreibung, CO₂- und EBIT-Effekte, Herausforderungen, Digitalisierungsfelder, Use Cases

Use Case



Kurzbeschreibung, CO₂- und EBIT-Effekte, verwendete digitale Technologien

Anmerkungen: a) Um die Lesbarkeit zu verbessern, erfolgen die Darstellungen hier entweder auf Subsektor- oder Use-Case-Ebene, abhängig von der Anzahl der betrachteten Subsektoren; b) In der Abbildung dargestellt am Beispiel des Stromsektors.

Sektorauswertung Aufbau der Kapitel^b

In den folgenden Sektorauswertungen werden die Effekte digitaler Technologien hinsichtlich CO₂-Reduktion und EBIT-Steigerung auf Use-Case-Ebene untersucht und auf Sektor- und Subsektorebene aggregiert.

Die Gliederung bzw. Dokumentation der Sektorkapitel ist dagegen top-down gemäß der Darstellung links strukturiert.

Die Kapitel enthalten sowohl qualitative Beschreibungen zu Herausforderungen und digitalen Technologien als auch quantitative Ergebnisse zu den Adaptionraten digitaler Technologien und den damit verbundenen CO₂- und EBIT-Effekten.

2 Sektor- auswertung

2.1 Gebäude



Gebäude Sektor, Subsektoren und Use Cases

Kurzbeschreibung des Sektors

Der Gebäudesektor umfasst die Planung, den Bau und das Management von Gebäuden. Mit einem Anteil von ca. 41% an den CO₂-Emissionen Deutschlands ist er einer der größten Emittenten und gilt als Schlüssel-sektor für die Erreichung der Klimaziele.¹

Die Bauwirtschaft, die knapp 1 Mio. Menschen beschäftigt,² konzentriert sich auf die physische Errichtung von Gebäuden – öffentliche Gebäude, Gewerbe- und Industriebauten ebenso wie Privathäuser und Wohnimmobilien. Angesichts steigender Materialpreise, zunehmenden Personalmangels und wachsender Anforderungen an die Energieeffizienz von Neubauten gewinnt nachhaltiges und digital unterstütztes Bauen an Relevanz.

Allein der Betrieb von Gebäuden macht in Deutschland fast ein Drittel der CO₂-Emissionen und ca. 35% des Endenergieverbrauchs aus.³ Im Subsektor Gebäudemanagement liegt der Fokus deshalb auf der effizienten Bewirtschaftung bestehender Gebäude. So spielt das technische Gebäudemanagement als Teil des Facility Managements eine entscheidende Rolle für die Reduktion der Energie- und Wärmeverbräuche.

Analysierte Subsektoren und Use Cases

I. Bauwirtschaft



1 Building Information Modeling (BIM)

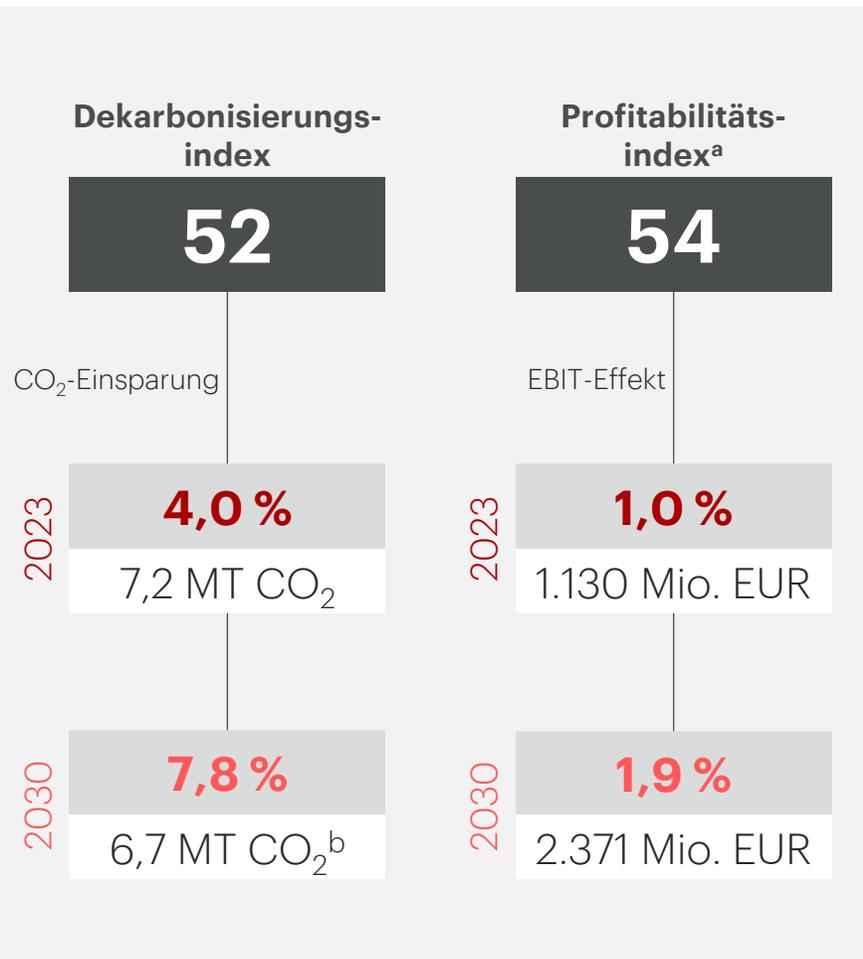
II. Gebäudemanagement



2 Building Management System (BMS) in Nichtwohngebäuden

Gebäude

Die zentralen Erkenntnisse auf einen Blick

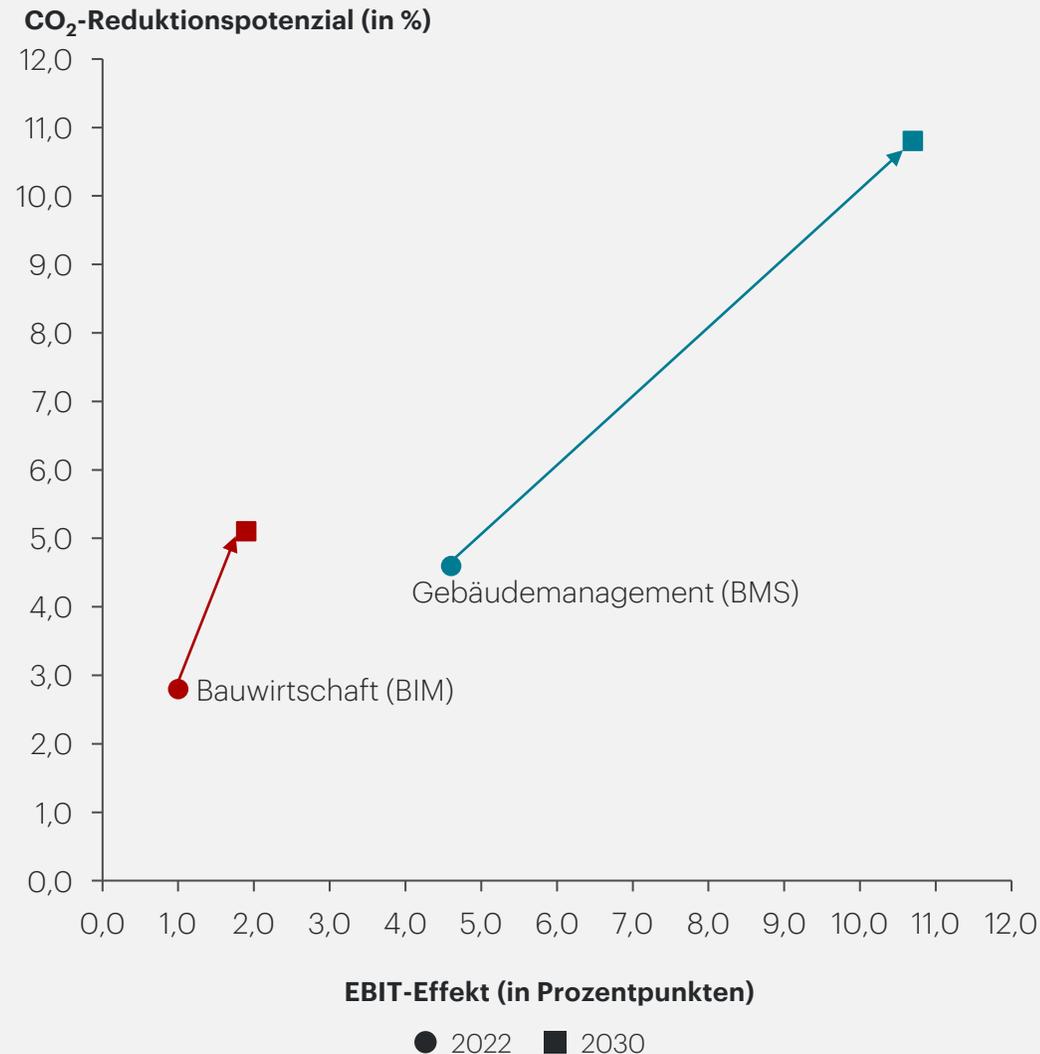


- Hohe CO₂-Emissionen:** Mit einem Anteil von ca. 41 % am CO₂-Ausstoß Deutschlands ist der Gebäudesektor einer der größten Emittenten und spielt eine Schlüsselrolle für die Erreichung der Klimaziele.¹
- Große CO₂-Einsparungen:** Der Einsatz digitaler Technologien führt insbesondere im Gebäudemanagement schon heute zu hohen absoluten CO₂-Einsparungen. Alleine bei Nichtwohngebäuden lassen sich rund 11 % der CO₂-Emissionen im Jahr 2030 durch Gebäudemanagementsysteme (BMS) reduzieren. Sie werden sich mit der fortschreitenden Elektrifizierung im Gebäudesektor und dem Ersatz fossiler durch erneuerbare Energien bis 2030 allerdings absolut verringern.
- Positive EBIT-Effekte:** Digitale Technologien erweisen sich im Gebäudesektor als Profitabilitätstreiber und führen bis 2030 zu einer absoluten Steigerung von über 2,3 Mrd. EUR. Vor allem in der Bauwirtschaft ist aufgrund von Materialeinsparungen von bis zu 9 % und einer Verkürzung der Bauzeit von bis zu 18 % mit einer weiteren Profitabilitätssteigerung zu rechnen.
- Hohe Adaptionrate digitaler Technologien:** Der Gebäudesektor ist auf gutem Wege, digitale Technologien zu implementieren. Mit 78 % ist die bis 2030 erwartete Adaptionrate im Subsektor Gebäudemanagement verglichen mit der Bauwirtschaft (53 %) besonders hoch. Die positiven EBIT-Effekte, gepaart mit neuen effizienten Optimierungsmöglichkeiten durch Künstliche Intelligenz steigern die Adaptionrate im Gebäudemanagement zwischen 2023 und 2030 um den Faktor 2,3.

Anmerkungen: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren; a) Die EBIT-Steigerungen durch den Use Case BMS fließen nicht in den Profitabilitätsindex des Gebäudesektors ein, da die Kosteneinsparungen durch BMS im EBIT der Mieter von Gebäuden wirksam werden; b) Trotz höherer Prozentwerte können die absoluten CO₂-Einsparungen bis 2030 sinken, wie das Beispiel zeigt, abhängig von der Basis; siehe auch Kap. 5.1 Methodik – Berechnungen, S. 103 ff. Quelle: 1) Vbw, 2021.

Gebäude

CO₂-Reduktion und EBIT-Effekte im Vergleich



Rund 11 % der CO₂-Emissionen im Gebäudesektor lassen sich im Jahr 2030 durch Digitalisierung reduzieren.

Die Hauptquelle dieser signifikanten CO₂-Einsparungen liegt im reduzierten Energieverbrauch in der Gebäudenutzung, der durch den Einsatz digitaler Technologien in Gebäudemanagementsystemen (BMS) erzielt wird. Insbesondere die intelligente und automatisierte Steuerung von Heizungs/-, Warmwassersystemen, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung ermöglichen nach den Ergebnissen der Unternehmensumfrage Energieeinsparungen von 10 bis 19 %. Da Gebäudemanagementsysteme (BMS) über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes zur Anwendung kommen, spielen sie auch eine Schlüsselrolle in der langfristigen Reduzierung des Energieverbrauchs. Die Einführung von Smart-Meter, unterstützt durch nationale Programme wie den Smart-Meter-Rollout-Plan¹ sowie die Förderung erneuerbarer Energien spielen dabei ebenfalls eine zentrale Rolle.²

Beitrag der Bauwirtschaft ist im Vergleich deutlich geringer.

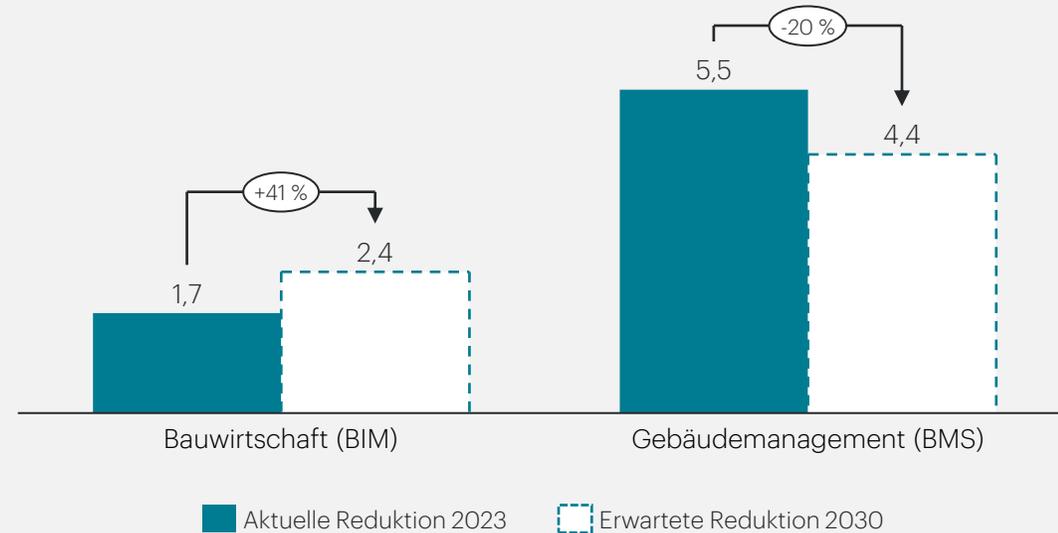
Die CO₂-Emissionen im Subsektor Gebäudemanagement für Nichtwohngebäude, etwa 114 MT CO₂ im Jahr 2022, übersteigen die der Bauwirtschaft, ca. 60 MT CO₂ im gleichen Jahr.^a Dennoch können digitale Lösungen, wie Digital Twins von Baustellen (BIM^b), auch in der Bauwirtschaft zu bedeutsamen CO₂-Einsparungen beitragen und zugleich die Profitabilität steigern (siehe Abbildung).

Anmerkungen: a) Siehe CO₂-Emissionsprojektionen in Kap. 5.2 Zahlen im Detail, S.117; b) Building Information Modeling (BIM) wird gelegentlich auch als Digital Twin einer Baustelle bezeichnet.
 Quellen: 1) BMWK, 2023d; 2) Hartmann, 2023.

Gebäude

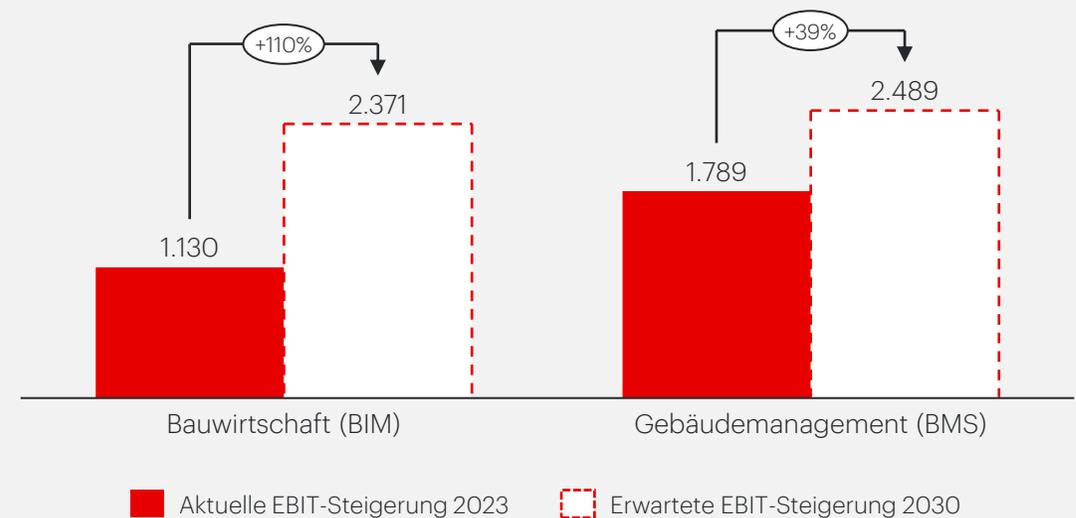
CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerungen

CO₂-Reduktionspotenzial (in MT CO₂/Jahr)



Der Einsatz digitaler Technologien im Gebäudemanagement führt heute und 2030 zu hohen absoluten CO₂-Einsparungen – Mit der fortschreitenden Elektrifizierung in Gebäudesystemen, zum Beispiel durch Wärmepumpen¹, und dem Ersatz fossiler Brennstoffe durch erneuerbare Energien wird sich das absolute CO₂-Reduktionspotenzial bis 2030 allerdings verringern, da auch die Gesamt-CO₂-Emissionen des Gebäudemanagements bis 2030 sinken.^a

EBIT-Steigerungspotenzial (in Mio. EUR)



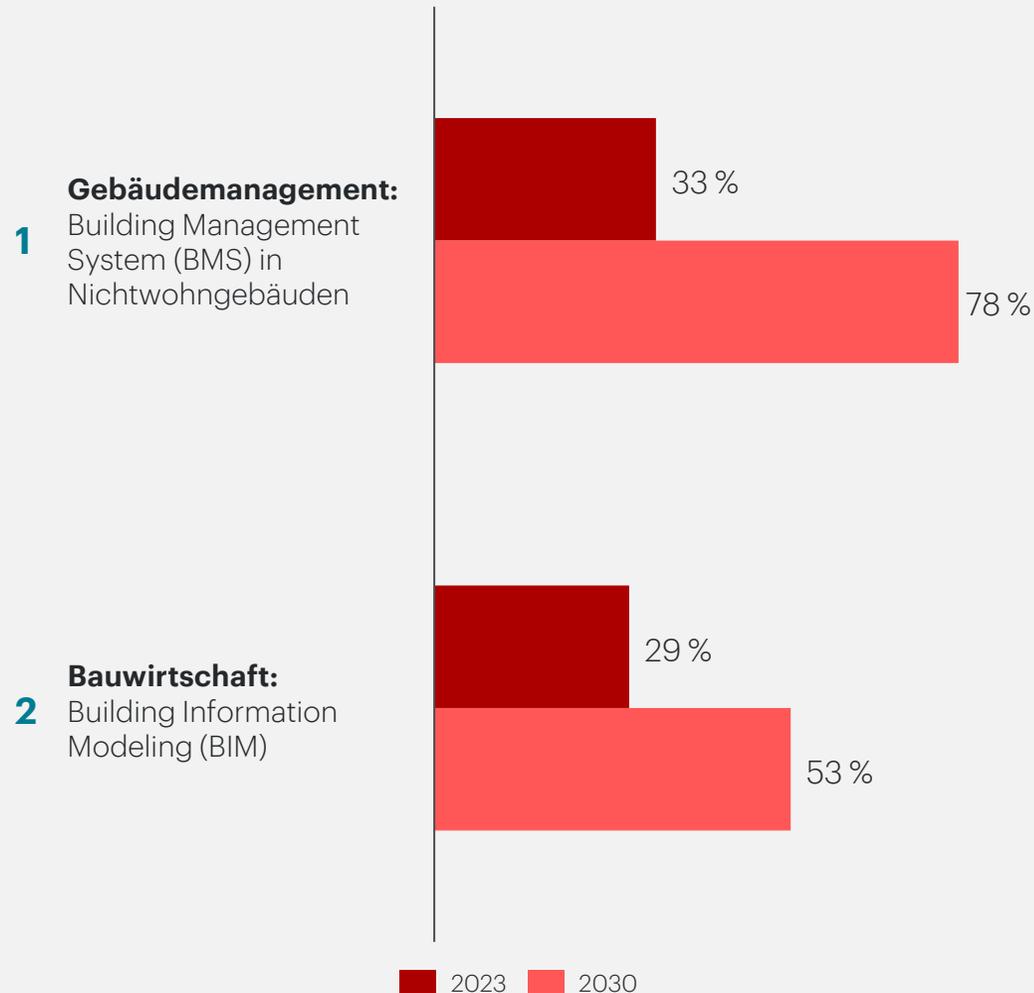
In der Bauwirtschaft und im Gebäudemanagement werden für 2030 ähnliche Profitabilitätseffekte erwartet – Digitale Technologien erweisen sich im Gebäudesektor als Profitabilitätstreiber und führen zu einer absoluten Steigerung von über 2,3 Mrd. EUR.

In der Bauwirtschaft ist mit einer Verdopplung des EBIT-Effekts zu rechnen – Aufgrund von Materialeinsparungen von bis zu 9 % und einer Verkürzung der Bauzeit von bis zu 18 % haben digitale Technologien angesichts steigender Kosten einen positiven Einfluss auf die Profitabilität.^b

Anmerkungen: a) Siehe CO₂-Emissionsprojektionen in Kap. 5.2 Zahlen im Detail, S.117; b) Basierend auf den Daten der Unternehmensbefragung.
 Quellen: 1) BWP, 2023; Krapp, 2023.

Adaptionsraten der Use Cases

[in %]



Gebäude Aktuelle und erwartete Adaption digitaler Technologien

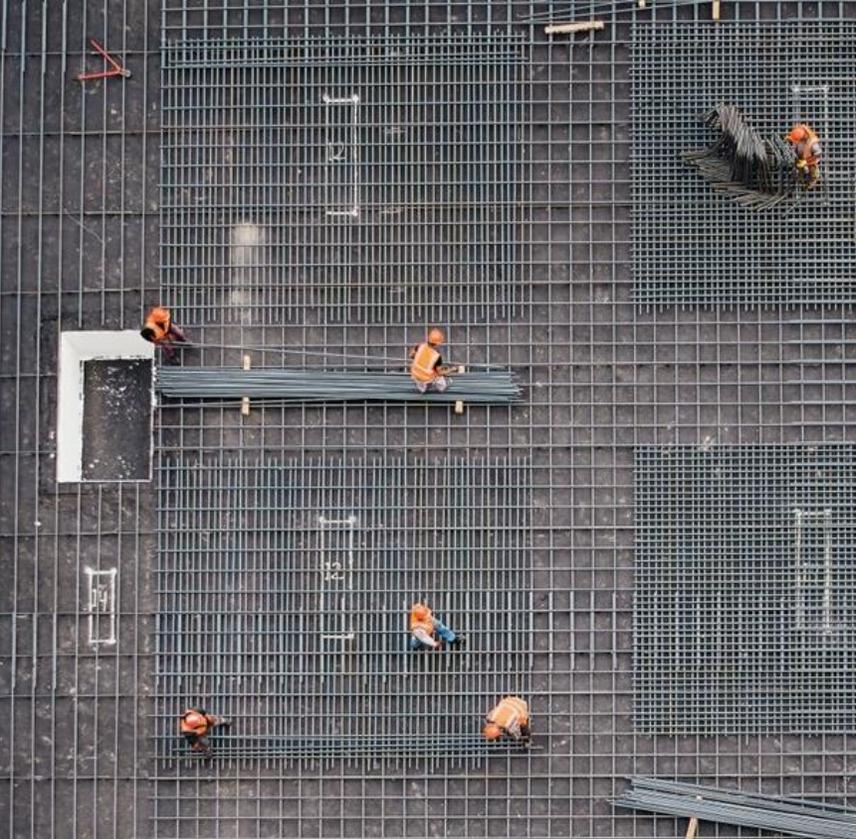
Die Adaptionsrate von Building Management Systems (BMS) wird bis 2030 voraussichtlich um das 2,3-Fache steigen.

Es gibt zwei Entwicklungen im Zusammenhang mit dieser Steigerung: Zum einen sinken die Anschaffungskosten für BMS und die Einführung innovativer Technologien wie Künstlicher Intelligenz (KI) und Analytics erlauben neue Optimierungsmöglichkeiten.¹ Zum anderen stellen die hohen EBIT-Effekte von bis zu 11 % (siehe S. 35) einen finanziellen Anreiz für die Unternehmen dar. Diese beiden Entwicklungen werden die Marktdurchdringung weiter vorantreiben und bis 2030 zu weiteren CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerungen führen.

Die Adaptionsrate von Building Information Modeling (BIM) wird dagegen nur um das 0,8-Fache zunehmen.

Aktuell nutzen etwa 29 % der Bauunternehmen Digital Twins bzw. BIM-Systeme in verschiedenen Reifegraden der digitalen Zusammenarbeit und profitieren von Kosten- und Materialeinsparungen in der Planungs- und Bauphase.^a Da diese umso höher ausfallen, je enger die digitale Zusammenarbeit ist, wird bis 2030 mit einem höheren durchschnittlichen Reifegrad derselben gerechnet. Die dennoch vergleichsweise geringe Steigerung der Adaptionsrate liegt daran, dass vor allem kleinere Unternehmen sich aufgrund aufwändiger Schulungen und zusätzlicher Kosten mit der Implementierung von BIM schwertun, vor allem im Ökosystem der Subunternehmer.

Anmerkung: a) Basierend auf den Daten der Unternehmensbefragung.
Quelle: 1) [Rieder, 2023](#).



I. Bauwirtschaft

Modellierung, Planung und Durchführung von Bauprozessen

Beschreibung des Subsektors

Als eine der Schlüsselindustrien in Deutschland macht die Bauwirtschaft 6% der nominalen Bruttowertschöpfung aus. Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht ist sie die bedeutsamste Industrie nach dem Dienstleistungssektor und dem produzierenden Gewerbe.¹

Durch die Herstellung von Baumaterialien sowie von deren Transport und den entsprechenden Energieverbrauch ist die Bauwirtschaft für etwa 12%^{2,3,4} des deutschen CO₂-Ausstoßes verantwortlich. Als Norm gibt die DIN EN ISO 19650-1:2019-08 Auskunft zur Organisation und Digitalisierung von Bauwerksinformationen, einschließlich der Bauwerksinformationsmodellierung^{a,5}

Herausforderungen und Digitalisierungsfelder

Neben dem Fachkräftemangel⁶ ist die effektive und effiziente Koordination und Integration aller Beteiligten eine zentrale Herausforderung im Baugewerbe. Ein unzureichender Informationsaustausch führt bei Bauprojekten zu Schwierigkeiten bei der Anlieferung und Lagerung von Baumaterialien, Verzögerungen, Baufehlern und verlängerten Bauphasen. Koordination und Integration sind somit entscheidende Faktoren, wenn es darum geht, einen kostengünstigen, genauen, transparenten und planmäßigen Bauprozess ohne Konstruktionsfehler zu ermöglichen.

Die Digitalisierung bietet eine Vielzahl von Chancen für die Zukunft des Baugewerbes. Um diese Vorteile vollständig zu nutzen, ist ein gesamtheitlicher und umfassender Ansatz notwendig, der die Planungs-, Bau- und Betriebsphasen der Gebäude abdeckt und den Informationsaustausch zwischen den Beteiligten sicherstellt.

Building Information Modeling (BIM) als Antwort auf diese aktuellen Herausforderungen der Branche sorgt für eine digitalisierte, effiziente und nachhaltige Zukunft der Baubranche.

Use Case

1 Building Information Modeling (BIM)

| | CO ₂ -Effekt | EBIT-Effekt |
|------|--|----------------------------------|
| 2023 | 2,8 % 1,7 MT CO ₂ | 1,0 % 1.130,1 Mio. EUR |
| 2030 | 5,1 % 2,4 MT CO ₂ | 1,9 % 2.371,4 Mio. EUR |

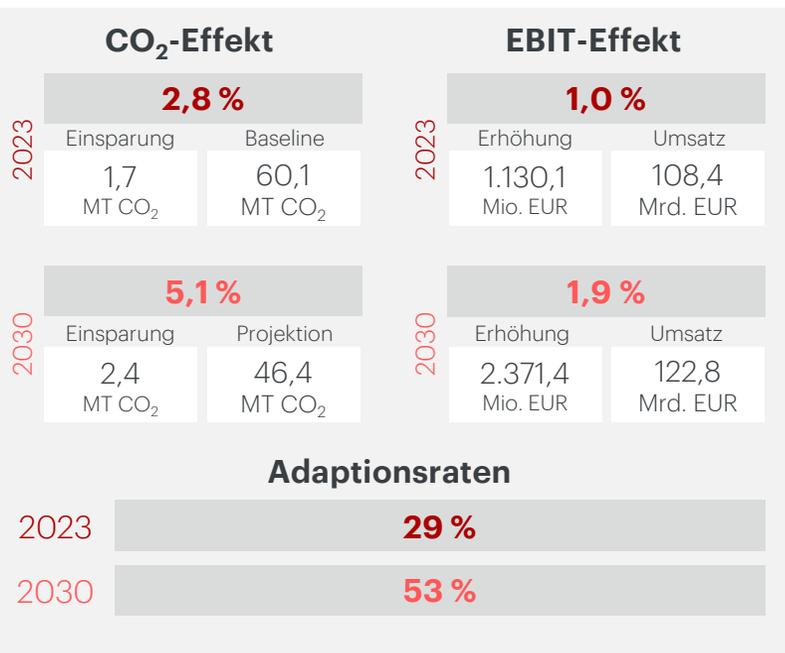
Anmerkung: a) Auch unter dem Begriff „Building Information Modeling“ (BIM) bekannt.
 Quellen: 1) Destatis, 2024c; 2) Vbw, 2021; 3) UBA, 2023g; 4) Dena, 2023; 5) Baunormlexikon, 2023; 6) Handelsblatt, 2023a.



1 Use Case: Building Information Modeling (BIM)

Kurzbeschreibung

BIM revolutioniert Bau- und Planungsprozesse durch ein 3D-Modell¹ und kontinuierlichen Datenaustausch². Die Zusammenarbeit ist geprägt von Transparenz und präziser Koordination. Modellierungs- und Kollisionsprüfungen ermöglichen das frühzeitige Erkennen von Unstimmigkeiten, steuern Kosten während der Konstruktionsphase und bieten langfristige Vorteile in Sachen Effizienz, Wartung und Instandhaltung im Betrieb trotz zusätzlichen Planungsaufwands.³



Verwendete digitale Technologien

BIM-Managementsoftware, inklusive:

- **Simulations- und Modellierungssoftware (3D):** Diese Software ermöglicht die Erstellung und Simulation von detaillierten dreidimensionalen Gebäudemodellen, um Planung, Design, Konstruktion und Management von Gebäuden und Infrastrukturen zu optimieren.
- **(Cloud-)Plattform/Common Data Environment (CDE):** Eine zentrale digitale Cloud-Plattform, die es Projektbeteiligten ermöglicht, Informationen und Daten in Echtzeit zu teilen, zu verwalten und zu koordinieren, um die Zusammenarbeit und Effizienz bei Bauprojekten zu verbessern.

Unterschieden werden folgende Reifegrade eines BIM:

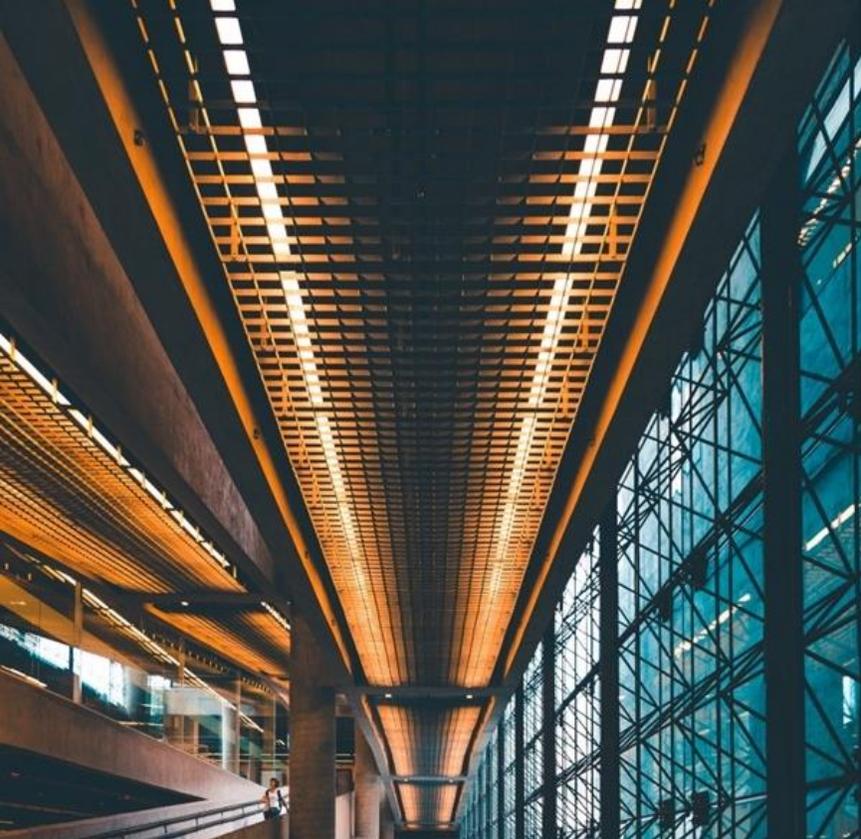
- **Stufe 0 – Keine digitale Zusammenarbeit:** 2D-Zeichnungen (z.B. CAD^a), die nicht in einem digitalen Format geteilt werden.
- **Stufe 1 – Geringe digitale Zusammenarbeit:** Konzepte in 3D, aber Entwürfe und Dokumentation in 2D (Norm BS 1192:2007); eigene, isolierte Daten der Beteiligten.
- **Stufe 2 – Fortgeschrittene digitale Zusammenarbeit:** Teilweise verschiedene 3D-Modelle, aber Informationsaustausch dank gemeinsamen Standarddateiformats.
- **Stufe 3 – Vollständige digitale Zusammenarbeit:** Gemeinsames 3D-Modell in einer für alle Beteiligten zugänglichen Umgebung (Open BIM).

In Zukunft wird es noch weitere Stufen geben, z.B. 4D inkl. der Dimension Zeit, 5D und 6D.³



Anmerkungen: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren; a) Computer-Aided Design.

Quellen: 1) Bundesregierung, 2022; 2) BIM Deutschland, 2023; 3) Baldwin, 2018.



II. Gebäudemanagement

Effiziente Steuerung und Bewirtschaftung von Gebäuden

Beschreibung des Subsektors

Das Gebäudemanagement umfasst die Steuerung, Bewirtschaftung, Verwaltung und Überwachung von Gebäudeinfrastrukturen und ist ein wichtiger Teil des Gebäudesektors. Auf den Betrieb von Gebäuden entfallen 2023 in Deutschland rund 30 % der CO₂-Emissionen und etwa 35 % des Endenergieverbrauchs.¹ Nichtwohngebäude haben im selben Jahr wiederum einen Anteil von rund 37%.² Die bundesweit etwa 21 Mio. Nichtwohngebäude setzen sich aus einer Vielzahl von Gebäudetypen zusammen, darunter Büro-, Industrie- und öffentliche Bauten.^{3,4} Für die Erreichung der Klimaziele spielt das effiziente Management dieser Gebäude eine große Rolle.

Herausforderungen und Digitalisierungsfelder

Rund 73 Mrd. EUR werden deutschlandweit jährlich für Raumwärme, Warmwasser, Beleuchtung und Kühlung in Wohn- und Nichtwohngebäuden aufgewendet.¹ In Nichtwohngebäuden wurden 2021 etwa 330 Terrawattstunden (TWh) Energie verbraucht – das entspricht dem Verbrauch der Stadt Berlin. 70 % davon entfielen auf Raumwärme, etwa 17 % auf Beleuchtung und 7 % auf Klimakälte.⁵ Der Großteil des Energieverbrauchs basiert weiterhin auf fossilen Brennstoffen wie Heizöl, Erdgas oder Kohle.^{5,6}

Digitale Technologien leisten zusätzlich zur Gebäudeanierung und Umrüstung von Heizanlagen auf erneuerbare Energieträger¹ einen nachweisbaren Beitrag zur Reduktion von CO₂-Emissionen und Kosten.⁷ Ihre Bedeutung für das effiziente Gebäudemanagement nimmt deshalb stetig zu. Sie visualisieren Verbräuche, erfassen externe Faktoren und passen – gestützt durch Building Management Systeme (BMS) – Heizung, Belüftung, Klimatisierung und Beleuchtung automatisch an. So trägt das digitale Gebäudemanagement zur CO₂- und Kostenreduktion im Hinblick auf Nichtwohngebäude bei und hilft, die Profitabilität zu steigern.

Use Case

2 Building Management System (BMS) in Nichtwohngebäuden



| | CO ₂ -Effekt | EBIT-Effekt |
|------|---|---|
| 2023 | 4,6 % 5,5 MT CO ₂ | 4,6 %^a 1.789,1 Mio. EUR |
| 2030 | 10,8 % 4,4 MT CO ₂ | 10,7 %^a 2.488,5 Mio. EUR |

Anmerkung: a) Prozentualer Anteil der sektorübergreifenden Kosteneinsparungen an den Gesamtausgaben Deutschlands für Heizung, Warmwasser, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung. Grund: Die Kosteneinsparungen durch BMS werden sektorübergreifend im EBIT von Gebäudemietern wirksam und nicht nur bei den Unternehmen des Gebäudesektors.

Quellen: 1) UBA, 2023g; 2) Dena, 2023c; 3) Energiewendebauen, 2021; 4) Dena, 2023c; 5) Dena, 2022; 6) UBA, 2023l; 7) Handelsblatt, 2023b.



2 Use Case: Building Management System (BMS) in Nichtwohngebäuden

Kurzbeschreibung

Ein Gebäudemanagementsystem (BMS) ist eine computerbasierte Lösung zur zentralen Kontrolle und Überwachung von Gebäudetechnologien wie Heizung, Lüftung, Klimatisierung, Beleuchtung und Energiemanagement. Digitale Technologien optimieren den Energieverbrauch, verbessern die Temperatur- und Luftqualitätsregelung und ermöglichen ein effizientes Beleuchtungsmanagement.

Verwendete digitale Technologien

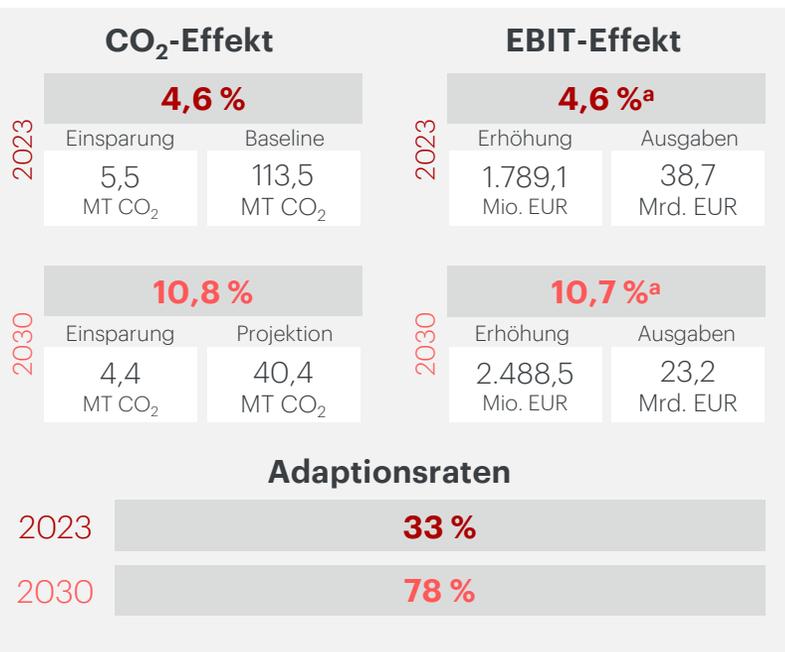
Sensortechnologie und Internet der Dinge (IoT): Erfassung von Echtzeitdaten zu Raumtemperaturen, Luftqualität, Lichtniveau und anderen Umweltbedingungen, um den Energieverbrauch zu optimieren.

Automatisierung und Regelung: Nutzung von automatisierten Systemen zur Steuerung von Heizung, Lüftung, Klimaanlage (HLK), Beleuchtung und anderen Gebäudefunktionen, um den Komfort zu maximieren und den Energieverbrauch zu minimieren.

Energiemanagementsysteme (EMS): Implementierung von EMS zur kontinuierlichen Überwachung, Analyse und Optimierung des Energieverbrauchs, einschließlich der Integration erneuerbarer Energien.

Künstliche Intelligenz (KI) und Data Analytics: Nutzung von KI-Algorithmen und Datenanalyse, um Muster im Gebäudeverhalten zu erkennen, Wartungsbedarf vorherzusagen und operative Abläufe zu optimieren.

Mobile Anwendungen: Anwendungen für Facility Manager zur Fernüberwachung und -steuerung von Gebäudesystemen sowie für eine effiziente Kommunikation im Notfall.

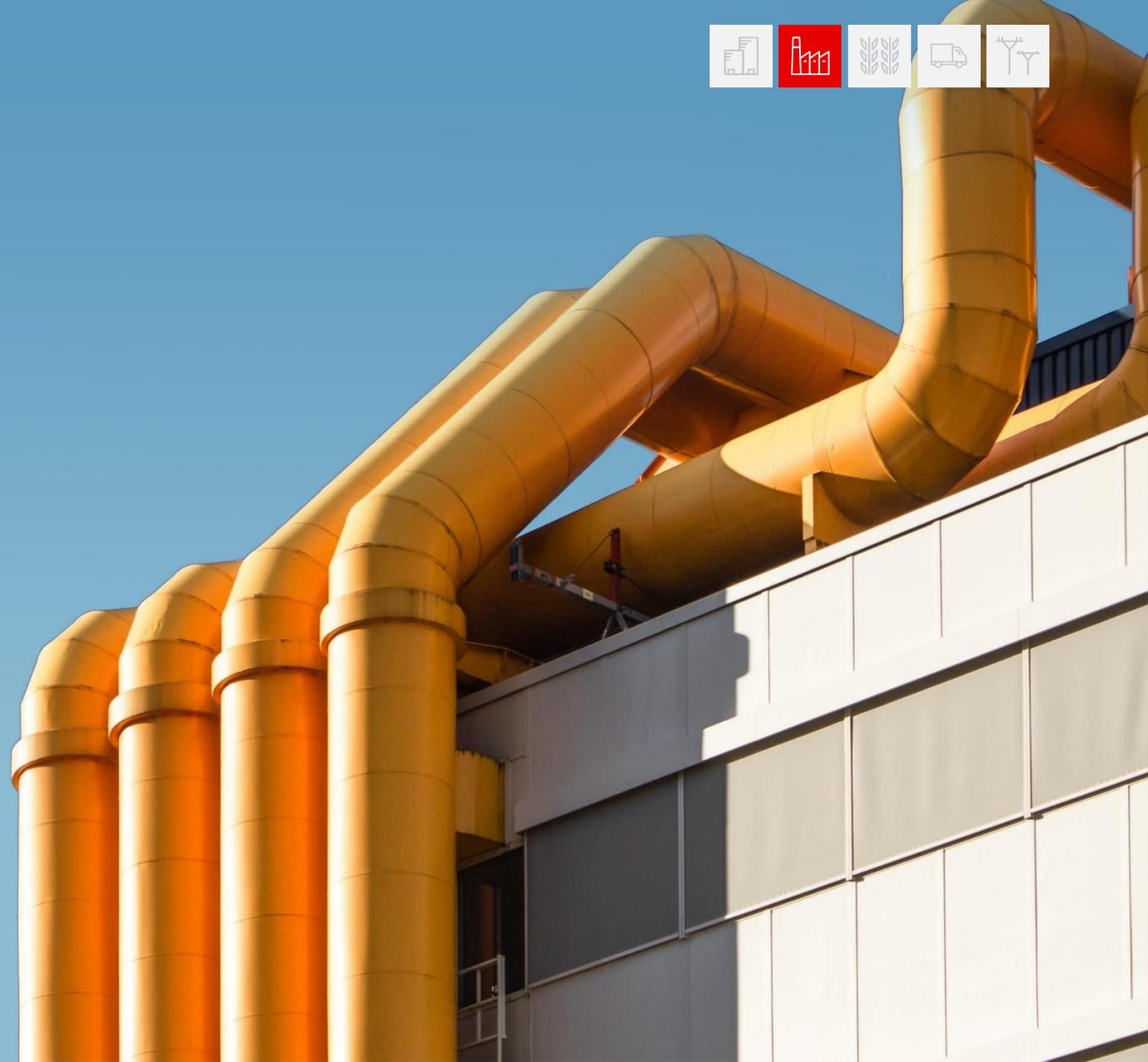


Anmerkungen: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren; a) Prozentualer Anteil der sektorübergreifenden Kosteneinsparungen (hier als EBIT-Erhöhung von 1,8 und 2,5 Mrd. EUR ausgewiesen) an den Gesamtausgaben Deutschlands für Heizung, Warmwasser, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung (38,7 und 23,2 Mrd. EUR). Grund: Die Kosteneinsparungen durch BMS werden sektorübergreifend im EBIT von Gebäudemietern wirksam und nicht nur bei den Unternehmen des Gebäudesektors.



2 Sektor- auswertung

2.2 Industrie



Industrie

Sektor, Subsektoren und Use Cases

Kurzbeschreibung des Sektors

Deutschland zählt zu den führenden Industrienationen weltweit und ist bekannt für die Entwicklung und Herstellung komplexer Güter. 2023 waren im verarbeitenden Gewerbe 8 Mio. Menschen beschäftigt.¹ Im selben Jahr trug der Sektor 24,5% zur Bruttowertschöpfung bei.² Damit ist die produzierende Industrie in Deutschland ein zentraler Faktor für Wachstum und Wohlstand – mehr als in vielen anderen Ländern.

Die Innovationskraft der Wirtschaft, getrieben durch intensive Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen, spielt deshalb eine wichtige Rolle für die Entwicklung Deutschlands. Im Jahr 2022 wurden hierzulande 121 Mrd. EUR in Forschung und Entwicklung investiert. Das entspricht mehr als 3%³ des Bruttoinlandsprodukts und liegt deutlich über dem OECD-Durchschnitt von 2,7%⁴.

Digitale Technologien spielen im Industriesektor heute schon eine Schlüsselrolle, wenn es darum geht, die Wirtschaftlichkeit zu sichern und die Innovationskraft zu stärken. Um das zu veranschaulichen, hat die Studie verschiedene Subsektoren bzw. Subindustrien analysiert, darunter die Stahl-, Produkt-, Zement- und Chemieindustrie.

Analysierte Subsektoren und Use Cases

I. Stahlindustrie



- 1 Digital Twin inkl. digitale Modellierung und Optimierung des Schmelzprozesses

II. Produktindustrie



- 2 Digital Twin und virtuelle Prototypenentwicklung

III. Zementindustrie



- 3 Digital Twin inkl. digitale Modellierung des Kalzinierungsprozesses

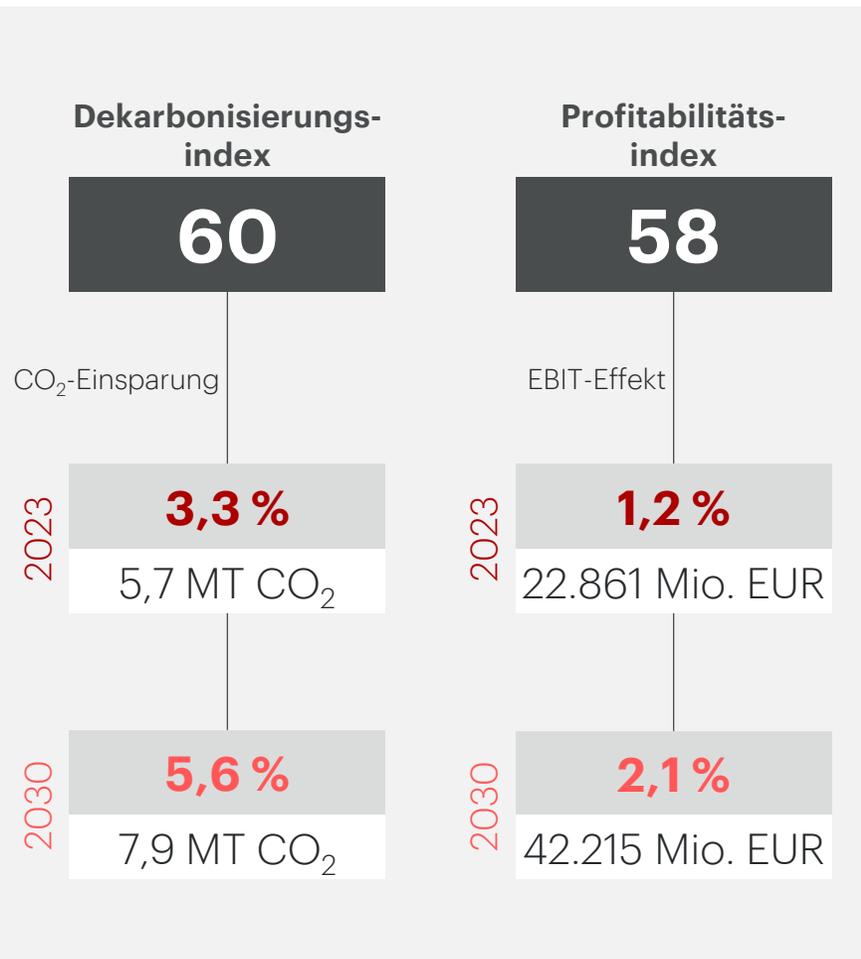
IV. Chemieindustrie



- 4 Digital Twin inkl. digitale Modellierung für die Reformulierung chemischer Produkte

Industrie

Die zentralen Erkenntnisse auf einen Blick

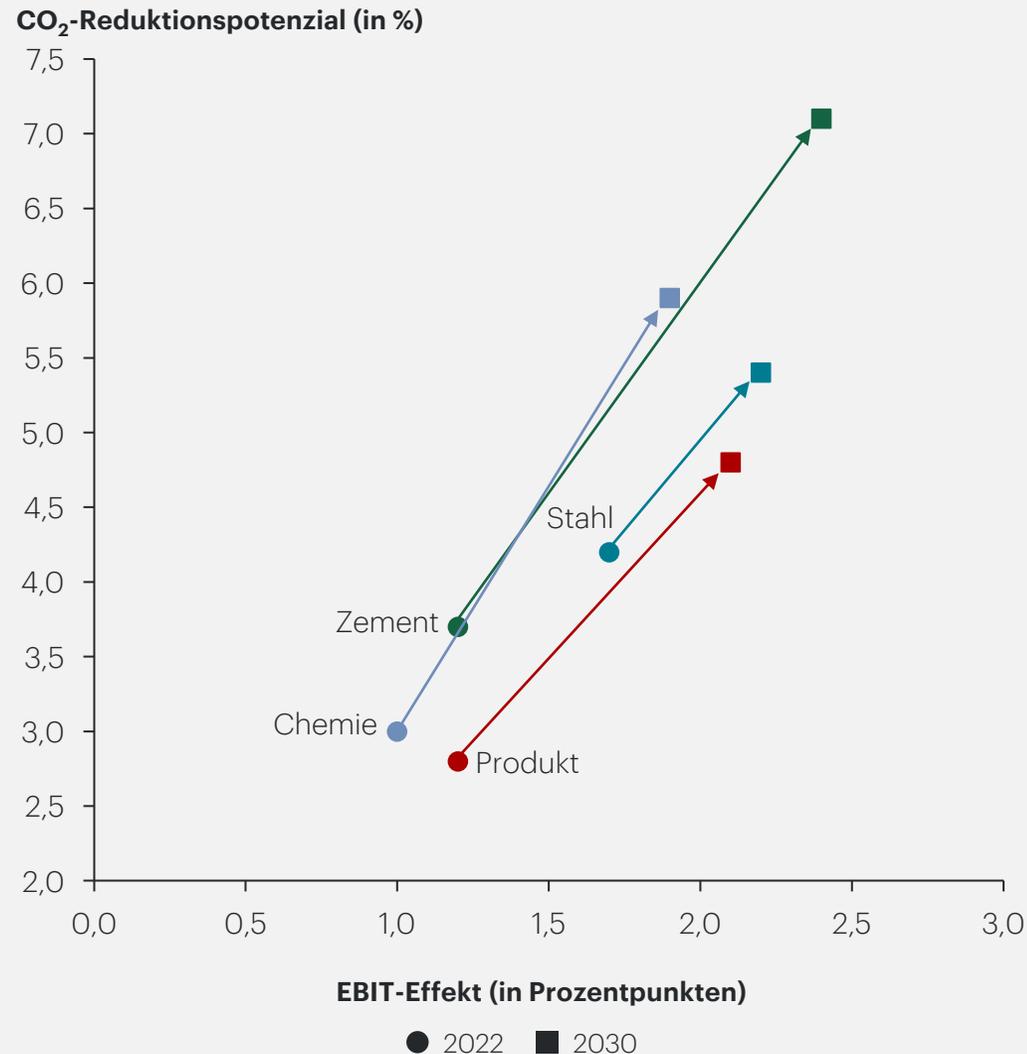


- 1. Dekarbonisierungs- und EBIT-Effekte zeigen in allen Subsektoren eine parallele Tendenz:** Alle vier Subsektoren sind energieintensiv und weisen daher große Potenziale für eine kostensparende Reduktion von Energie- und Rohstoffverbräuchen durch digitale Technologien auf.
- 2. Zement- und Chemieindustrie mit höchstem Wachstum absoluter CO₂-Reduktion bis 2030:** Aufgrund des erwartbar starken Anstiegs der Adaptionsrate digitaler Technologien ist in beiden Subsektoren mit Steigerungsraten von bis zu 70 % absoluten CO₂-Einsparungen zu rechnen.
- 3. Höchster CO₂-Effekt in der Zementindustrie 2030:** Im Vergleich zu den anderen Subsektoren ist der erwartete CO₂-Effekt in 2030 mit 7% in der Zementindustrie am höchsten.^a
- 4. Höchste absolute CO₂-Einsparungen bei Chemie- und Stahlindustrie:** In beiden Subsektoren ist in 2030 mit einer Reduktion von jeweils deutlich über 2 MT CO₂ zu rechnen.
- 5. Verdopplung der absoluten EBIT-Effekte in der Zement- und Chemieindustrie:** Beide Subsektoren haben die Chance, die aktuell durch Digitalisierung erzielten absoluten EBIT-Steigerungen bis 2030 zu verdoppeln.
- 6. Größte absolute Profitabilitätssteigerung in der Produktindustrie:** Um bis zu 17 Mrd. EUR zusätzliches EBIT bis 2030 sind in diesem Subsektor, zu dem u.a. der Automobil- und Maschinenbau zählt, durch digitale Technologien möglich.
- 7. Größte Steigerung der Adaptionsrate in der Zement- und Chemieindustrie:** In beiden Subsektoren ist mit einer Steigerung der Adaptionsrate digitaler Technologien bis 2030 um 100 % zu rechnen.

Anmerkungen: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren; a) Basierend auf den Daten der Unternehmensbefragung im Industriesektor und den Berechnungen (siehe auch Kap. 5.1 Methodik, S. 103 ff.).

Industrie

CO₂-Reduktion und EBIT-Effekte im Vergleich



Dekarbonisierungs- und EBIT-Effekte durch digitale Technologien zeigen in allen Subsektoren eine ähnliche Tendenz.

Alle vier Industriesubsektoren sind traditionell energieintensiv¹ und weisen in der Untersuchung große Potenziale für Energie- und Rohstoffeinsparungen (bis zu ≈20 %^a) durch Technologien wie Digital Twins auf. Da die Reduktion von Energie- und Rohstoffverbräuchen sich sowohl in Kosten- als auch CO₂-Einsparungen niederschlägt, weisen die CO₂- und die EBIT-Kurven der vier Subsektoren ähnliche proportionale Steigungen auf.

Höchstes prozentuales CO₂-Reduktionspotenzial (7 %) in der Zementindustrie 2030 erwartet.

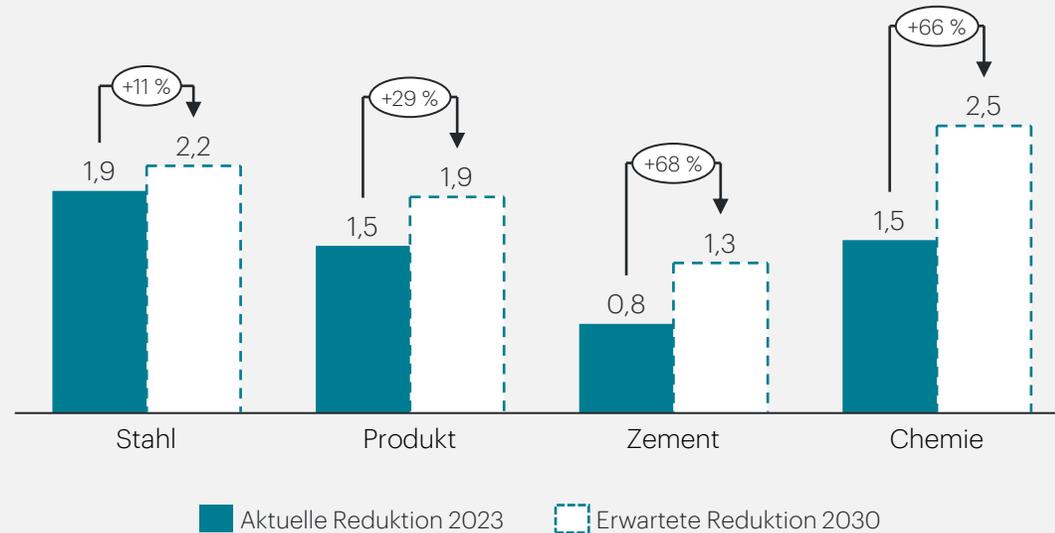
Die deutsche Zementindustrie hat sich zum Ziel gesetzt, bis spätestens 2045 klimaneutral zu sein.² Da die Produktion von Zement – vor allem durch die Kalzinierung von Kalkstein, einem Hauptbestandteil von Zement – sehr energieintensiv ist, gilt die CO₂-Reduktion in diesem Subsektor als besonders herausfordernd. Die Zementindustrie muss daher alle verfügbaren Reduktionshebel nutzen, wozu auch digitale Technologien zählen. Die Untersuchung zeigt, dass im Vergleich zu den anderen drei Subsektoren sowohl die erwartete Adaptionsrate digitaler Technologien (59 %) als auch der spezifische CO₂-Reduktionshebel (12 %) in der Zementindustrie am größten ist.^a

Anmerkung: a) Basierend auf den Daten der Unternehmensbefragung im Industriesektor und den Berechnungen (siehe auch Kap. 5.2 Zahlen im Detail, S. 119).
Quellen: 1) [Destatis, 2024a](#); 2) [VDZ, 2023c](#).

Industrie

CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerungen

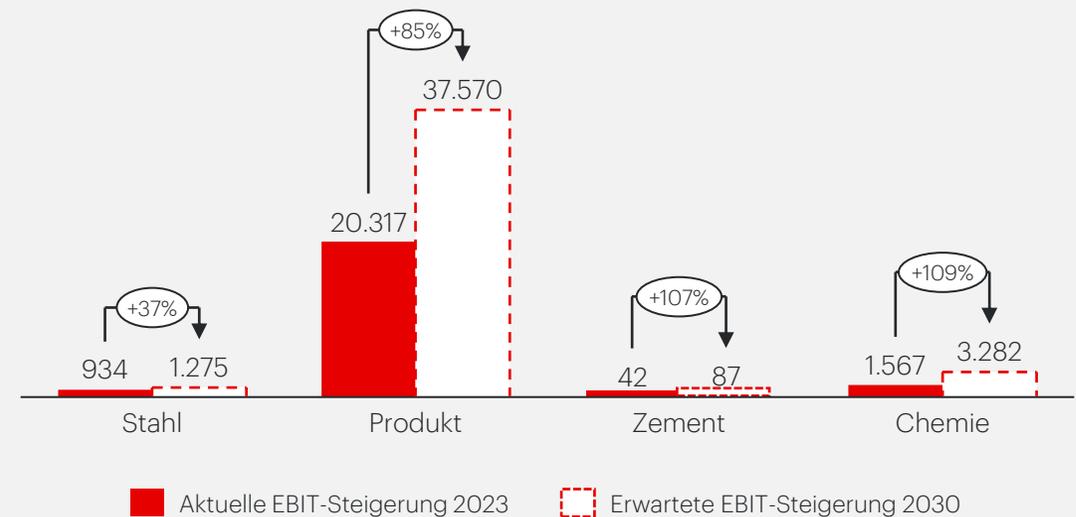
CO₂-Reduktionspotenzial (in MT CO₂/Jahr)



Zement und Chemie weisen die höchsten Steigerungsraten bei CO₂-Einsparungen auf – Einer der Hauptgründe ist der im Vergleich zu anderen Subsektoren deutlich höhere Anstieg der Adaptionen digitaler Technologien um etwa 100%.^a

Chemie und Stahl erzielen 2030 voraussichtlich die höchsten absoluten CO₂-Einsparungen – Dies liegt vor allem an den relativ zu anderen Subsektoren höchsten CO₂-Projektionen, die ca. 60 % der erwarteten Industriemissionen 2030 darstellen.^b

EBIT-Steigerungspotenzial (in Mio. EUR)



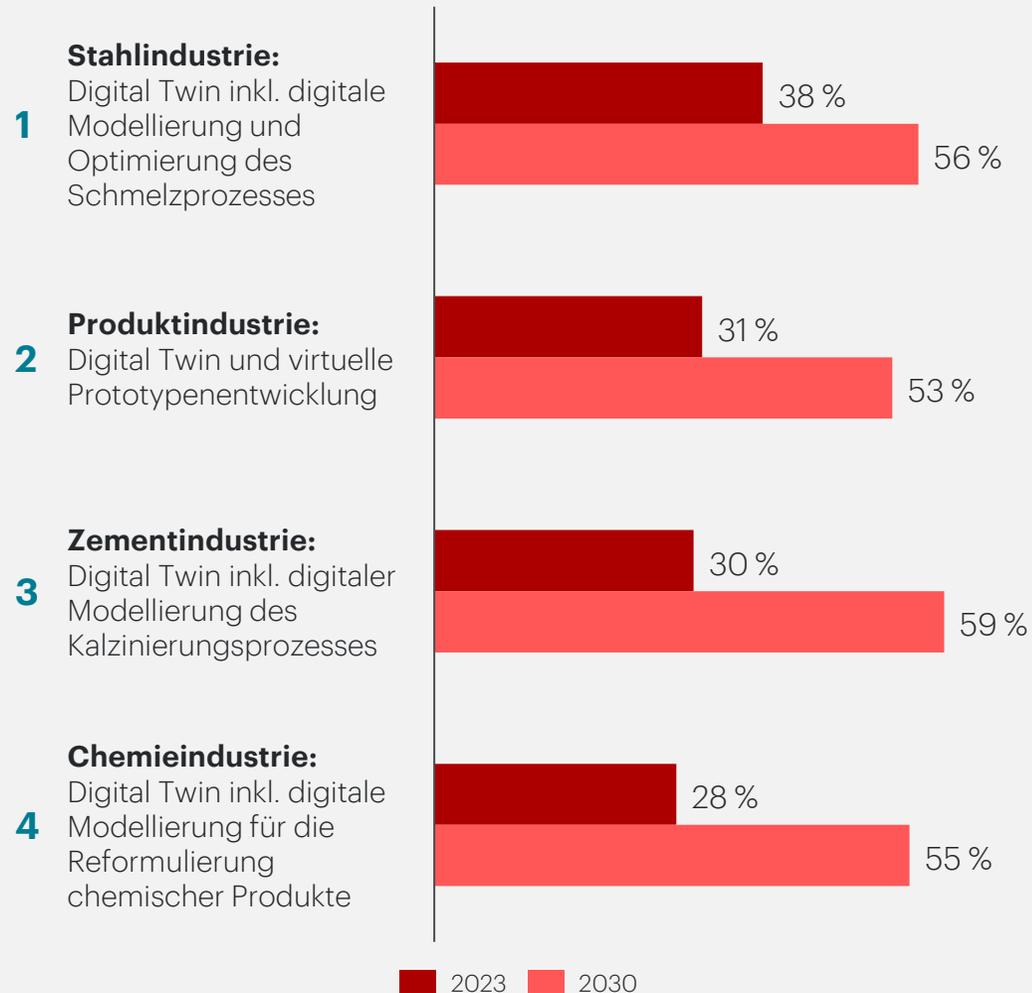
Zement und Chemie haben die Chance, die aktuell durch Digitalisierung erzielten EBIT-Steigerungen zu verdoppeln – Auch in diesem Falle trägt, wie bei den CO₂-Reduktionspotenzialen, der deutlich höhere Anstieg der Adaptionen digitaler Technologien bei.^a

Produktindustrie erzielt 2030 mit Abstand die höchsten absoluten EBIT-Steigerungen – Dies liegt schlicht an der wirtschaftlichen Größe dieses Subsektors, zu dem u.a. der Automobil- und Maschinenbau zählen.^c

Anmerkungen: a) Siehe nächste Seite; b) Siehe auch Kap. 5.2 Zahlen im Detail, S. 119; c) Diese Studie prognostiziert, dass die Umsätze aus der Produktindustrie (u.a. einschließlich der Automobilindustrie und des Maschinenbaus) im Jahr 2030 mit 1.760 Mrd. EUR rund 88 % zum Gesamtumsatz des Industriesektors von 1.995 Mrd. EUR beitragen werden (siehe auch Kap. 5.2 Zahlen im Detail, S. 119).

Adaptionsraten der Use Cases

[in %]



Industrie

Aktuelle und erwartete Adaption digitaler Technologien

Verdopplung der Adaptionsrate von Digital Twins in der Zement- und Chemieindustrie bis 2030.

Der Umsetzungsstand digitaler Technologien zur virtuellen Abbildung physischer Objekte und Prozesse (Digital Twins) liegt in der Zement- und der Chemieindustrie heute bei ca. 30 % und wird sich bis 2030 nahezu verdoppeln. Da beide Industrien unter großem Druck stehen, ihre CO₂-Bilanz zu verbessern, müssen sie jeden Hebel zur Dekarbonisierung nutzen. Die ambitionierte Adaption digitaler Technologien gilt deshalb als unverzichtbar. Aber sie allein wird noch kein Game-Changer für die Net-Zero-Herausforderung sein.

Mit einer erwarteten Adaptionsrate von 56 % in 2030 gelten deutsche Stahlunternehmen als führend.

Bei der Nutzung von Digital Twins in der Stahlindustrie mit Sauerstoffhochöfen weisen deutsche Unternehmen im Vergleich zu globalen Benchmarks ambitioniertere Adaptionsraten auf (siehe auch Kap. 1.4 Adaptionsraten, S. 28).



I. Stahlindustrie

Digitale Anlagen- und Prozessoptimierung

Beschreibung des Subsektors

Die deutsche Stahlindustrie beschäftigte 2020 bei einem Umsatz von 55,2 Mrd. EUR 81.000 Menschen.¹ Mit einem Produktionsvolumen von rund 40 Mio. Tonnen Rohstahl ist Deutschland der größte Stahlerzeuger in der EU.¹ Etwa zwei Drittel entfallen auf die Produktion von Primärstahl, ein Drittel geht auf Verarbeitung von Stahlschrott zurück.¹ Als wichtiger Lieferant für die Automobil- und die Bauindustrie sowie den Maschinen- und Anlagenbau nimmt die Stahlindustrie eine Schlüsselrolle in der deutschen Wirtschaft ein² und ist für etwa 30 % der industriellen CO₂-Emissionen verantwortlich³.

Herausforderungen und Digitalisierungsfelder

Um dem Klimaziel der Bundesregierung zu entsprechen, ist in der CO₂-intensiven Stahlindustrie eine ambitionierte Dekarbonisierung erforderlich. Damit die Transformation hin zu einer klimaneutralen Stahlproduktion gelingen kann, müssen bestehende Anlagen und Prozesse optimiert oder neue entwickelt werden. Zahlreiche Stahlhersteller planen bereits den Bau klimaneutraler Produktionsanlagen.⁴ Die Analyse der Adaptionraten fokussiert sich auf den Einsatz von Sauerstoffhochöfen, bei denen deutsche Unternehmen eine führende Position einnehmen. Dennoch sollte der teilweise Übergang der Stahlindustrie zu Elektrolichtbogenöfen nicht außer Acht gelassen werden. Diese fortschrittliche Technik führt zu einer merklichen Reduktion des Verbrauchs von Eisenerz und damit zu einer signifikanten Verringerung der CO₂-Emissionen – ebenso wie die Nutzung von Stahlschrott in der Produktion⁵. Für eine effektive und kosteneffiziente Umsetzung dieser Maßnahmen ist eine präzise Analyse, Modellierung und Planung unerlässlich. Besonders im Fokus steht der energieintensive Schmelzprozess, der in der Primärstahlproduktion erhebliche CO₂-Emissionen verursacht.⁶

Use Case

- 1 Digital Twin inkl. digitaler Modellierung und Optimierung des Schmelzprozesses^a



| | CO ₂ -Effekt | EBIT-Effekt |
|------|--|----------------------------------|
| 2023 | 4,2 % 1,9 MT CO ₂ | 1,7 % 934,3 Mio. EUR |
| 2030 | 5,4 % 2,2 MT CO ₂ | 2,2 % 1.275,1 Mio. EUR |

Anmerkung: a) In der Befragung wurden Adaptionraten, CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerungen präzise für die Sub-Use-Cases (i) Digital Twin und (ii) digitale Modellierung und Optimierung des Schmelzprozesses unterschieden und hier konsolidiert. Quellen: 1) [Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2022b](#); 2) Küster Simic et al., 2020; 3) [Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2022a](#); 4) [Knitterscheidt, 2023](#); 5) [Fraunhofer IMWS, 2019](#); 6) [WOTech, 2023](#).



1 Use Case: Digital Twin inkl. digitale Modellierung und Optimierung des Schmelzprozesses

Kurzbeschreibung

In der Stahlproduktion ermöglicht der Digital Twin die Echtzeitüberwachung von Zustand, Leistung und Verhalten einer Produktionsanlage. Er unterstützt damit die vorausschauende Wartung und minimiert Anlagenausfälle durch die Erfassung von Echtzeitdaten und Musteranalysen. Die präzise Gestaltung des Schmelzprozesses ist ein Beispiel für die dadurch mögliche Verbesserung von Leistung und Effizienz in der Produktion.

Verwendete digitale Technologien

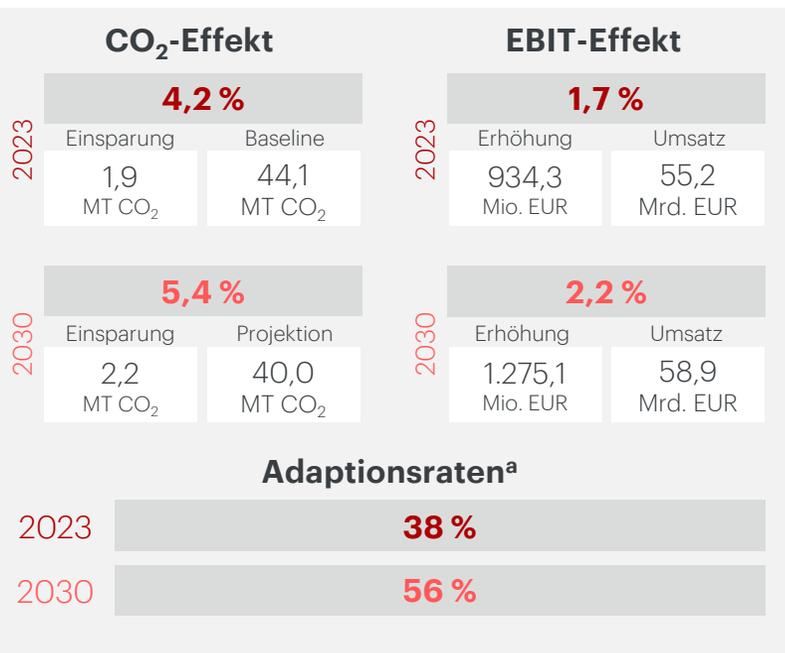
Sensoren: Sensoren sammeln reale Daten eines Produkts oder eines Prozesses, um eine umfassende physikalische und funktionale Beschreibung für einen Digital Twin zu erstellen.¹

Internet der Dinge (IoT) und Maschine-zu-Maschine (M2M): IoT verknüpft Maschinen mit ihren Digital Twins und ermöglicht so deren Überwachung und Steuerung per Echtzeitdaten. M2M-Kommunikation fördert wiederum den automatisierten Informationsaustausch und optimiert damit Wartungsprozesse sowie Betriebseffizienz in der Stahlindustrie.²

Cloud Computing: Daten von IoT-Geräten werden in der Cloud analysiert, um die Leistung physischer Assets zu optimieren. Dies erlaubt eine effiziente Nutzung der Ressourcen und umfassende zentralisierte Analysen.²

Künstliche Intelligenz (KI) und Maschinelles Lernen (ML): Fortschrittliche Algorithmen der KI nutzen die von Digital Twins gesammelten Daten, um Vorhersagen zu treffen und die Entscheidungsfindung in der Stahlindustrie zu optimieren. ML ermöglicht es, Muster zu erkennen und automatisch auf neue Daten zu reagieren, was zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Prozesse führt.^{3,4}

Augmented Reality (AR): AR verknüpft digitale sowie reale Umgebungen, ermöglicht damit Visualisierungen und Interaktionen mit Digital Twins und bietet so innovative Anwendungen für Schulungen, Inspektionen und Wartungsarbeiten in der Stahlindustrie.²



Anmerkungen: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren; a) In der Befragung wurden Adaptionsraten, CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerungen präzise für die Sub-Use-Cases (i) Digital Twin und (ii) digitale Modellierung und Optimierung des Schmelzprozesses unterschieden und hier konsolidiert. Quellen: 1) Ramschek, 2020; 2) AEA, 2022; 3) Altair, 2022; 4) Alajimi & Almehal, 2020.



II. Produktindustrie

Digitale Optimierung der Produktions- und Produktentwicklungsprozesse

Beschreibung des Subsektors

Die Produktindustrie, auch als verarbeitendes Gewerbe bekannt, fertigt Produkte (z. B. Automobile, Maschinen, Konsumgüter) durch den Einsatz von Spezialmaschinen und Massenproduktionstechniken. 2021 beschäftigte der Subsektor etwa 7,5 Mio. Menschen und erzielte einen Umsatz von 2.100 Mrd. EUR.¹

Die Produktindustrie hat damit eine immense wirtschaftliche Bedeutung – als großer Arbeitgeber sowie als Export- und Innovationsmotor. Sie steht wie alle anderen Industriesubsektoren vor großen Herausforderungen, ihre CO₂-Emissionen zu reduzieren und ihre Profitabilität angesichts kompetitiver Märkte zu sichern.

Herausforderungen und Digitalisierungsfelder

In der Produktindustrie, insbesondere im Automobil- und Maschinenbau, sind steigende Personal- und Energiekosten zu bewältigen. Ein zentraler Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit ist die Verkürzung von Entwicklungszeiten, um neue Produkte rascher auf den Markt zu bringen. Gleichzeitig gilt es, die Effizienz zu verbessern, weiteres Wachstum zu realisieren, bei allem auf Nachhaltigkeit zu achten und vor allem aber die Dekarbonisierung voranzubringen.²

Im Fokus digitaler Lösungen stehen die Optimierung von Produktionsprozessen und die Neugestaltung der Produktentwicklung. Zwei Use Cases sind hier von besonderer Bedeutung: Ein Digital Twin schafft ein virtuelles Modell bestehender Anlagen oder Produkte (z. B. Fertigungsstraßen, Motoren), um Simulationen zur Prozessoptimierung durchzuführen. Die virtuelle Prototypenentwicklung ermöglicht es dagegen, bereits in der Entwurfsphase durch digitale Modelle (z. B. Fahrzeugkarosserien, Maschinenteile) die Konstruktion und Funktionalität zu analysieren und zu verbessern. Das dient der Kosteneffizienz und verkürzt die Entwicklungszeit signifikant.

Use Case

2

Digital Twin und virtuelle Prototypenentwicklung^a



| | CO ₂ -Effekt | EBIT-Effekt |
|------|--|-----------------------------------|
| 2023 | 2,8 % 1,5 MT CO ₂ | 1,2 % 20.317,3 Mio. EUR |
| 2030 | 4,8 % 1,9 MT CO ₂ | 2,1 % 37.570,5 Mio. EUR |

Anmerkung: a) In der Befragung wurden Adaptionraten, CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerungen präzise für die Sub-Use-Cases (i) Digital Twin und (ii) virtuelle Prototypenentwicklung unterschieden und hier konsolidiert.
Quellen: 1) [Destatis, 2023c](#); 2) [Aras, 2023](#).



2 Use Case: Digital Twin und virtuelle Prototypenentwicklung

Kurzbeschreibung

In der Produktindustrie repräsentiert der Digital Twin ein virtuelles Abbild realer physischer Produkte und Produktionsprozesse, das sowohl das Monitoring als auch die Echtzeitsteuerung der realen Objekte ermöglicht. Die virtuelle Prototypenentwicklung steht für das virtuelle Abbild eines Produktprototypen, um Design, Funktionalität und Leistung zu optimieren, bevor ein physischer Prototyp erstellt wird.

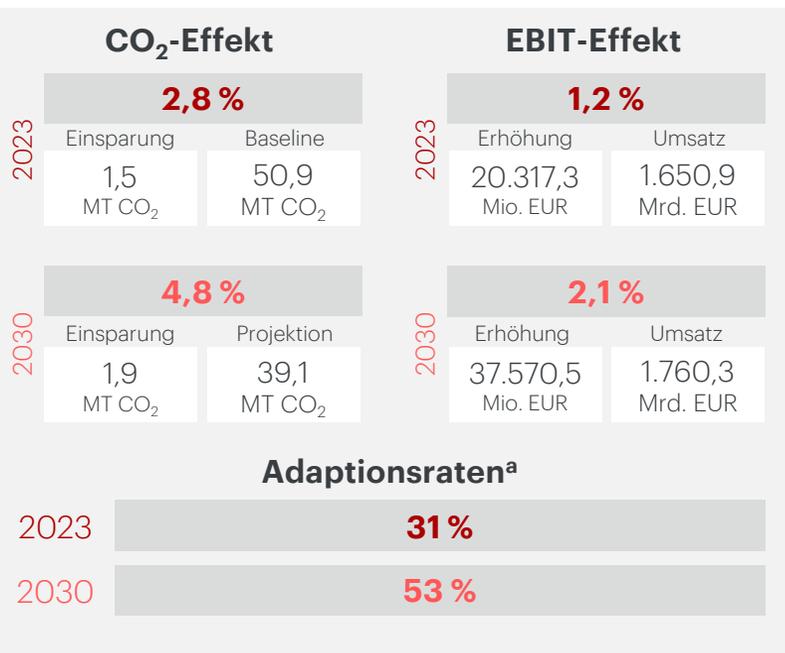
Verwendete digitale Technologien

Sensoren: In der Automobilindustrie erfassen Sensoren beispielsweise Echtzeitdaten von Fahrzeugen und Fertigungsanlagen. Sie bilden die Basis für die Erstellung oder Aktualisierung von Digital Twins.

Internet der Dinge (IoT) und Maschine-zu-Maschine (M2M): In Branchen wie dem Maschinenbau ermöglichen IoT und M2M-Kommunikation die Vernetzung und den automatisierten Informationsaustausch zwischen Produktionsmaschinen, was eine effizientere Überwachung und Steuerung der Produktionsprozesse und Wartungsabläufe ermöglicht.¹

Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR): AR und VR schaffen interaktive Umgebungen, z. B. für Produktdesign und Prototypenentwicklung oder zur Interaktion mit einem Digital Twin einer Fertigungsstraße. AR erweitert die reale Welt um digitale Elemente, während VR Nutzer:innen in vollständig virtuelle Welten eintauchen lässt.^{1,2}

Künstliche Intelligenz (KI) und Maschinelles Lernen (ML): KI-Algorithmen nutzen die vom Digital Twin gesammelten Daten, um prädiktive Modelle zu erstellen und die Entscheidungsfindung in der Produktion und Produktentwicklung zu optimieren. ML ermöglicht es, Muster zu identifizieren und automatisch auf neue Daten zu reagieren, was zu einer stetigen Verbesserung der Prozesse führt.³



Anmerkungen: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren; a) In der Befragung wurden Adaptionsraten, CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerungen präzise für die Sub-Use-Cases (i) Digital Twin und (ii) virtuelle Prototypenentwicklung unterschieden und hier konsolidiert.

Quellen: 1) AEA, 2022; 2) Stark et al., 2011; 3) Altair, 2022.



III. Zementindustrie

Digitale Anlagen- und Prozessoptimierung

Beschreibung des Subsektors

Die Zementindustrie ist innerhalb der deutschen Wirtschaft ein führender Exporteur. 2022 beschäftigte sie bei einem Umsatz von 3,4 Mrd. EUR etwa 8.000 Menschen.¹

Die Herstellung von Zement trägt erheblich zu den globalen Treibhausgasemissionen bei – mit 8 % weltweit² und 2 % in Deutschland³. Allein im Jahr 2020 wurden 20 Mio. Tonnen CO₂ freigesetzt.⁴ Die Produktion ist nämlich äußerst energieintensiv, sowohl was die Gewinnung als auch die Verarbeitung der Rohstoffe angeht. Das Bekenntnis zu einer klimaneutralen Produktion stellt für die Zementindustrie eine enorme Herausforderung dar.

Herausforderungen und Digitalisierungsfelder

Um dem weiter steigendem Energieverbrauch und höheren Materialkosten zu begegnen, setzt die Branche verstärkt auf Digitalisierung, insbesondere im Produktionsprozess.⁵ Hier ermöglichen digitale Technologien eine präzisere Steuerung und Überwachung der Herstellung, was zugleich die Produktqualität verbessert und den Energieverbrauch sowie die CO₂-Emissionen reduziert.

Digitale Plattformen für Zementwerke ermöglichen eine effektive Überwachung und Steuerung des Energieverbrauchs und senken damit Betriebskosten sowie Umweltauswirkungen. Die digitale Modellierung des branchenspezifischen Kalzinierungsprozesses (Verfahren zur Entsäuerung von Kalkstein bei ca. 900 Grad Celsius) erlaubt eine präzise Steuerung, führt zur Qualitätssteigerung und reduziert Energieverbrauch sowie Emissionen. Der Einsatz eines Digital Twin in der Zementindustrie ermöglicht zudem eine Echtzeitüberwachung und -optimierung des gesamten Produktionsprozesses.

Die genannten digitalen Lösungen bieten vielversprechende Handlungsfelder für die aktuellen Herausforderungen in diesem Subsektor.

Use Case

3 Digital Twin inkl. digitale Modellierung des Kalzinierungsprozesses^a



| | CO ₂ -Effekt | EBIT-Effekt |
|------|---------------------------------------|------------------------------|
| 2023 | 3,7% 0,8 MT CO ₂ | 1,2% 42,3 Mio. EUR |
| 2030 | 7,1% 1,3 MT CO ₂ | 2,4% 87,2 Mio. EUR |

Anmerkung: a) In der Befragung wurden Adaptionsraten, CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerungen präzise für die Sub-Use-Cases (i) Digital Twin und (ii) digitale Modellierung des Kalzinierungsprozesses unterschieden und hier konsolidiert.
 Quellen: 1) VDZ, 2023; 2) Zajonc, 2023; 3) WWF, 2019; 4) VDZ, 2024; 5) VDZ, 2020.



3 Use Case: Digital Twin in der Zementindustrie inkl. Kalzinierungsprozess

Kurzbeschreibung

In der Zementindustrie nutzt der Digital Twin ein virtuelles Abbild der Produktionsanlage, um mithilfe von IoT-Sensoren und Maschinellem Lernen Echtzeitdaten zu erfassen und Ausfälle zu minimieren. Die digitale Modellierung des Kalzinierungsprozesses optimiert Effizienz und Qualität, verbessert Betriebsabläufe und führt zu Energieeinsparungen.

Verwendete digitale Technologien

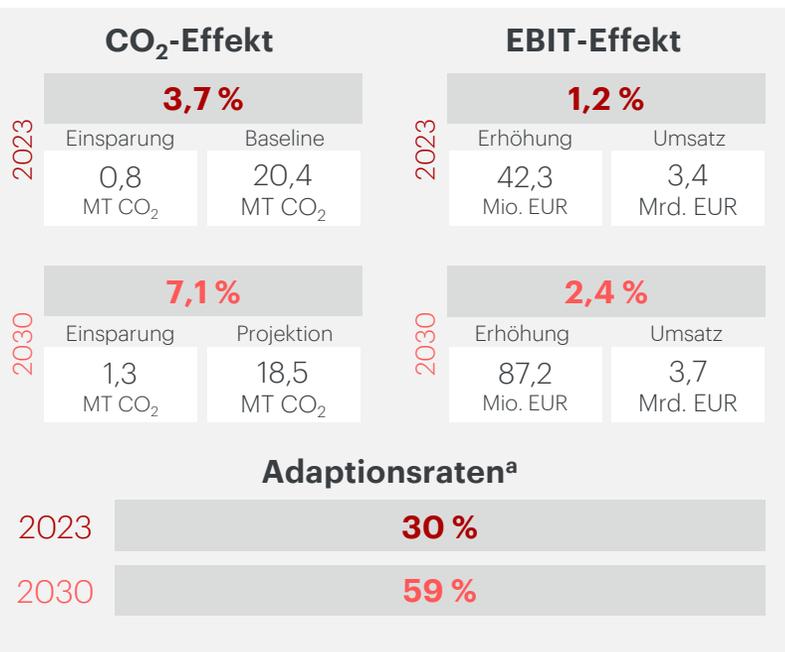
Sensoren: Sensoren erfassen reale Daten zu Produktkomponenten und Prozessen, um eine umfassende physikalische und funktionale Beschreibung für einen Digital Twin zu erstellen.

Internet der Dinge (IoT) und Maschine-zu-Maschine (M2M): IoT verknüpft Maschinen mit ihren Digital Twins und ermöglicht so deren Überwachung und Steuerung per Echtzeitdaten. M2M-Kommunikation fördert wiederum den automatisierten Informationsaustausch, um die teilweise parallel ablaufenden Produktionsschritte und Wartungsabläufe zu optimieren.¹

Cloud Computing: Die Speicherung großer Datenmengen von IoT-Geräten und deren Analyse in der Cloud führt zu einer Verbesserung der Datenverfügbarkeit sowie der Übertragungsgeschwindigkeit zwischen den Bereichen (z. B. Materialnachschub und Fertigung). Infolgedessen können beispielsweise überflüssige Transportwege vermieden werden.²

Künstliche Intelligenz (KI) und Maschinelles Lernen (ML): Fortschrittliche KI-Algorithmen nutzen die Daten im Digital Twin, um Vorhersagen zu treffen und die Entscheidungsfindung zu optimieren. ML erkennt Muster und reagiert automatisch auf neue Daten, was zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Prozesse führt.³

Augmented Reality (AR): AR verknüpft digitale sowie reale Umgebungen, ermöglicht damit Visualisierungen und Interaktionen mit Digital Twins und bietet so innovative Anwendungen für Schulungen, Inspektionen und Wartungsarbeiten.¹



Anmerkungen: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren; a) In der Befragung wurden Adaptionsraten, CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerungen präzise für die Sub-Use-Cases (i) Digital Twin und (ii) digitale Modellierung des Kalzinierungsprozesses unterschieden und hier konsolidiert.

Quellen: 1) AEA, 2022; 2) Thyssenkrupp, 2022; 3) Altair, 2022.

IV. Chemieindustrie

Digitale Anlagen- und Prozessoptimierung

Beschreibung des Subsektors

Die Chemieindustrie gehört zu den großen Industriezweigen Deutschlands mit langer Historie. 2022 beschäftigte sie bei einem Umsatz von 261 Mrd. EUR etwa 477.000 Menschen. Sie liegt damit auf dem dritten Platz unter den deutschen Industriebranchen.¹

Die Chemiebranche hat nicht nur eine große wirtschaftliche Bedeutung, sondern ist auch eine treibende Kraft für Innovation und Forschung. Ihre Produktion wird aufgrund ihrer Auswirkungen auf Luft und Wasser sowie eines CO₂-Ausstoßes von 49 Mio. Tonnen im Jahr 2022 dennoch zunehmend kritisch betrachtet.

Herausforderungen und Digitalisierungsfelder

Dass die steigenden Energiekosten für die Chemieindustrie eine besonders große Herausforderung darstellen, resultiert aus den hohen Anforderungen der Branche an Temperaturen und Druckenergie, die für die Herstellung von Chemikalien notwendig sind und den Energiebedarf wesentlich bestimmen.²

Trotzdem bieten innovative Technologien wie die digitale Modellierung zur Reformulierung chemischer Produkte und der Einsatz des Digital Twins zur Virtualisierung von physischen Anlagen vielversprechende Lösungen, die CO₂-Bilanz und die Profitabilität in der Branche zu verbessern.

Die digitale Modellierung ermöglicht die Optimierung der Zusammensetzung und Eigenschaften chemischer Produkte, was wiederum die Effizienz in der Produktion steigert. Darüber hinaus trägt der Digital Twin durch Überwachung und Optimierung des Produktionsprozesses in Echtzeit dazu bei, die Effizienz zu steigern und zugleich Umweltauswirkungen zu minimieren. Digitale Technologien können also in hohem Maße dazu beitragen, die ökologischen Herausforderungen in der Chemieindustrie zu bewältigen.

Use Case

4

Digital Twin inkl. digitale Modellierung für die Reformulierung chemischer Produkte^a



| | CO ₂ -Effekt | EBIT-Effekt |
|------|--|----------------------------------|
| 2023 | 3,0 % 1,5 MT CO ₂ | 1,0 % 1.567,1 Mio. EUR |
| 2030 | 5,9 % 2,5 MT CO ₂ | 1,9 % 3.282,0 Mio. EUR |

Anmerkung: a) In der Befragung wurden Adaptionsraten, CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerungen präzise für die Sub-Use-Cases (i) Digital Twin und (ii) digitale Modellierung für die Reformulierung chemischer Produkte unterschieden und hier konsolidiert.

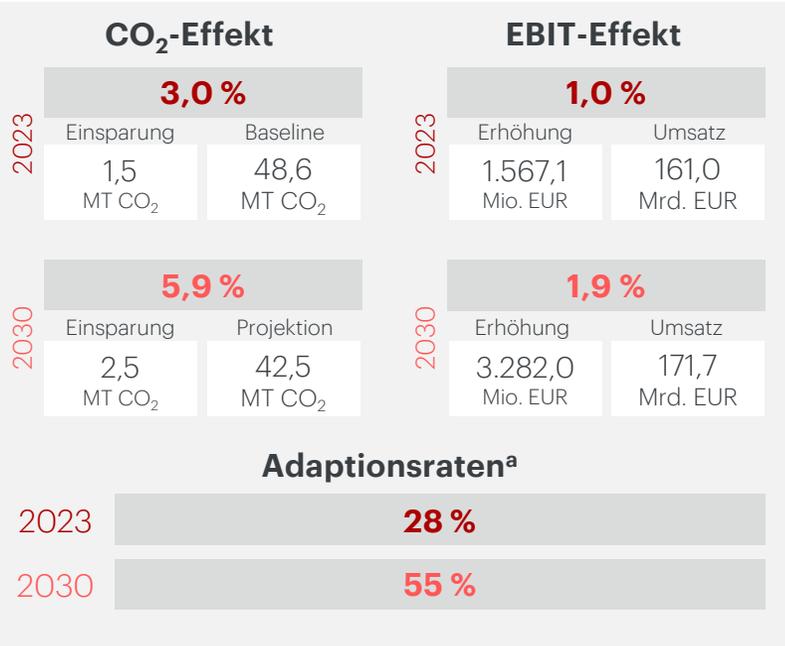
Quellen: 1) VCI, 2023; 2) Nathusius, 2023.



4 Use Case: Digital Twin inkl. digitale Modellierung für die Reformulierung

Kurzbeschreibung

In der Chemieindustrie bildet der Digital Twin den Zustand, die Leistung und das Verhalten von Produktionsanlagen ab. Durch IoT-Sensoren, Datenanalyse und Maschinelles Lernen werden Ausfälle minimiert. Das steigert die Effizienz, verbessert die Sicherheit und dient sowohl der Ressourcenschonung als auch der Reduktion von CO₂-Emissionen.



Anmerkungen: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren; a) In der Befragung wurden Adaptionsraten, CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerungen präzise für die Sub-Use-Cases (i) Digital Twin und (ii) digitale Modellierung für die Reformulierung chemischer Produkte unterschieden und hier konsolidiert.

Quellen: 1) AEA, 2022; 2) Altair, 2022; 3) Fantke et al., 2021.

Verwendete digitale Technologien

Sensoren: Sensoren sammeln Echtzeitdaten, die eine umfassende physische und funktionale Beschreibung von Produktionsanlagen ermöglichen und als Grundlage für die Generierung des Digital Twin dienen.

Internet der Dinge (IoT) und Maschine-zu-Maschine (M2M): Das IoT vernetzt Maschinen und Geräte mit ihren Digital Twins, ermöglicht Echtzeitdatenüberwachung und -steuerung. M2M-Kommunikation fördert den automatisierten Informationsaustausch zwischen den Anlagen, was zu einer Effizienzsteigerung der Betriebsprozesse und einer Optimierung der Wartungsabläufe führt.¹

Cloud Computing: IoT-Geräte generieren umfangreiche Daten, die in der Cloud gespeichert und analysiert werden. Sie helfen, die Leistung physischer Ressourcen – repräsentiert durch Digital Twins – zu optimieren, und ermöglichen dadurch eine effiziente Ressourcennutzung.¹

Künstliche Intelligenz (KI) und Maschinelles Lernen (ML): Fortschrittliche KI-Algorithmen nutzen die von Digital Twins gesammelten Daten, um prädiktive Modelle zu erstellen und die Entscheidungsfindung zu optimieren. ML ermöglicht es, Muster zu identifizieren und automatisch auf neue Daten zu reagieren, was zu einer stetigen Verbesserung der Prozesse führt.^{2,3}

Augmented Reality (AR): AR verbindet die digitale und die physische Welt, indem es Nutzer:innen ermöglicht, Digital Twins in der realen Umgebung zu visualisieren und dadurch mit ihnen zu interagieren.¹



2 Sektor- auswertung

2.3 Landwirtschaft



Landwirtschaft

Sektor, Subsektoren und Use Cases

Kurzbeschreibung des Sektors

Die deutsche Landwirtschaft zählt zu den vier größten Erzeugern in der Europäischen Union.¹ Etwa 90 % des deutschen Bedarfs an Lebensmitteln stammen rein rechnerisch aus heimischer Produktion.² Um diese Erzeugnisse zu produzieren, wird etwa 50 % der Fläche Deutschlands für landwirtschaftliche Zwecke genutzt.³ Der Sektor, in dem (inkl. Forst und Fischerei) rund 1,2 Mio. Menschen⁴ arbeiten, wird hier in zwei Subsektoren unterteilt: Ackerbau und Viehwirtschaft.

Im Ackerbau vollzieht sich ein Strukturwandel, der durch die stetige Verringerung der Anzahl landwirtschaftlicher Betriebe und die gleichzeitige Erhöhung der durchschnittlichen Flächenausstattung je Betrieb gekennzeichnet ist.³

Die Viehwirtschaft unterliegt ebenfalls einem Strukturwandel, der sich in einer Abnahme der Betriebe³ sowie des Tierbestands selbst⁵ äußert. Bei den Betrieben, die Tiere halten, ist zudem eine verstärkte Spezialisierung auf bestimmte Tierarten zu beobachten.³

Analysierte Subsektoren und Use Cases

I. Ackerbau



- 1 Intelligente Boden- und Ernteüberwachung
- 2 Intelligente landwirtschaftliche Maschinen

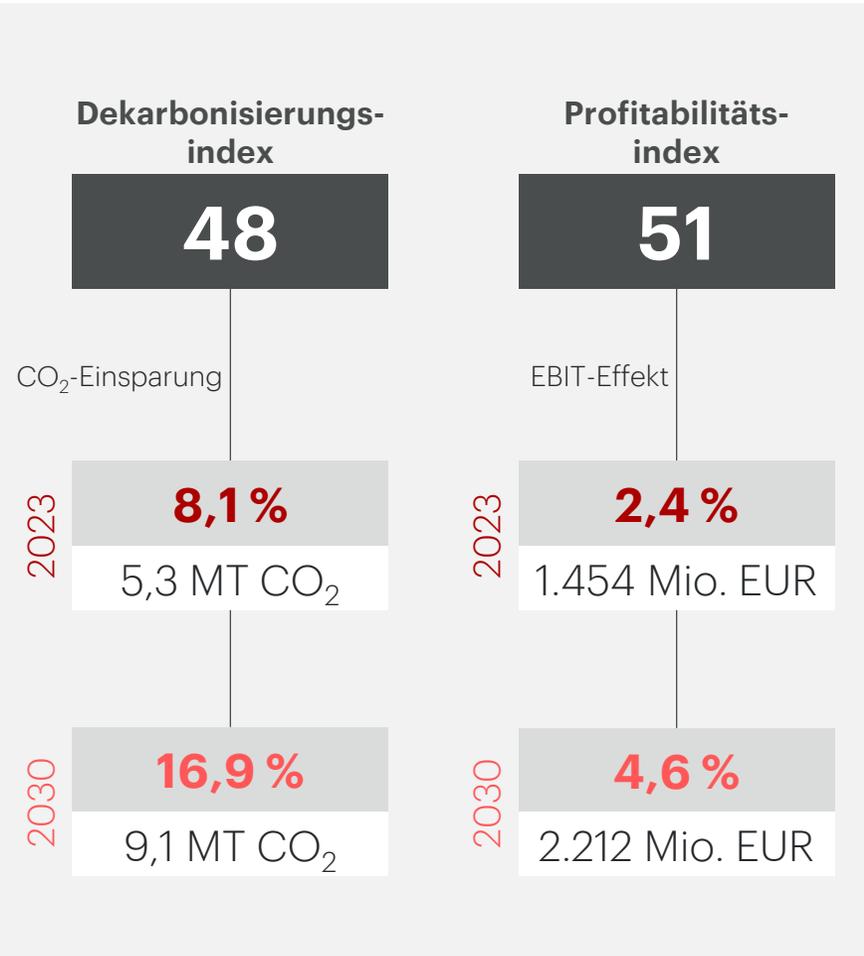
II. Viehwirtschaft



- 3 Digitale Tierüberwachung
- 4 Präzisionsfütterung

Landwirtschaft

Die zentralen Erkenntnisse auf einen Blick

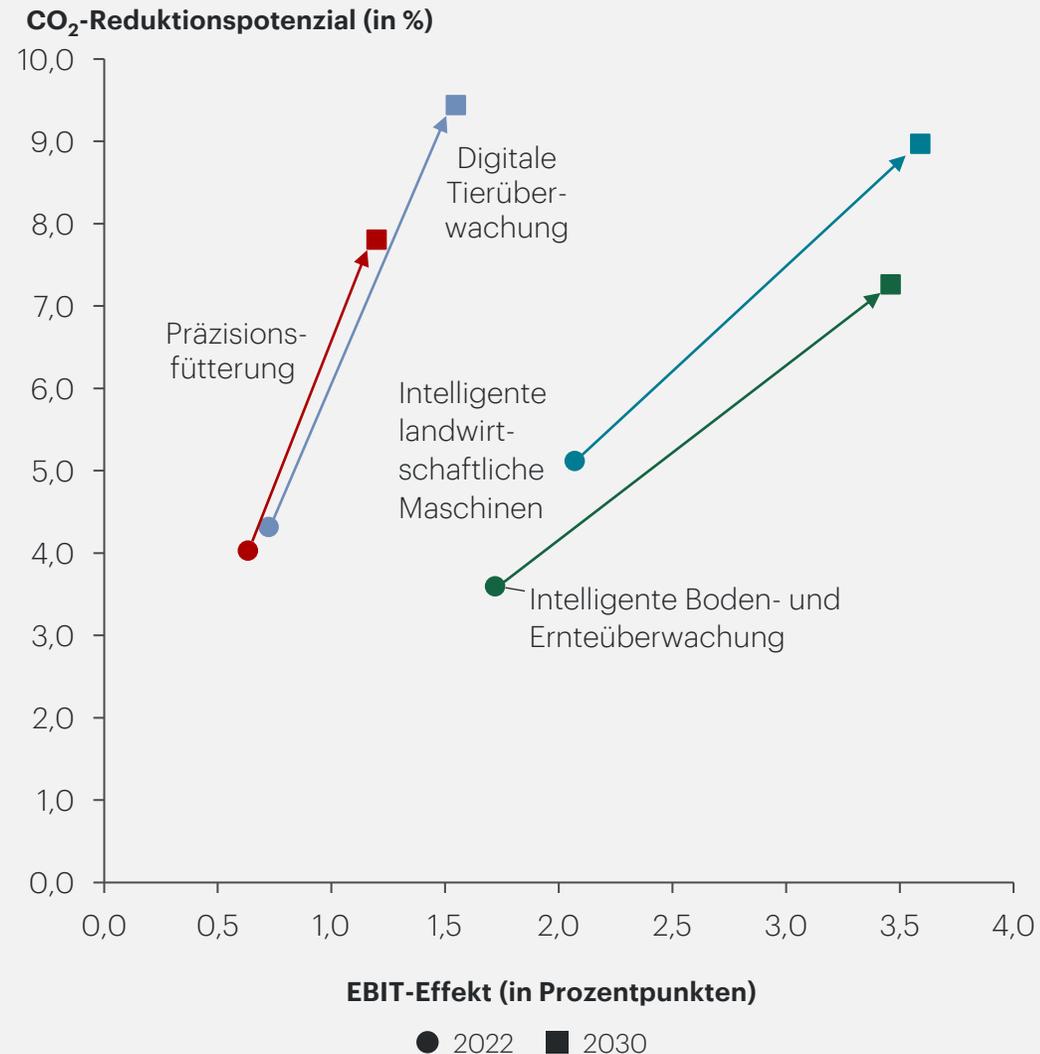


- CO₂- versus EBIT-Effekte:** In der Viehwirtschaft werden die CO₂-Effekte durch Digitalisierung höher sein als die EBIT-Effekte, beim Ackerbau sind die Auswirkungen auf CO₂-Reduktion und EBIT annähernd gleich.
- CO₂-Reduktion in der Viehwirtschaft:** Die Viehwirtschaft emittiert derzeit etwa doppelt so viel CO₂ wie der Ackerbau. Schon heute weist sie höhere absolute CO₂-Einsparungen auf – ein Effekt digitaler Technologien, der bis 2030 zunehmen wird.
- EBIT-Steigerung beim Ackerbau:** Die Kostensenkungshebel sind im Ackerbau größer als in der Viehwirtschaft, beispielsweise mit 14 % bei den Düngerkosten.
- Verdopplung der Adaptionrate digitaler Technologien:** Bis 2030 wird die Adaptionrate von heute durchschnittlich 32 % auf 63 % steigen.^a Bereits jetzt ist die Einführung und Skalierung digitaler Technologien wie Künstlicher Intelligenz (KI), Internet der Dinge (IoT), Sensoren und Drohnen in der Landwirtschaft in vollem Gange.
- Hohe Skalierung von Monitoring-Use-Cases:** Das betrifft vor allem digitale Technologien zum Monitoring bzw. zur Überwachung von Böden, Ernten und Tierbeständen mit einer Zieladaptionrate von bis zu 75 %. Das heißt, sie werden in der deutschen Landwirtschaft bis 2030 breite Anwendung finden.



Landwirtschaft

CO₂-Reduktion und EBIT-Effekte im Vergleich



In der Landwirtschaft stehen Profitabilität und Dekarbonisierung durch die Digitalisierung in engem Zusammenhang und werden durch diese deutlich gesteigert.^a Im Ackerbau sind die EBIT-Effekte weitaus größer als in der Viehwirtschaft.

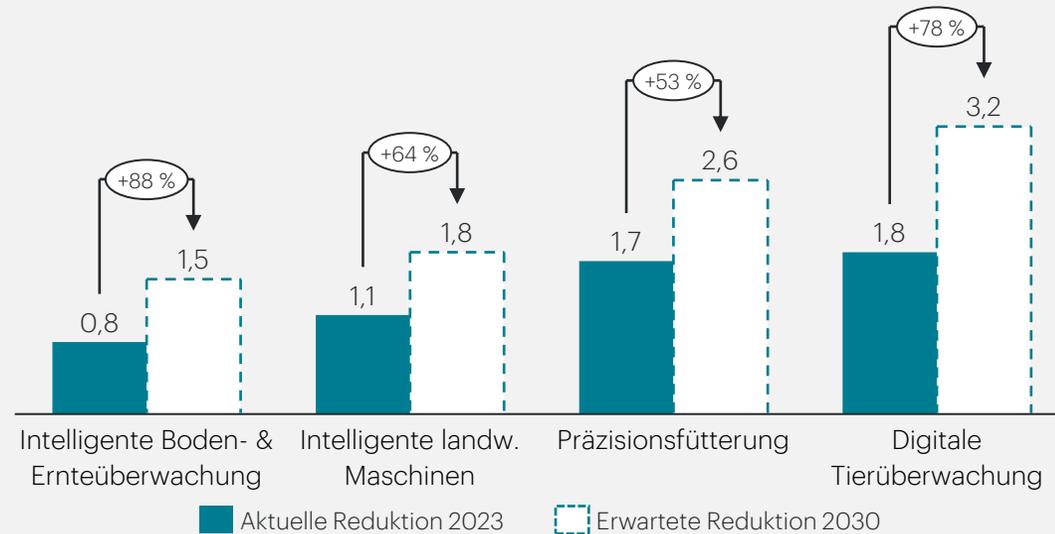
Im Ackerbau adressieren die zwei Use Cases „intelligente Boden- und Ernteüberwachung“ sowie „intelligente landwirtschaftliche Maschinen“ die zwei großen Kostentreiber der Betriebe: Ausgaben für Düngemittel und für Personal. Der Anteil der Kosten für Düngemittel an den gesamten Betriebskosten kann bis zu 40 % betragen. Laut Unternehmensbefragung ist es mithilfe digitaler Technologien möglich, den Verbrauch von Düngemitteln um 6,0 bis 13,5 % zu reduzieren. Die Personalkosten wiederum können bis zu 10 % der Gesamtbetriebskosten ausmachen. Hier ermöglichen digitale Lösungen eine Reduzierung des Bedarfs an manueller Arbeitskraft um 6,3 bis 14,3 %.^a

Anmerkung: a) Basierend auf den Daten der Unternehmensbefragung im Landwirtschaftssektor.

Landwirtschaft

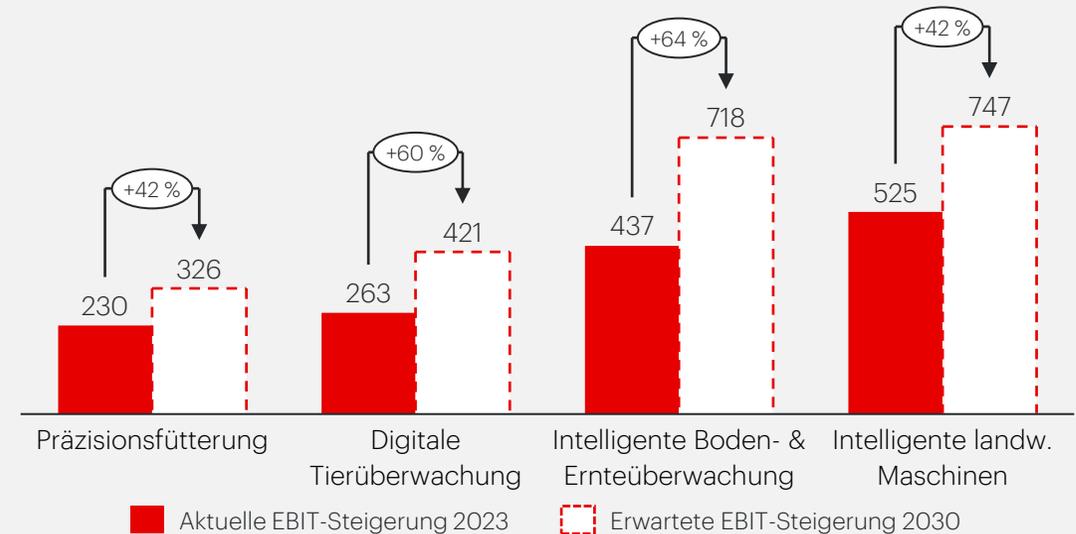
CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerungen

CO₂-Reduktionspotenzial (in MT CO₂/Jahr)



Digitalisierung führt in der Viehwirtschaft im Vergleich zum Ackerbau zu höheren absoluten CO₂-Einsparungen – sowohl 2023 als auch 2030 – Dies ist auf die höheren CO₂-Emissionen in der Viehwirtschaft zurückzuführen. Sie emittiert derzeit etwa doppelt so viel wie der Ackerbau. Somit wird die weitere Adaption digitaler Technologien in diesem Subsektor eine wichtige Rolle für die Emissionsreduktion in der Landwirtschaft spielen.

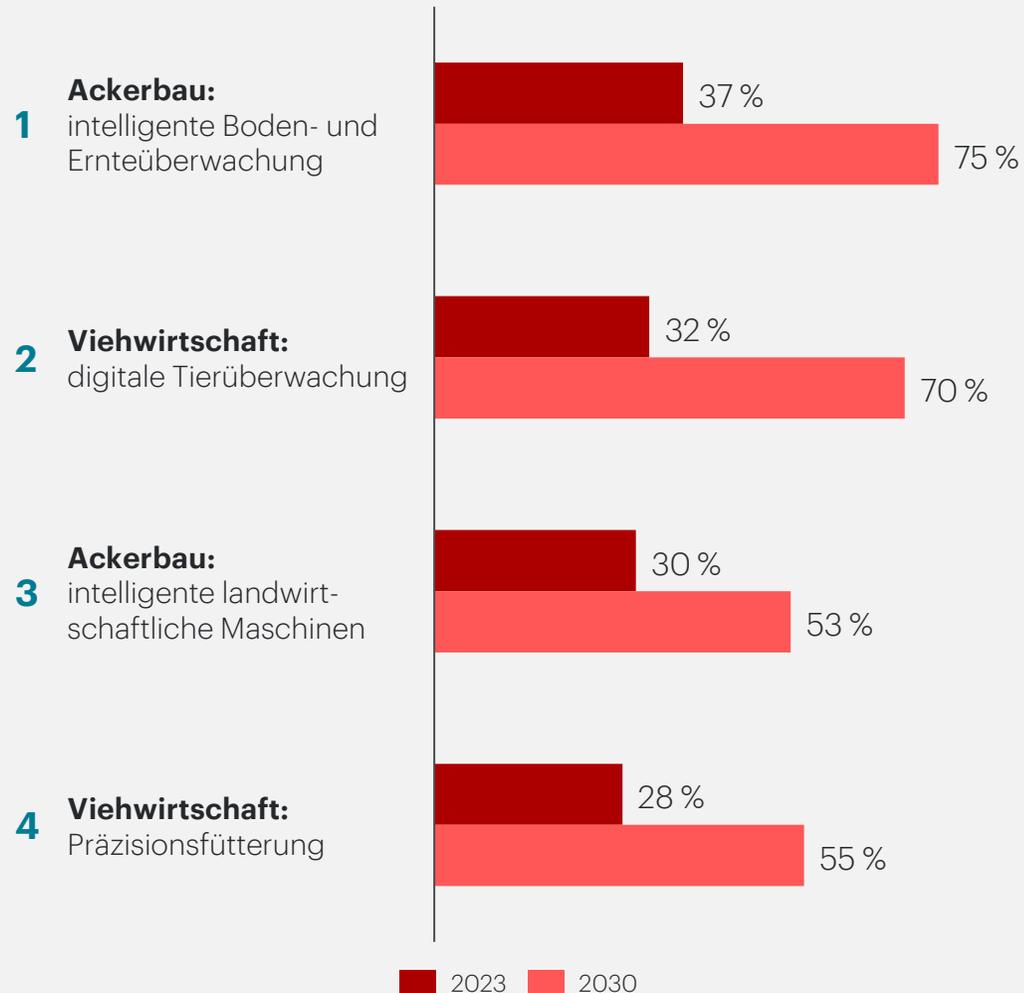
EBIT-Steigerungspotenzial (in Mio. EUR)



Digitalisierung führt im Ackerbau im Vergleich zur Viehwirtschaft zu höheren Profitabilitätssteigerungen – sowohl 2023 als auch 2030 – Die Unternehmensbefragung zeigt, dass die Kostensenkungshebel im Ackerbau im Vergleich zur Viehwirtschaft deutlich höher sind, vor allem bei Düngemitteln, Personal und Kraftstoffverbrauch (bis zu 12 %).

Adaptionsraten der Use Cases

[in %]



Anmerkung: a) Siehe auch Kap. 1.4 Adaptionsraten, S. 29.
Quelle: 1) BCLDE, 2023.

Landwirtschaft Aktuelle und erwartete Adaption digitaler Technologien

Verdopplung der Adaptionsrate digitaler Technologien in der Landwirtschaft von heute durchschnittlich 32 % auf 63 % im Jahr 2030.^a

Eine wesentliche Erklärung dafür ist, dass die landwirtschaftlichen Betriebe den finanziellen Mehrwert der Digitalisierung erkennen. Im Sektorvergleich ist der EBIT-Effekt digitaler Technologien in der Landwirtschaft bis 2030 mit am höchsten (siehe S. 16). Die Einführung und Skalierung digitaler Technologien wie Künstlicher Intelligenz (KI), Internet der Dinge (IoT), Sensoren und Drohnen wird deutlich zunehmen.

Große Skalierung bei digitalen Technologien zur Überwachung bzw. zum Monitoring, die eine größere und detaillierte Datensammlung ermöglichen.

Die Unternehmensbefragung ergab, dass Technologien zur intelligenten Überwachung von Böden, Ernten und Tierbeständen eine Zieladaptionsrate von bis zu 75 % haben (siehe Punkt 1 und 2 in der Abbildung). Es ist also eine breite Implementierung in der deutschen Landwirtschaft zu erwarten. Die Adaption dieser Use Cases dürfte mit dem „Deforestation Act“ noch beschleunigt werden. Er verpflichtet Unternehmen, ihre Lieferketten zu überprüfen und sicherzustellen, dass ihre Produkte nicht mit Entwaldung in Verbindung stehen. Da diese Technologien zur verifizierten Rückverfolgung von Rohstoffen gemäß dem Gesetz beitragen, wird erwartet, dass ihre Verbreitung zunimmt.¹

I. Ackerbau

Digitale Ernteüberwachung und -bewirtschaftung

Beschreibung des Subsektors

Im Jahr 2022 wurden rund 50 % der Fläche Deutschlands für landwirtschaftliche Zwecke genutzt, Ackerland hatte daran wiederum einen Anteil von 70 %.¹ Landwirtschaftliche Produkte, die darauf angebaut werden, sind bedeutende Exportgüter und ein wichtiger Faktor im deutschen Außenhandel: Etwa ein Drittel der gesamten deutschen landwirtschaftlichen Produktion wird exportiert.² Diese Produktion trägt wiederum zur Klimaerwärmung bei. So gingen 2022 insgesamt 15,8 MT CO₂ bzw. 30 % der landwirtschaftlichen Emissionen Deutschlands auf die Bewirtschaftung von Ackerflächen zurück.³

Herausforderungen und Digitalisierungsfelder

Der Ackerbau steht gegenwärtig vor zahlreichen Herausforderungen, die eine verstärkte Ausrichtung auf Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit verlangen.⁴ Insbesondere ist der Ackerbau stark von den Folgen des Klimawandels betroffen, da Extremwetterereignisse wie Dürren oder Überschwemmungen direkte Auswirkungen auf die Ernteerträge haben.⁵ Zudem tragen die im Ackerbau angewendeten Dünge- und Pflanzenschutzmittel zur Belastung von Ökosystemen⁴ und zum Klimawandel bei.³ Landwirtschaftliche Betriebe sehen sich zudem mit Fachkräftemangel⁶ und steigenden Dünge- und Pflanzenschutzmittelpreisen⁷ konfrontiert.

Diese komplexen Herausforderungen erfordern innovative Lösungen, die eine präzisere Ernteüberwachung, eine effizientere Nutzung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln sowie die Reduzierung manueller Arbeiten im Ackerbau ermöglichen.

Use Cases

- 1** Intelligente Boden- und Ernteüberwachung
- 2** Intelligente landwirtschaftliche Maschinen



| | CO ₂ -Effekt | EBIT-Effekt |
|------|---|----------------------------------|
| 2023 | 9,4 % 1,9 MT CO ₂ | 3,8 % 961,7 Mio. EUR |
| 2030 | 14,4 % 3,3 MT CO ₂ | 7,0 % 1.465,0 Mio. EUR |



1 2 Use Case: intelligente Boden- und Ernteüberwachung

Kurzbeschreibung

Die intelligente Boden- und Ernteüberwachung zeigt den Zustand von Pflanzen und Ackerböden in Echtzeit und hilft so, deren Gesundheit sicherzustellen sowie den Einsatz von Dünger, Pflanzenschutzmitteln und Kalk zu optimieren. Dank der Fernüberwachung mittels digitaler Technologien ist zudem eine effiziente Bewässerung und die frühzeitige Erkennung von Schädlingsbefall möglich.

Verwendete digitale Technologien

Sensortechnologie: Bodensensoren messen Feuchtigkeit, pH-Wert, Nährstoffgehalt und Temperatur. Blattfeuchtigkeitssensoren und Sensoren für Pflanzenwachstum überwachen die Gesundheit und Entwicklung der Kulturen.¹

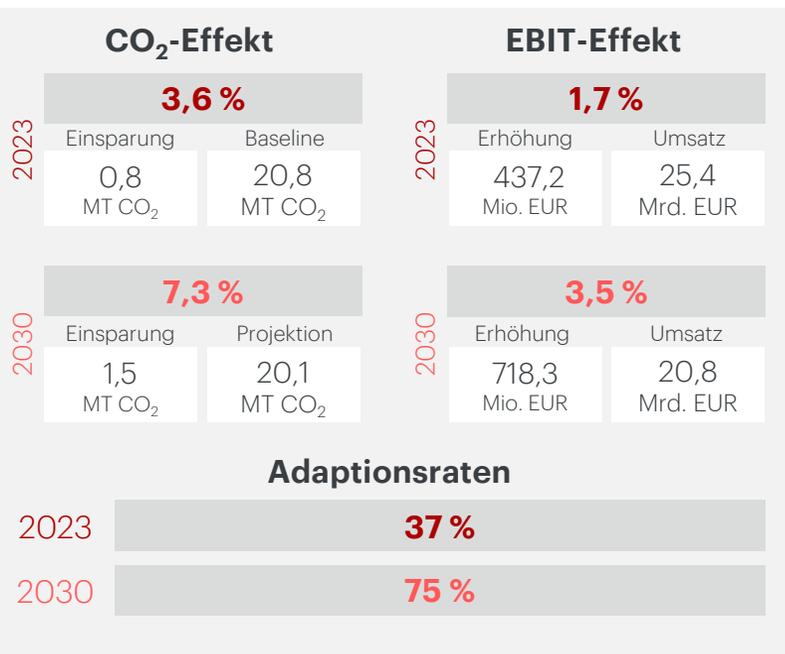
Satellitenbildanalyse: Die Nutzung von Satellitenbildern ermöglicht die großflächige Beobachtung von Wachstumsmustern und damit die Erkennung von Problembereichen.²

Drohnen: Ermöglichen eine detaillierte und flexible Sammlung von Daten über Pflanzenhöhe, Vegetationsdichte und Bodenfeuchtigkeit.²

Big-Data-Analyse: Erlaubt die Verarbeitung und Analyse großer Datenmengen aus verschiedenen Quellen. Dies ist entscheidend für die genaue Planung und Entscheidungsfindung.³

Künstliche Intelligenz (KI) und Maschinelles Lernen (ML): Verarbeiten die gesammelten Daten, um Muster zu erkennen und Vorhersagen zu treffen. KI kann beispielsweise der Krankheitserkennung bei Pflanzen oder der Optimierung von Aussaat und Ernte dienen.⁴

Managementsoftware und mobile Applikationen: Farm-Management-Systeme ermöglichen die Visualisierung von Daten und Trends. Planungs- und Entscheidungshilfen tragen zur optimierten Bewirtschaftung von Ackerböden bei.⁵



Anmerkung: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren.

Quellen: 1) Bogue, 2017; 2) Inoue, 2020; 3) Sourav & Emanuel, 2021; 4) Joseph et al., 2020; 5) Karydas et al., 2023.



1 **2 Use Case: intelligente landwirtschaftliche Maschinen**

Kurzbeschreibung

Intelligente landwirtschaftliche Maschinen wie automatisierte und GPS-gesteuerte Düngemittelstreuer¹, landwirtschaftliche Drohnen² und Roboter³ werden digital gesteuert und ermöglichen Eingriffe aus der Ferne. Durch eine Kombination aus intelligenter Ernteüberwachung und automatischen oder halbautomatischen Eingriffen kann das teilflächenspezifische Düngen, Pflanzen oder Jäten effizienter ausgeführt werden.

Verwendete digitale Technologien

Sensortechnologie: Inkludiert Bodensensoren, Feuchtigkeitssensoren und Wetterstationen. Diese Sensoren sammeln kontinuierlich Daten, die für die Steuerung der autonomen Systeme relevant sind.⁴

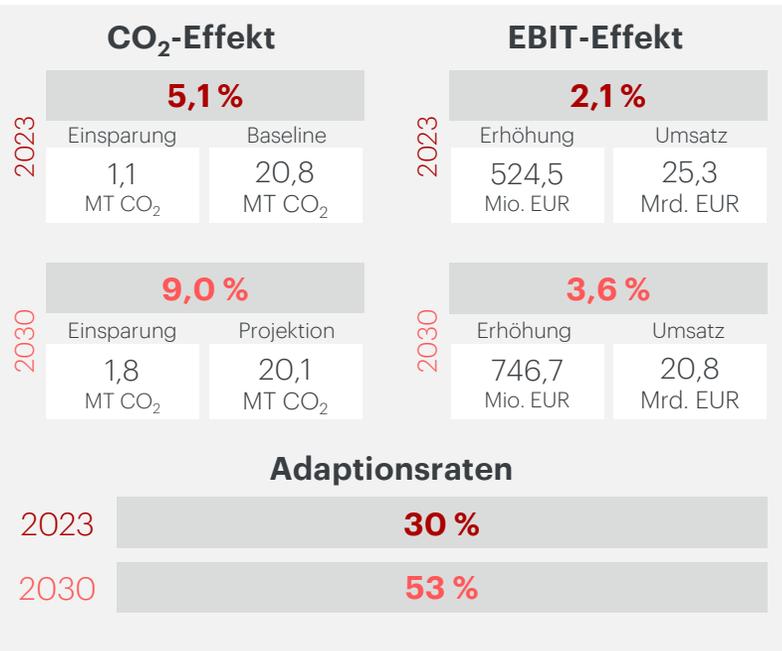
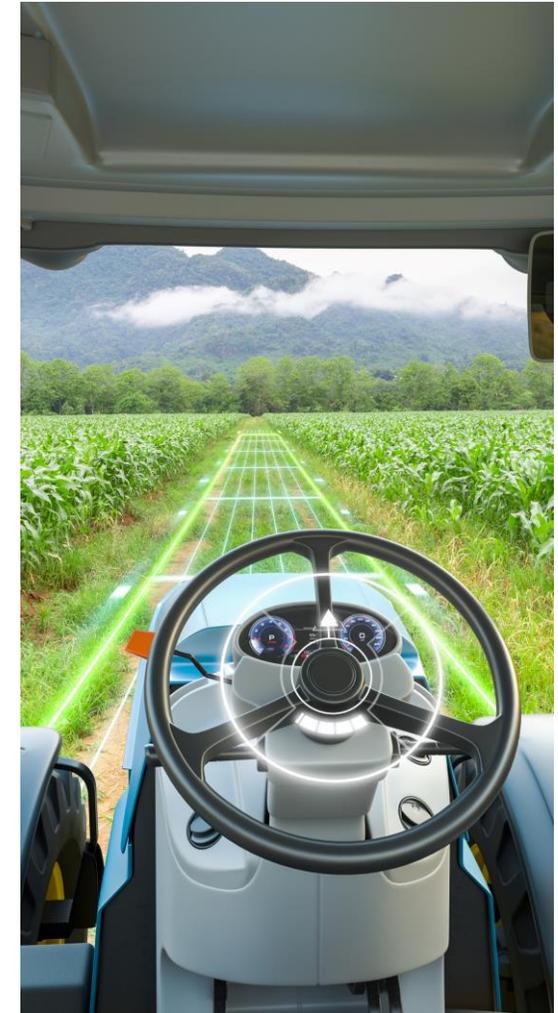
GPS und Geodatenmanagement: Ermöglichen präzise Navigation und Kartierung von landwirtschaftlichen Flächen; wichtig für die Steuerung autonomer Fahrzeuge und Geräte.⁵

Vernetzung und Internet der Dinge (IoT): Ermöglichen die Kommunikation zwischen verschiedenen Geräten und Systemen. Dank IoT können Daten in Echtzeit ausgetauscht und verarbeitet werden, um schnelle Anpassungen vorzunehmen und fundierte Entscheidungen zu treffen.²

Big-Data-Analyse: Erlaubt die Verarbeitung und Analyse großer Datenmengen aus verschiedenen Quellen. Dies ist entscheidend für eine genaue Planung und Entscheidungsfindung.⁶

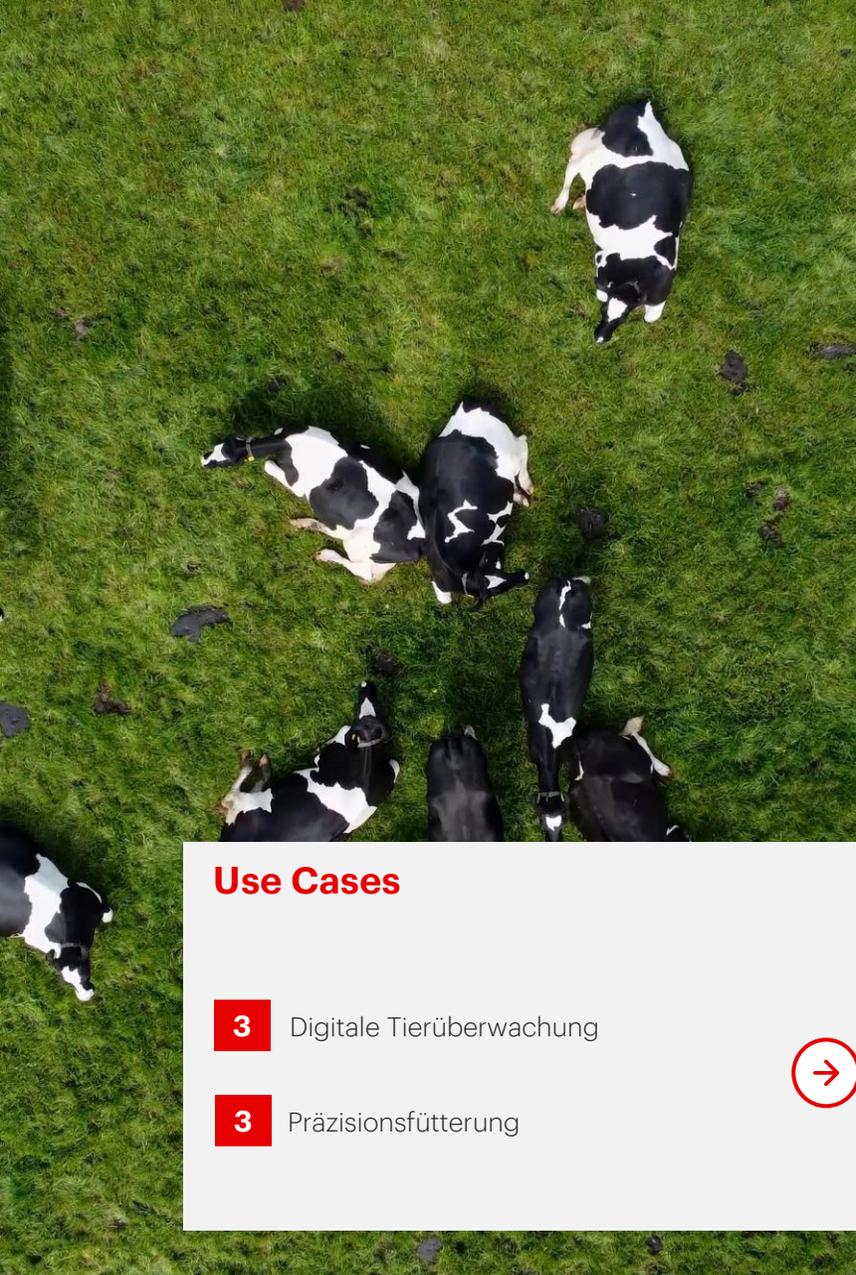
Drohnen: Werden für die Überwachung von Feldern, zur Schädlingsbekämpfung und für eine präzise Düngemittelverteilung genutzt. Im Vergleich zu Bodengeräten ermöglichen sie eine schnellere Erfassung großflächiger Daten.²

Robotik und Automatisierung: Umfassen autonom fahrende Traktoren, Ernteroboter und automatisierte Bewässerungssysteme.³ Diese Roboter können rund um die Uhr arbeiten und erhöhen so die Effizienz.



Anmerkung: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren.

Quellen: 1) Göggerle, 2020; 2) Rejeb et al., 2022; 3) Ghafar et al., 2023; 4) Bogue, 2017; 5) Castrignano et al., 2020; 6) Misra et al., 2022.



II. Viehwirtschaft

Präzise Tierüberwachung und -fütterung

Beschreibung des Subsektors

Laut den Ergebnissen der Agrarstrukturerhebung 2023 gibt es in Deutschland rund 161.700 landwirtschaftliche Betriebe mit Viehhaltung. Dies entspricht 63 % aller landwirtschaftlichen Betriebe der Bundesrepublik.¹

Insgesamt wurden 2022 in Deutschland 21 Mio. Schweine, 11 Mio. Rinder, 1,5 Mio. Schafe und 173 Mio. Geflügeltiere gezählt.² Die Tierhaltung ist der größte Emittent von Methan in Deutschland.³ Das Gas entsteht bei Fermentationsprozessen im Magen von Wiederkäuern und ist rund 28-mal klimaschädlicher als CO₂.⁴

Herausforderungen und Digitalisierungsfelder

Die Viehwirtschaft steht vor wachsenden Anforderungen seitens der Verbraucher hinsichtlich Tierwohl und Tiergesundheit.⁵

Die Gesundheit der Tiere ist die Grundlage einer leistungsfähigen Landwirtschaft.⁶ Dass deren Resistenz gegen antimikrobielle Mittel gestiegen ist, stellt eine große Herausforderung dar. Denn der übermäßige Einsatz von Antibiotika bei Nutztieren trägt zur erhöhten Antibiotikaresistenz sowohl bei den Tieren als auch bei den Menschen bei.

Im Rahmen ihrer Farm-to-Fork-Strategie hat die Europäische Kommission das Ziel gesetzt, den Gesamtabsatz von Antibiotika für Nutztiere und in der Aquakultur bis 2030 um 50 % zu reduzieren.⁷

Eine detaillierte Überwachung und eine individuell zugeschnittene Fütterung tragen dazu bei, die individuellen Bedürfnisse der Tiere zu berücksichtigen, Tierwohl und Tiergesundheit zu fördern sowie Maßnahmen zur Verringerung der Methanemissionen umzusetzen.

Use Cases

- 3** Digitale Tierüberwachung
- 3** Präzisionsfütterung



| | CO ₂ -Effekt | EBIT-Effekt |
|------|---|--------------------------------|
| 2023 | 8,0 % 3,4 MT CO ₂ | 1,4 % 492,2 Mio. EUR |
| 2030 | 17,3 % 5,8 MT CO ₂ | 2,7 % 746,8 Mio. EUR |



3 4 Use Case: digitale Tierüberwachung

Kurzbeschreibung

Digitale Tierüberwachung steht für den Einsatz tragbarer oder ferngesteuerter Geräte zur Überwachung von Tierbeständen. Durch diese Technologie können der Gesundheitszustand, das Verhalten und der Standort von Tieren in Echtzeit ermittelt und beobachtet werden. Dies ermöglicht die Ergreifung präventiver oder proaktiver Maßnahmen sowie im Bedarfsfall eine rasche Behandlung.

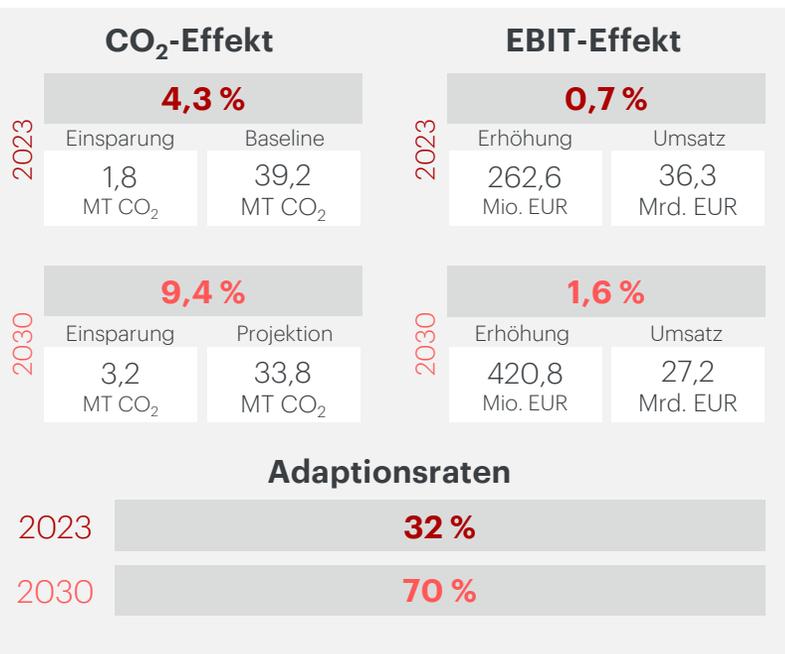
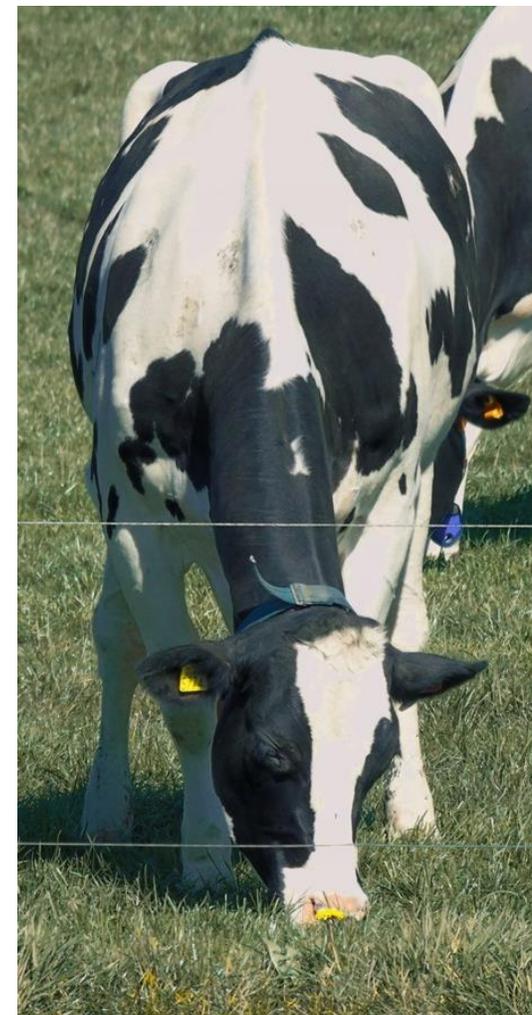
Verwendete digitale Technologien

Tragbare Sensoren: Ermöglichen eine individuelle Überwachung der Tiere, indem sie verschiedene Gesundheitsparameter wie Körpertemperatur und Bewegung erfassen.¹

Stationäre Sensoren: Können zur Überwachung von Stallklima und Tierverhalten eingesetzt werden. Dafür messen sie wichtige Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftqualität im Stall. Darüber hinaus erfassen sie das Fressverhalten und den Bewegungsradius der Tiere, um schnell auf Abweichungen reagieren zu können.¹

Künstliche Intelligenz (KI) und Maschinelles Lernen (ML): Verarbeiten die gesammelten Daten, um Muster zu erkennen und Vorhersagen zu treffen. Insbesondere kann KI zur Krankheitserkennung bei Tieren genutzt werden.

Managementsoftware und mobile Applikationen: Farm-Management-Systeme bieten die Möglichkeit, Daten und Trends zu visualisieren. Sie dienen als Planungs- und Entscheidungshilfen, um die Bewirtschaftung zu optimieren.²



Anmerkung: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren.
 Quellen: 1) BfT, 2023a; 2) Karydas et al., 2023.



3 **4 Use Case: Präzisionsfütterung**

Kurzbeschreibung

Präzisionsfütterung bezieht sich auf die gezielte Fütterung einzelner Tiere oder Tiergruppen unter Berücksichtigung der im Laufe des Tierlebens auftretenden Veränderungen des Nährstoffbedarfs. Die Methode nutzt detaillierte Datenanalysen und Automatisierung, um die Futterzusammensetzung und -ausgabe auf Basis individueller Daten der einzelnen Tiere anzupassen.¹

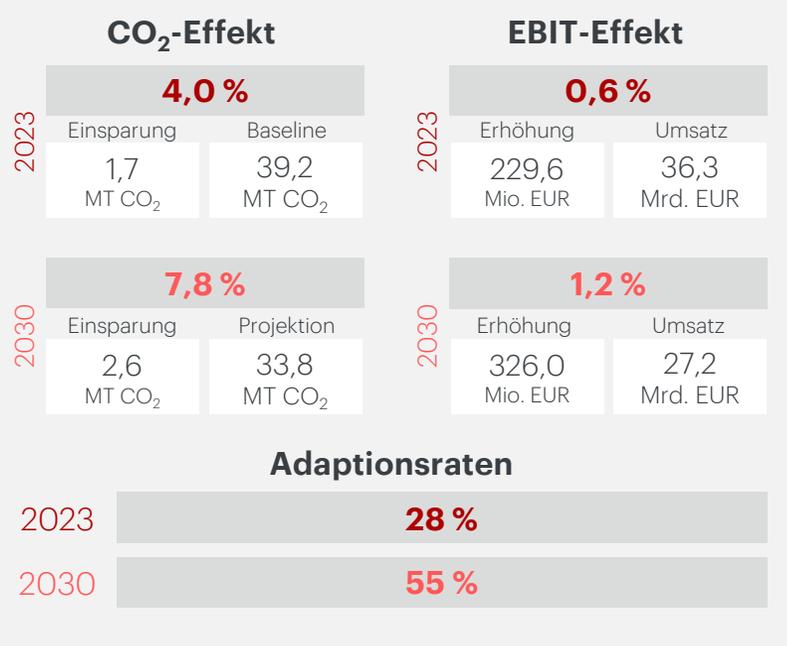
Verwendete digitale Technologien

Echtzeitüberwachungssensoren: Tragbare und stationäre Sensoren überwachen in regelmäßigen Abständen oder kontinuierlich das Futterverhalten, die Gesundheit und die Bewegungen der Tiere. Beispielsweise können Kameras in Verbindung mit Bildanalyse eingesetzt werden, um das Verhalten der Tiere zu beobachten und das Körpergewicht zu schätzen. Zudem ermöglicht eine Echtzeitgeräuschanalyse die Überwachung des Gesundheitszustands und des Wohlbefindens der Tiere.¹

Analysesoftware: Mathematische Modelle helfen, aus den gesammelten Daten individuelle Analysen zu den Tieren abzuleiten. Dadurch können die spezifischen Bedürfnisse jedes einzelnen Tieres festgestellt und die Futterzusammensetzung entsprechend angepasst werden.¹

Individualisierte Futterdosierer: Das System stellt das Futter für jedes Tier individuell zusammen und gibt es aus. Es wählt aus verschiedenen vorgemischten Futtermitteln aus, um eine Nährstoffkomposition entsprechend den Bedürfnissen der einzelnen Tiere zu erzielen. Durch die tägliche Anpassung der Fütterung wird eine Überfütterung vermieden.²

RFID-Tags: RFID steht für „radio-frequency identification“.³ Ein RFID-System besteht aus einem Transponder, der sich am oder im Gegenstand bzw. Lebewesen befindet und einen kennzeichnenden Code enthält, sowie einem Lesegerät zum Auslesen dieser Kennung. Dies wird genutzt, um Tiere zu identifizieren und sicherzustellen, dass jedes Tier die eigene individuelle Futtermischung erhält.³



Anmerkungen: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren; a) Identifizierung mithilfe elektromagnetischer Wellen. Quellen: 1) Pomar et al., 2019; 2) Banhazi et al., 2012; 3) Schillings et al., 2021.

2 Sektor- auswertung

2.4 Logistik



Logistik

Sektor, Subsektor und Use Cases

Kurzbeschreibung des Sektors

Der Logistiksektor ist Deutschlands drittgrößter Wirtschaftsbereich und umfasst im Transportbereich Straßen- und Schienenverkehr, den inländischen Flugverkehr und die Binnenschifffahrt.¹ Er beschäftigt über 3 Mio. Menschen und erwirtschaftete im Jahr 2023 einen Umsatz von etwa 330 Mrd. EUR.²

Die Branche profitiert von der zentralen Lage im Herzen Europas:³ So entfällt ein Viertel des gesamten europäischen Logistikmarkts auf deutsche Unternehmen, die ihren Umsatz in den Bereichen Transport, Umschlag, Lagerei, Spedition und Verpackung generieren.²

Beim Transport herrscht der CO₂-intensive Lkw-Verkehr vor – mit steigender Tendenz, da die Nachfrage nach Gütern und Transportkapazitäten wächst.^{4,5} Der Anteil von Lkws an der insgesamt erbrachten Transportleistung im Güterverkehr belief sich im Jahr 2022 auf rund 72,1 %.⁶ Deshalb konzentriert sich diese Untersuchung auf den Lkw-Güterverkehr.

Analysierter Subsektor und Use Cases

I. Lkw-Güterverkehr



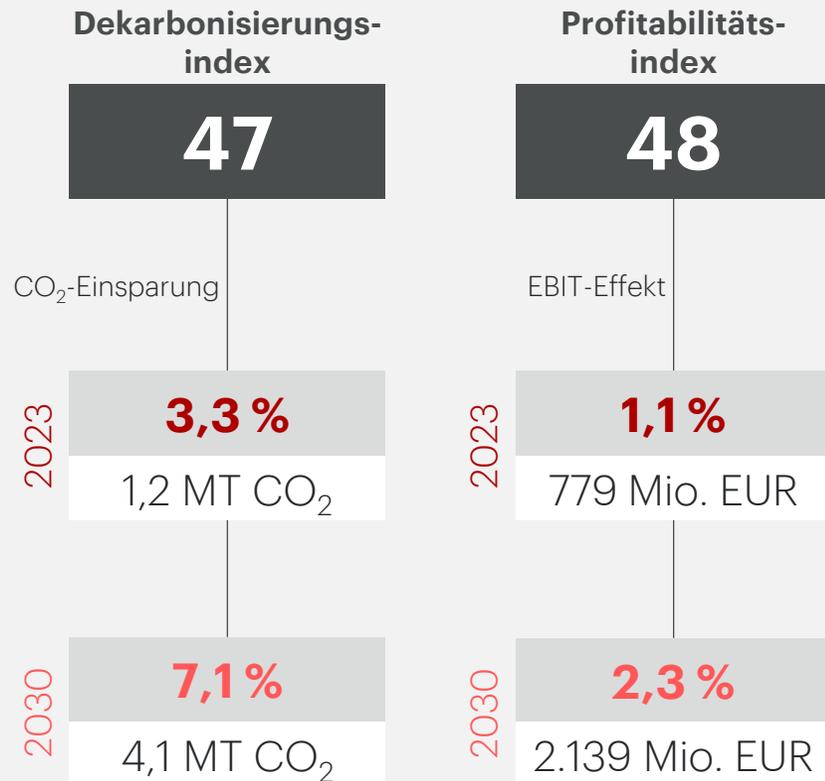
- 1 Digital Twin und Advanced Planning^a
- 2 Intelligente Routen- und Frachtoptimierung
- 3 Truck Platooning

Anmerkung: a) Der Begriff, der auch im deutschsprachigen Raum verwendet wird, bezieht sich auf das Konzept „Advanced Planning Systeme (APS)“.

Quellen: 1) Gemäß Verkehrssektordefinition des Umweltbundesamts, [UBA, 2023](#); ausgenommen sind CO₂-Emissionen der internationalen Luftverkehre und der Hochseeschifffahrt; 2) [Statista, 2024f](#); 3) [BVL, 2023](#); 4) [Fraunhofer IML, 2024](#); 5) [Statista, 2024e](#); 6) [Statista, 2024a](#).

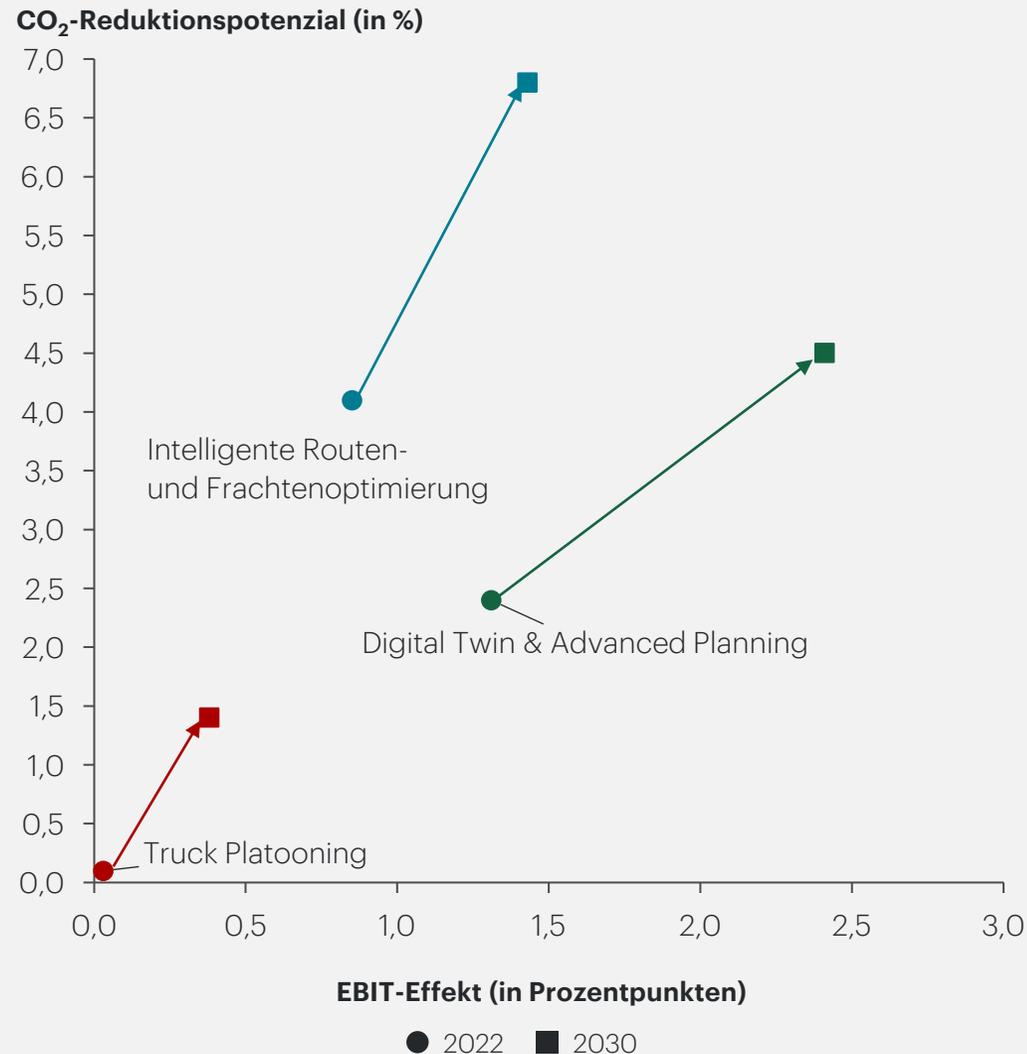
Logistik

Die zentralen Erkenntnisse auf einen Blick



- CO₂- versus EBIT-Effekte:** Beide Effekte zeigen im Lkw-Güterverkehr eine starke gegenseitige Abhängigkeit. Denn weniger Kraftstoffverbrauch bedeutet weniger CO₂-Emissionen und weniger Kosten.
- Best Use Case:** Insbesondere die intelligente Routen- und Frachtoptimierung führt durch Effizienzgewinne zu Kraftstoffeinsparungen, die mit direkten CO₂-Einsparungen und EBIT-Effekten einhergehen.
- Verdreifachung beider Effekte erwartet:** Bis 2030 werden sich mittels digitaler Technologien sowohl die CO₂-Einsparungs- als auch die EBIT-Steigerungseffekte (in CO₂ und EUR) im Lkw-Güterverkehr verdreifachen.
- Keine absolute CO₂-Einsparung 2030:** Da die Logistikbranche weiterhin rasant wächst, werden sich die absoluten CO₂-Emissionen in diesem Sektor trotz aller dank digitaler Technologien erzielten relativen Einsparungen deutlich erhöhen.
- Nur moderater Anstieg der Adaptionsraten:** Obwohl in der Branche viele Potenziale für mehr Dekarbonisierung und mehr Profitabilität bestehen, werden sie noch nicht in der Breite genutzt. Viele Unternehmen im Logistiksektor verfügen bisher nicht über ausreichend Kapazitäten, um sich mit digitalen Technologien angemessen beschäftigen zu können.

Anmerkung: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren.



Logistik

CO₂-Reduktion und EBIT-Effekte im Vergleich

Profitabilität und Dekarbonisierung stehen in gegenseitiger Abhängigkeit und steigen deutlich. Am größten sind die EBIT-Effekte durch den Digital Twin.

Ein Grund für die hohen CO₂-Reduktionspotenziale sind die großen CO₂-Hebel^a der drei Use Cases, die zwischen 10 und 14 % liegen. Insbesondere die intelligente Routen- und Frachtoptimierung führt durch Effizienzgewinne zu Kraftstoffeinsparungen, die mit direkten CO₂-Einsparungen einhergehen.

Der Digital Twin erlaubt Logistikern zusätzliche Optimierungsmöglichkeiten auf übergeordneter Planungsebene, sprich: in der Dimensionierung von Lkw-Flotten und Personalkapazitäten entsprechend der tatsächlichen Transportnachfrage, sodass neben der Kraftstoffeinsparung auch EBIT-Hebel wie Personal- und Wartungskosten wirksam werden.

Potenziale des Truck Platooning sind vergleichsweise geringer und werden erst noch entdeckt.

Das als Truck Platooning bezeichnete automatisierte Konvoifahren befindet sich in Deutschland noch in den Anfängen. Nachdem erste Pilotprojekte teilweise positive CO₂- und EBIT-Effekte aufzeigen,^{1,2} weisen die Unternehmensbefragung und aktuelle Wachstumsraten^{3,4} auf eine leicht zunehmende Adaption hin. Bis zu 20 % weniger Lohnkosten^b und 14 % weniger Kraftstoffverbrauch verspricht das Truck Platooning, auch wenn es nur auf bestimmten Routenabschnitten und auf Autobahnen zur Anwendung kommen kann.^{c,5}

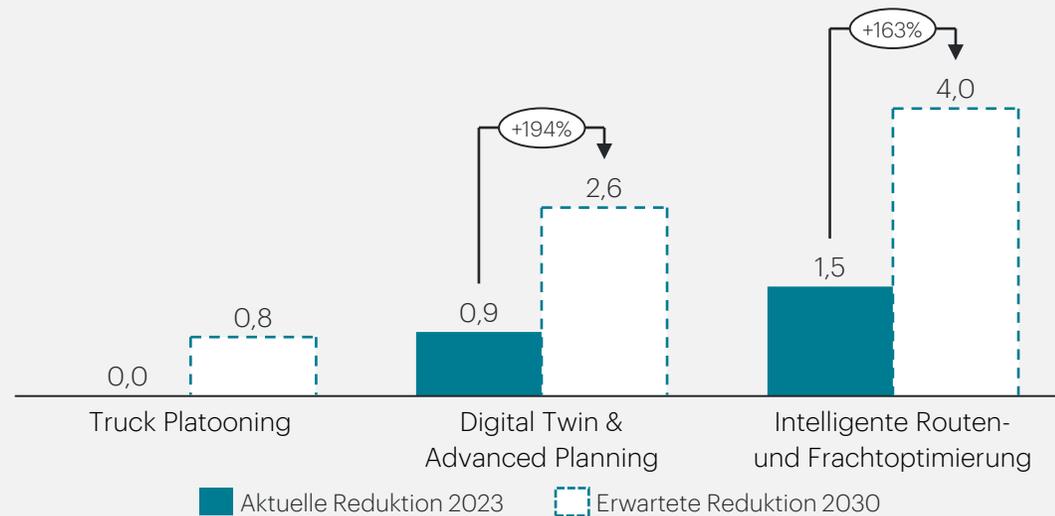
Anmerkungen: a) Definition siehe Kap. 1.1 Einführung, S. 14; b) In Deutschland wird aus regulatorischen Gründen nicht mit vollautonomem Truck Platooning gerechnet, d.h. Lkws ohne Fahrer. Daher sind die Lohnkosteneinsparungen nicht mit durchschnittlich 15 % zu veranschlagen; c) Unter Berücksichtigung der adressierbaren Fahrten ergibt sich eine durchschnittliche Kosteneinsparung von 2,8 % und für 2030 ein EBIT-Margen-Effekt von +0,38 %.

Quellen: 1) Atasayar et al., 2022; 2) CAD, 2022; 3) MarketsandMarkets, 2023; 4) Market Research Future, 2024; 5) Pieringer, 2019.

Logistik

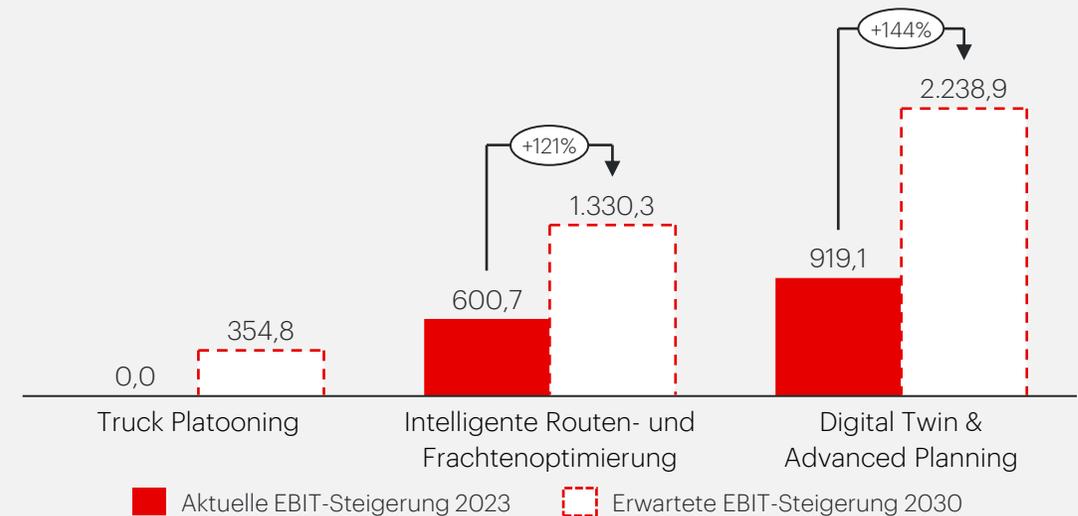
CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerungen

CO₂-Reduktionspotenzial (in MT CO₂/Jahr)



Erwartete CO₂-Einsparungen durch digitale Technologien werden sich fast verdreifachen – Die Marktdurchdringung der Use Cases mit einem durchschnittlichen Anstieg der Adaptionsrate um etwa 17 % bis 2030 sowie die signifikanten Hebel zur CO₂-Reduktion von 10 bis 14 % spielen zwar eine Rolle, doch die hohen absoluten CO₂-Einsparungen bis 2030 gehen vor allem auf den stark wachsenden Lkw-Gütertransport zurück. Damit steigt auch die Einsparung enorm.

EBIT-Steigerungspotenzial (in Mio. EUR)

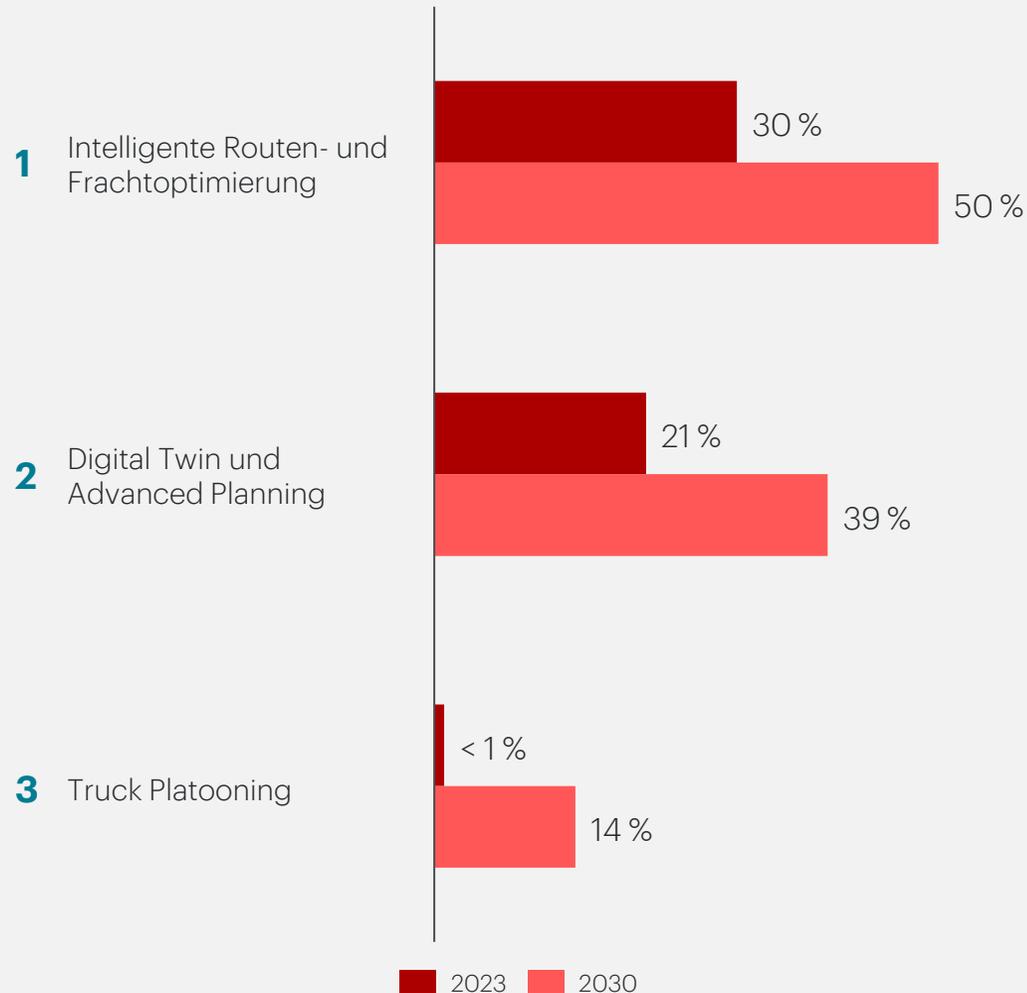


EBIT-Steigerungen durch digitale Technologien werden sich verdreifachen von heute etwa 0,8 auf etwa 2,1 Mrd. EUR im Jahr 2030^a – Während die wachsende Nachfrage im Transportsektor die Umsätze treibt, steigen die Lohnkosten (teilweise durch Fahrermangel bedingt) überproportional. Zusammen mit dem zunehmenden Einsatz digitaler Technologien wie Digital Twin und Advanced Planning, die auf diese Lohnkosten einzahlen, führt das zu einer EBIT-Steigerung von bis zu 144 %.

Anmerkung: a) Um die gesamten EBIT-Einsparungen zu berechnen, wird der Mittelwert aus den Einsparungen der beiden Use Cases „Intelligente Routen- und Frachtoptimierung“ sowie „Digital Twin & Advanced Planning“ gebildet. Dieser Schritt ist notwendig, da der zweite Use Case ebenfalls zu Effizienzsteigerungen bei Routen und Fracht führt.

Adaptionsraten der Use Cases

[in %]



Quelle: 1) BALM, 2020.

Logistik

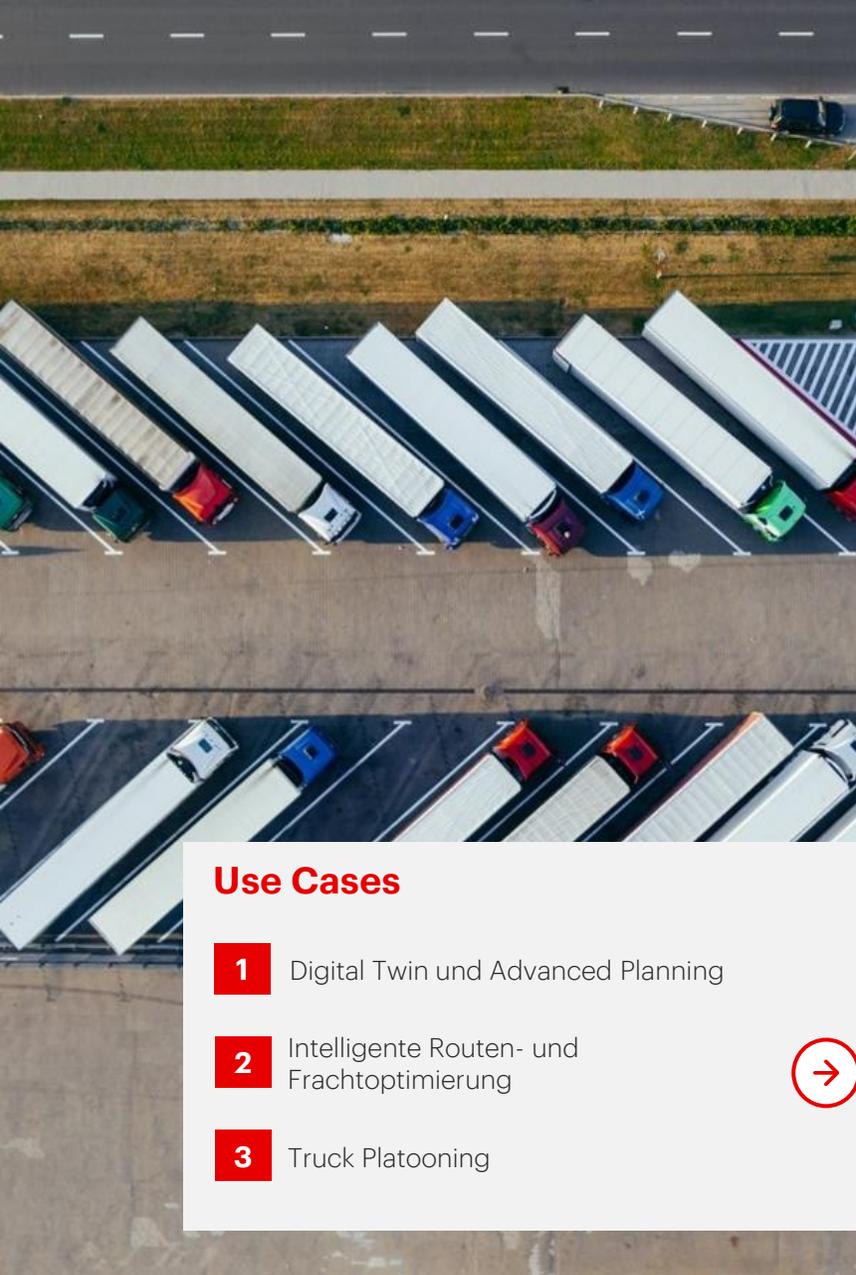
Aktuelle und erwartete Adaption digitaler Technologien

Nur moderater Anstieg der Adaptionsraten digitaler Technologien bis 2030 – vor allem im Mittelstand.

Der Vergleich der Use Cases für 2023 zeigt, dass die Digitalisierung besonders im Bereich der intelligenten Routen- und Frachtoptimierung fortgeschritten ist, der Einsatz von Digital Twins für die Planung und Echtzeitsteuerung von Lkw-Flotten dagegen noch nicht sehr verbreitet ist.

Die großen Logistikunternehmen weisen zwar bereits hohe Adaptionsraten digitaler Technologien auf. Doch je kleiner die Flotten sind, desto geringer ist der Digitalisierungsgrad. Dabei ist der deutsche Markt für den gewerblichen Güterkraftverkehr sehr kleinteilig strukturiert. Von den ca. 47.000 registrierten Unternehmen sind etwa 51% Einzelunternehmen, 77% haben weniger als 11 Lkws.¹ Für sie sind die Einstiegshürden und die Skalierung digitaler Technologien unverhältnismäßig hoch. Das liegt vor allem an den Anfangsinvestitionen für die Ausstattung der Flotte mit Telematiksystemen und (teil-)autonomen Fahrassistenten. Hinzu kommt die Komplexität der Systemintegration, wenn Flottensysteme zusammengelegt werden, wie dies bei Unternehmensaufkäufen oder Zusammenschlüssen der Fall ist. Genauso erschwerend ist der Mangel an Fachpersonal, um mit neuartigen digitalen Technologien wie autonomem Fahren umzugehen, den aufwändigen Datenschutz zu gewährleisten und Schulungsmaßnahmen umzusetzen.

Fazit: Eine vollständige Adaption fortgeschrittener digitaler Technologien bis 2030 ist unter diesen Umständen in der deutschen Logistikbranche eher unwahrscheinlich.



I. Lkw-Güterverkehr

Intelligente Flotten und Transporte

Beschreibung des Subsektors

Im Jahr 2021 entfielen knapp 30 % der CO₂-Emissionen des EU-Straßenverkehrs auf den Lkw-Güterverkehr.¹ In Deutschland trägt er mit 95 % zu den Emissionen des Verkehrssektors bei, wobei angesichts steigender Fahrleistungen mit einem weiteren Anstieg zu rechnen ist.²

Zwar sind die spezifischen Emissionen pro Kilometer seit 1995 durch verbesserte Technologien gesunken. Doch dieser Rückgang wurde zumindest teilweise durch eine von 1995 bis 2021 um 34,5 % gestiegene Fahrleistung kompensiert.³

Herausforderungen und Digitalisierungsfelder

Die stetig wachsende Branche steht vor immensen Herausforderungen: Sie ist besonders gefragt, zu den deutschen Klimaschutzzielen beizutragen, muss mit steigenden Kraftstoffkosten zurechtkommen und erlebt trotz wachsender Personalkosten einen bedrohlichen Mangel an Fachpersonal – vielfach bedingt durch die Rückkehr vieler Fahrer:innen aufgrund des Ukraine-Kriegs in ihre Heimatländer. Beeinträchtigungen durch unplanbare Verzögerungen in den Lieferketten kommen noch hinzu und erschweren die Planung des Lkw-Güterverkehrs erheblich.⁴

Angesichts dieser Herausforderungen erweisen sich digitale Technologien als unerlässlich, um den Lkw-Güterverkehr effizienter und umweltverträglicher zu gestalten. Schon heute lassen sich durch den Einsatz digitaler Technologien zur Routen- und Frachtoptimierung überflüssige Leerfahrten vermeiden, was wiederum zu erheblichen Einsparungen beim Kraftstoffverbrauch und den damit verbundenen CO₂-Emissionen führt.

Use Cases

- 1 Digital Twin und Advanced Planning
- 2 Intelligente Routen- und Frachtoptimierung
- 3 Truck Platooning



| | CO ₂ -Effekt | EBIT-Effekt |
|------|--|----------------------------------|
| 2023 | 3,3 % 1,2 MT CO ₂ | 1,1 % 779,2 Mio. EUR |
| 2030 | 7,1 % 4,1 MT CO ₂ | 2,3 % 2.139,4 Mio. EUR |

1 **2** **3** **Use Case: Digital Twin und Advanced Planning**

Kurzbeschreibung

Ein Digital Twin im Logistiksektor bildet die Flotte virtuell ab und nutzt Echtzeitdaten zu den Lkws, ihrem Zustand, ihrem Verhalten und ihren Einsätzen (z.B. Geschwindigkeiten, Ladungen, Liefertermine), um Echtzeitoptimierungen oder erweiterte Planungseingriffe (z.B. Entschleunigungen) vorzunehmen. Der Digital Twin ermöglicht zudem die strategische Planung, beispielsweise hinsichtlich der optimalen Dimensionierung von Flotten und Personalkapazitäten.

Verwendete digitale Technologien

Echtzeitdatenanalyse: Nutzt Telematik und Sensoren, um kontinuierlich Daten wie Geschwindigkeit und Erschütterungen zu sammeln. Edge-Computing-Geräte und Stream-Processing-Software ermöglichen die sofortige Verarbeitung der Daten für Monitoring und schnelle Entscheidungen.

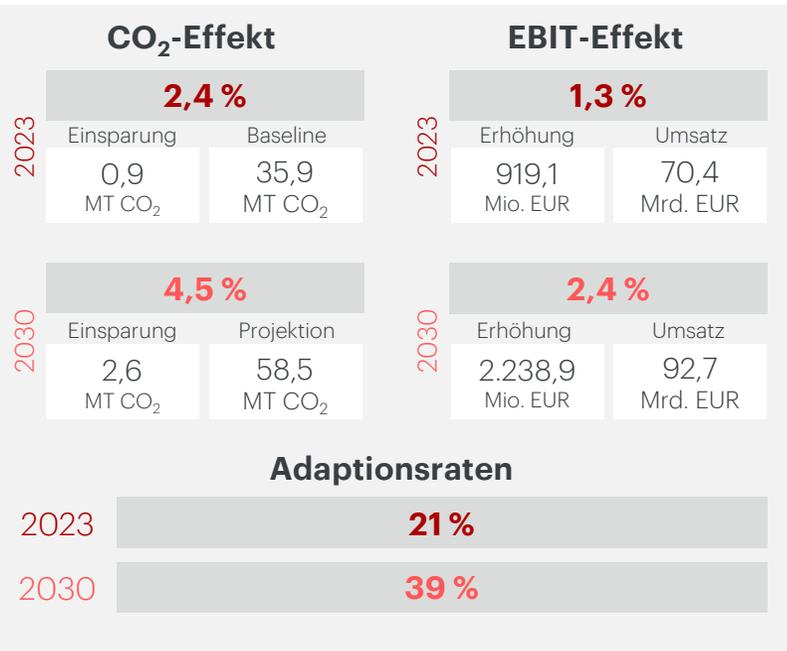
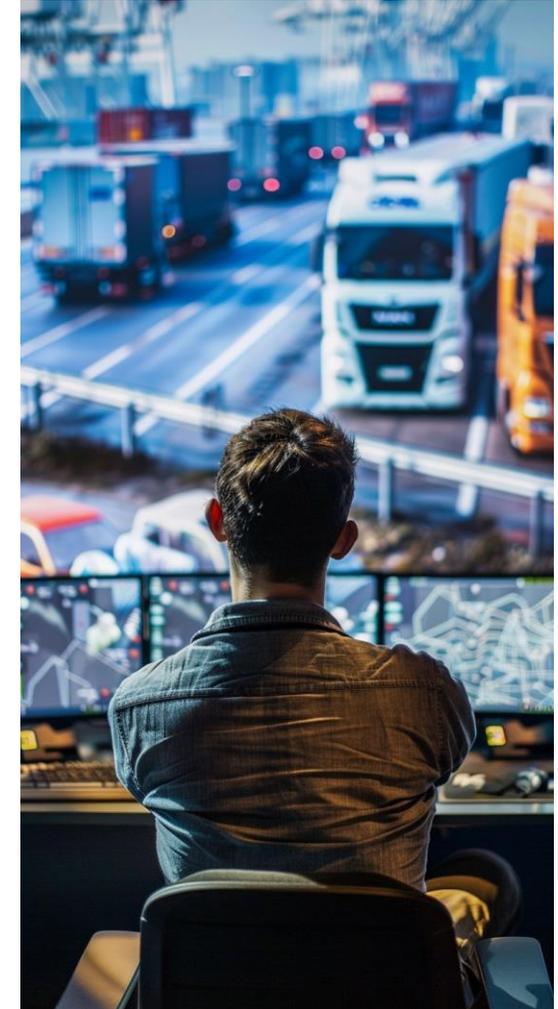
Geodatenmanagement: Setzt GPS-Tracking-Geräte und geographische Informationssysteme (GIS) ein, um die genaue Position und Bewegung der Flotte in Echtzeit zu überwachen. Routenoptimierungssoftware hilft, die effizientesten Wege zu bestimmen und die Flottenverwaltung zu unterstützen.

Vernetzung und Internet der Dinge (IoT): Erlauben die Kommunikation zwischen Fahrzeugen, Ladungssensoren und Kontrollzentren, was eine sofortige Datensynchronisation und Reaktion auf Veränderungen ermöglicht.

Cloud Computing: Stellt die Infrastruktur für die Speicherung, Verarbeitung und Analyse großer Datenmengen bereit und ermöglicht einen skalierbaren Zugriff auf Ressourcen.

Künstliche Intelligenz (KI) und Maschinelles Lernen (ML): Analysieren Datenströme, um Muster zu erkennen, Vorhersagen zu treffen und automatisierte Entscheidungen für die Routenoptimierung und Lastverteilung zu unterstützen.

Telematik und Sensortechnologie: Kombinieren Telekommunikation mit Informatik und Sensorik zur Fernüberwachung und -steuerung der Transportmittel.



Anmerkung: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren.

1 **2** 3 **Use Case: Intelligente Routen- und Frachtoptimierung**

Kurzbeschreibung

Intelligente Routen- und Frachtoptimierung setzt auf Echtzeitdaten, Künstliche Intelligenz (KI) und Vernetzung zwischen Fahrzeugen, Frachten und Kontrollzentren, um traditionelle Routen- und Frachtoptimierungen in Echtzeit zusätzlich zu optimieren. Der Nutzen ist vielfältig: mehr Transparenz, verlässliche Alarmmeldungen bei kritischen Events (z.B. Staus und Sperrungen) sowie intelligente Unterstützung^a von Disponenten durch KI-gestützte Methoden.

Verwendete digitale Technologien

Telematiksysteme und KI: Ermöglichen eine umfassende Flottenüberwachung durch Echtzeitdaten zu Standort, Fahrzeug und Fahrverhalten. Intelligente Algorithmen werten historische und aktuelle Geschwindigkeiten aus, prognostizieren Verkehrsflüsse und erlauben dynamische Routenanpassungen. Advanced Analytics und Predictive Modeling fließen in die KI ein, um Engpässe vorherzusagen und effizientere Routen sowie Beladungen zu planen.

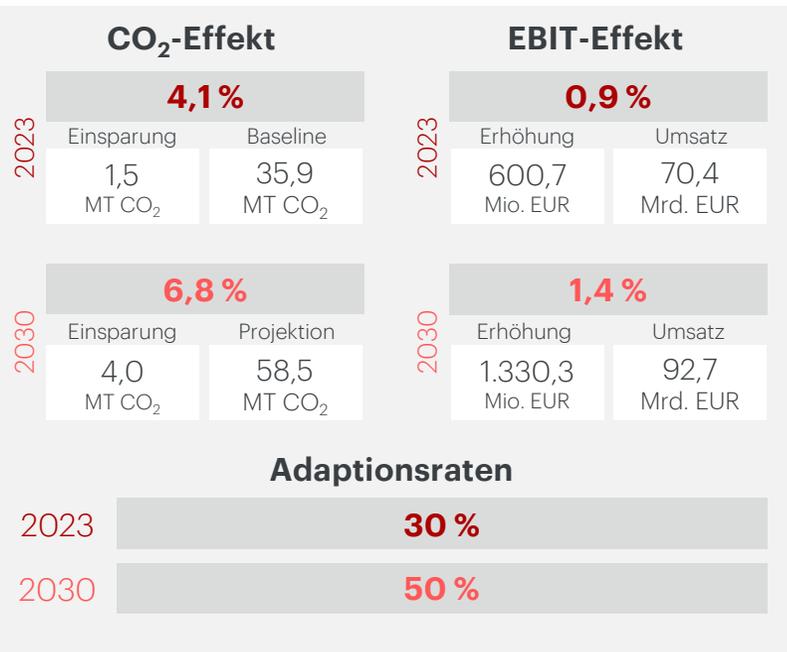
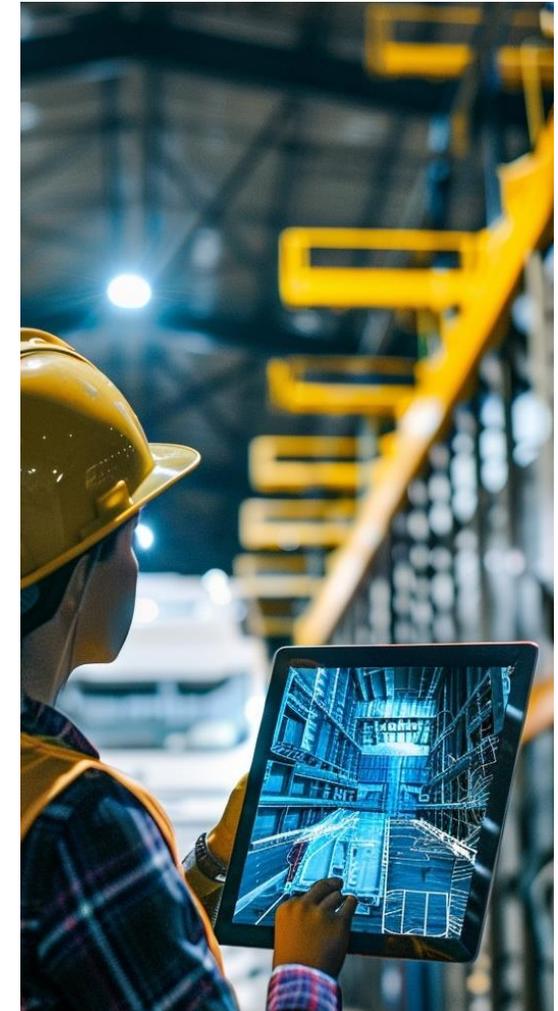
Internet der Dinge (IoT): Spielt eine zentrale Rolle für die Echtzeitüberwachung und -optimierung von Fahrzeugen und Ladungen mit integrierten Sensornetzwerken zur Verbesserung der Frachtüberwachung und Kraftstoffeffizienz.

Laderaummanagement-Systeme: Nutzen Algorithmen, die u.a. auf Volumen, Gewicht und Priorität basieren, zur Optimierung der Laderaumnutzung – und tragen so dazu bei, die Anzahl der Fahrten zu reduzieren und die Effizienz zu steigern.

Fahrassistenzsysteme: Verwenden Datenanalysen, um Fahrer bei der Wahl der Routen zu unterstützen und die Sicherheit durch Warnungen, wie beispielsweise bei Unwetter, zu erhöhen.

Satellitenkommunikation: Bietet auch in entlegenen Gebieten eine verlässliche Datenkommunikation, um Routenflexibilität und Erreichbarkeit zu gewährleisten.

Cloud-basierte Frachtplattformen: Verbessern die Transparenz und minimieren Leerfahrten durch effiziente Frachtzuweisungen und optimierte Auslastung.



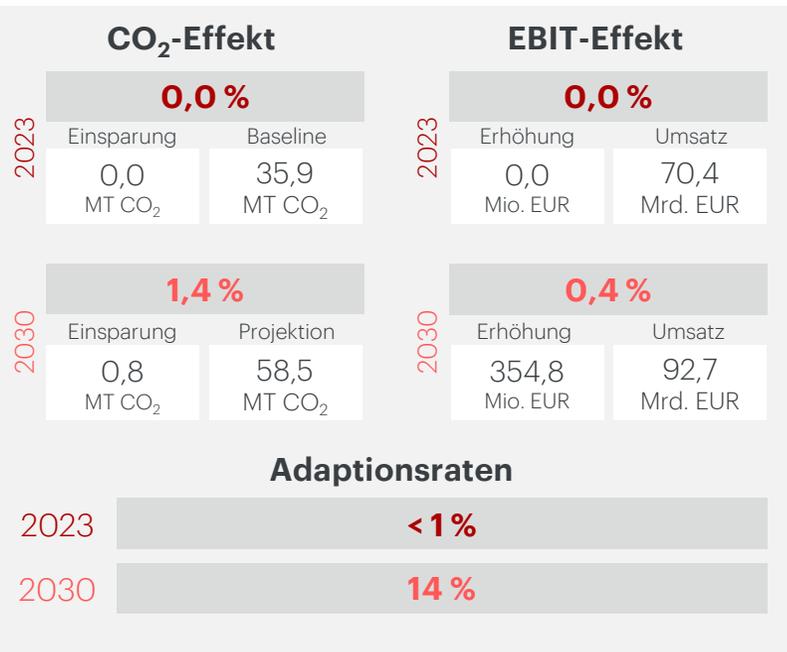
Anmerkungen: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren; a) Zum Beispiel frühzeitiges Auslösen von Nachlieferungen, wenn Sensoren an Ladeeinheiten Störungen wie Erschütterungen detektieren, um so CO₂-intensive Expresslieferungen zu umgehen.



1 2 **3 Use Case: Truck Platooning**

Kurzbeschreibung

Truck Platooning steht für Lkw-Konvois (Platoons), die mittels automatisierter Fahrassistenzsysteme und Echtzeitkommunikation gesteuert werden. Die Fahrzeuge können Geschwindigkeit und Abstand selbst kontrollieren und eine präzise Konvoi-bildung mit geringem Abstand auf Autobahnen garantieren. Platoons werden durch Kontrollzentren begleitet, steigern die Effizienz, vor allem durch reduzierten Luftwiderstand, und senken damit den Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen.



Verwendete digitale Technologien

Automatisierte Fahrassistenzsysteme (ADAS): Bieten Funktionen wie adaptives Cruise Control und automatisches Bremsen, die für die Abstandsregelung und Geschwindigkeits-synchronisation zwischen den Lkws essenziell sind.

Vehicle-to-Vehicle-Kommunikation (V2V): Erlaubt es Fahrzeugen, in Echtzeit miteinander zu kommunizieren und Informationen über Geschwindigkeit, Abstand und Route auszutauschen.

Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation (V2I): Integriert Verkehrsinfrastrukturdaten wie Verkehrszustand und Straßenbedingungen in die Steuerung der Platoons.

GPS und präzise Ortungssysteme: Stellen sicher, dass die Position jedes Lkws im Platoon genau bestimmt wird, um die Formation und Navigation zu optimieren.

Zentrale Steuerungssysteme: Koordinieren die Platoons aus der Ferne, überwachen die Konvois und passen die Routenplanung dynamisch an.

KI-gesteuerte Algorithmen: Analysieren kontinuierlich Datenströme, um die Effizienz des Platooning-Prozesses zu maximieren und die Fahrzeuge sicher zu führen.

Cloud- und Edge-Computing-Plattformen: Speichern und verarbeiten die riesigen Datenmengen, die für die Überwachung und Optimierung der Platoons nötig sind.

Cybersicherheitslösungen: Schützen die Kommunikation und die Steuerungssysteme der Platoons vor unautorisierten Eingriffen und garantieren die Integrität des Systems.



Anmerkung: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren.

2 Sektor- auswertung

2.5 Strom



Strom

Sektor, Subsektoren und Use Cases

Kurzbeschreibung des Sektors

Der Sektor mit knapp 250.000 Beschäftigten befindet sich in einem grundlegenden Umbruch.¹ Bis 2030 muss er gemäß dem Ziel der Bundesregierung mindestens 80 % des Bruttostromverbrauchs durch erneuerbare Energien decken² und gleichzeitig die Energieerzeugung aus Kohle schrittweise reduzieren.³ Die Bedeutung dieses Wandels wird unterstrichen durch den bereits im Jahr 2023 erreichten Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung von 52,6%.⁴

Vor diesem Hintergrund ist eine Beschleunigung des Ausbaus von Wind- und Solarenergie erforderlich.⁴ Um den Umbruch weiter voranzutreiben, muss die Effizienz der Energieerzeugung aus neuen und existierenden Solar- und Windanlagen gesteigert werden. Zudem ist die Effizienz des Stromnetzes zu verbessern, um Verluste während des Transports, der Umspannung und der Verteilung von Strom zu minimieren.⁵

Analysierte Subsektoren und Use Cases

I. Windenergie



- 1** Standortmodellierung
- 2** Digital Twin und prädiktive Wartung

II. Solarenergie



- 3** Standortmodellierung
- 4** Digital Twin und prädiktive Wartung

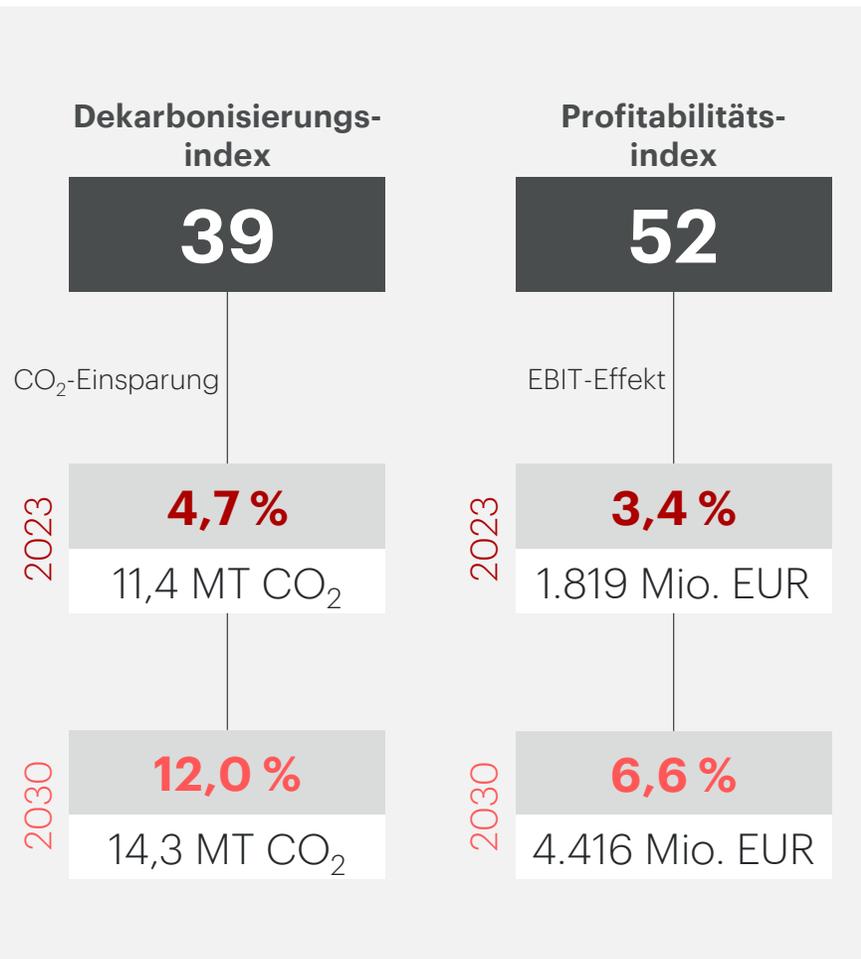
III. Stromnetz



- 5** Digital Twin inklusive digitaler Fehlererkennung und prädiktiver Wartung

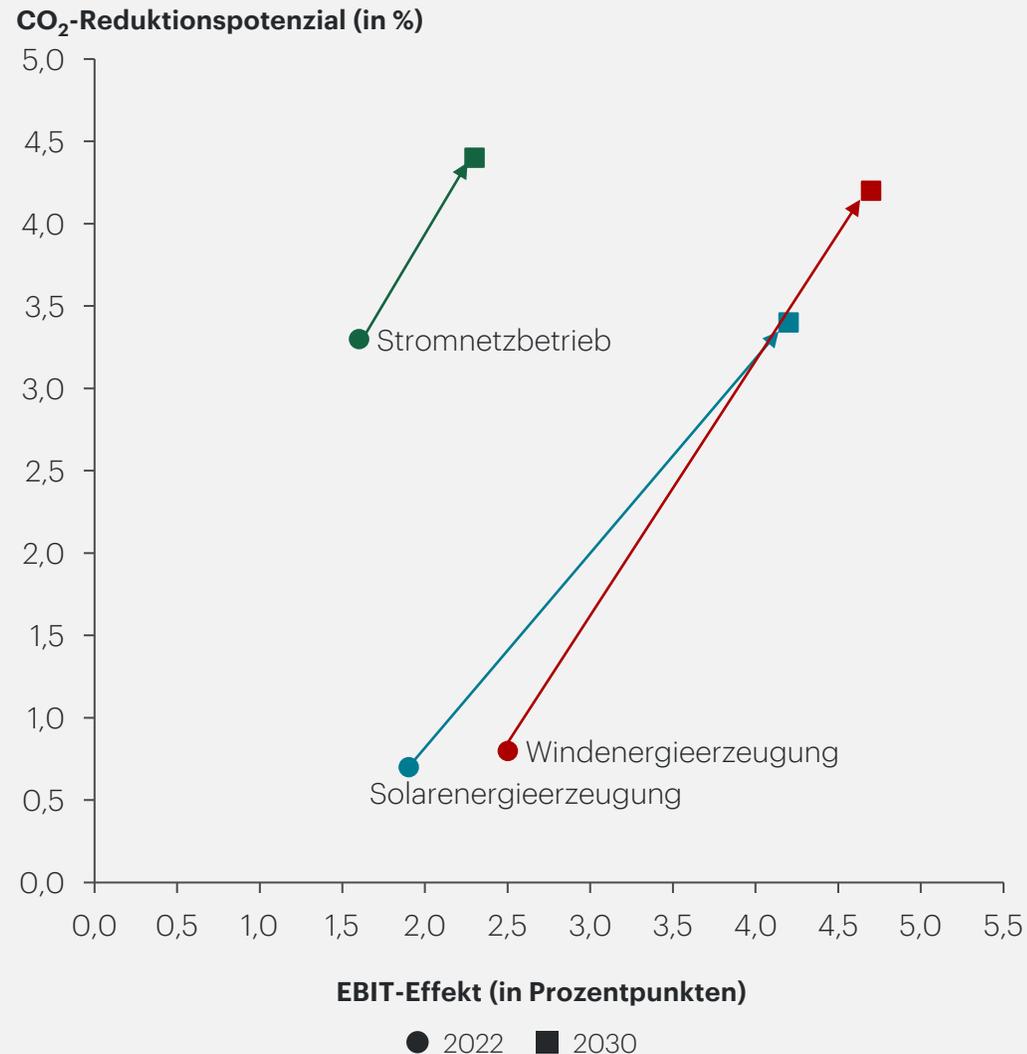
Strom

Die zentralen Erkenntnisse auf einen Blick



- CO₂-Reduktion und EBIT-Effekte im Vergleich:** Digitalisierung in der Netzinfrastruktur ist der Schlüssel zur CO₂-Reduktion im Stromsektor. Die Digitalisierung bei Stromnetzbetreibern bis 2030 weist mit bis zu 4,4 % das höchste CO₂-Reduktionspotenzial auf und ist ein wichtiger Hebel für die Energiewende.
- Digitalisierung in der Wind- und Solarenergieerzeugung:** Digitale Technologien in der Wind- und Solarenergiebranche zeigen einen positiven Zusammenhang zwischen CO₂-Einsparung und EBIT-Effekt auf, wobei beides bis 2030 signifikant ansteigt.
- CO₂-Einsparungen:** Der Einsatz digitaler Technologien bei Stromnetzbetreibern führt heute schon zu relativ hohen CO₂-Einsparungen von ca. 8 MT CO₂ pro Jahr. Bei Wind- und Solarstromerzeugern sind bis 2030 mehr als doppelt so hohe absolute CO₂-Einsparungen zu erwarten.
- Profitabilitätseffekte:** Am stärksten wird der Anstieg der EBIT-Effekte durch Digitalisierung bei den Solarenergieerzeugern ausfallen – von 1,9 % auf 4,2 % im Jahr 2030. Bei den Windenergieerzeugern ist schon heute ein EBIT-Effekt von 2,5 % zu verzeichnen.
- Adaption digitaler Technologien:** Bis 2030 wird die Nutzung von Digital Twins im Wind- und Solarsektor um das 2 bis 3-Fache steigen. Die Adaptionrate digitaler Technologien bei der Standortmodellierung wird von heute durchschnittlich 42 % auf 72 % im Jahr 2030 wachsen.

Anmerkung: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren.



Strom

CO₂-Reduktion und EBIT-Effekte im Vergleich

Die Digitalisierung in der Netzinfrastruktur ist der Schlüssel zur CO₂-Reduktion im Stromsektor.

Bis 2030 wird ein entscheidender Beitrag zur CO₂-Reduktion durch die Digitalisierung im Netzbetrieb erwartet, mit einem Potenzial von bis zu 4,4 %. Obwohl der EBIT-Effekt hinter dem der erneuerbaren Energien zurückbleibt, spielt die Digitalisierung bei Stromnetzbetreibern eine zentrale Rolle für die deutsche Energiewende. Dies wird durch den seit 2018 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz verfolgten Netzausbau- und Erneuerungsplan unterstützt.¹

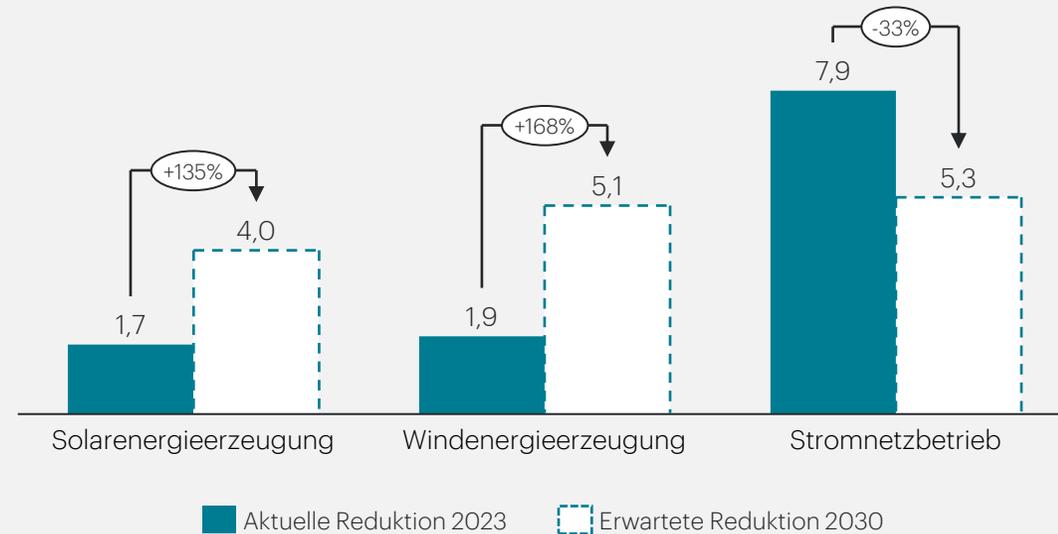
Digitalisierung in der Wind- und Solarenergieerzeugung – Profitabilität und Dekarbonisierung stehen in engem Zusammenhang und steigen deutlich.

Digitale Technologien in der Wind- und Solarenergiebranche zeigen einen positiven Zusammenhang zwischen CO₂-Einsparung und EBIT-Effekt, wobei beides bis 2030 signifikant ansteigt. Dies verdeutlicht, dass Unternehmensinvestitionen in digitale Technologien sich hier sowohl im Hinblick auf die Dekarbonisierung als auch die Profitabilität lohnen werden.

Die erwartete Zunahme des EBIT-Effekts bis 2030 macht deutlich, dass die Energiewende nicht nur eine ökologische Notwendigkeit, sondern auch eine wirtschaftliche Chance für Energieerzeuger darstellt.

Strom CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerungen

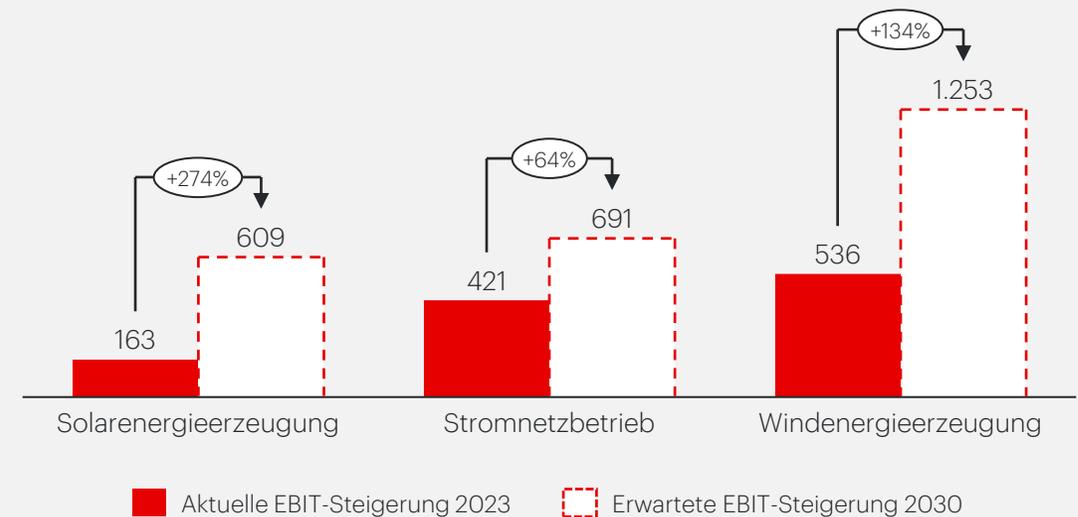
CO₂-Reduktionspotenzial (in MT CO₂/Jahr)



Der Einsatz digitaler Technologien führt heute schon zu hohen CO₂-Einsparungen – Digitale Technologien erhöhen die Effizienz im Stromnetz und sparen aktuell rund 8 MT CO₂ pro Jahr ein, insbesondere aufgrund des gegenwärtigen Anteils fossiler Brennstoffe im Strommix.

Mehr als doppelt so hohe absolute CO₂-Einsparungen bei Wind- und Solarstromerzeugern bis 2030 – Dies wird vor allem durch die erwarteten starken Adaptionraten 2030 ermöglicht.^a

EBIT-Steigerungspotenzial (in Mio. EUR)



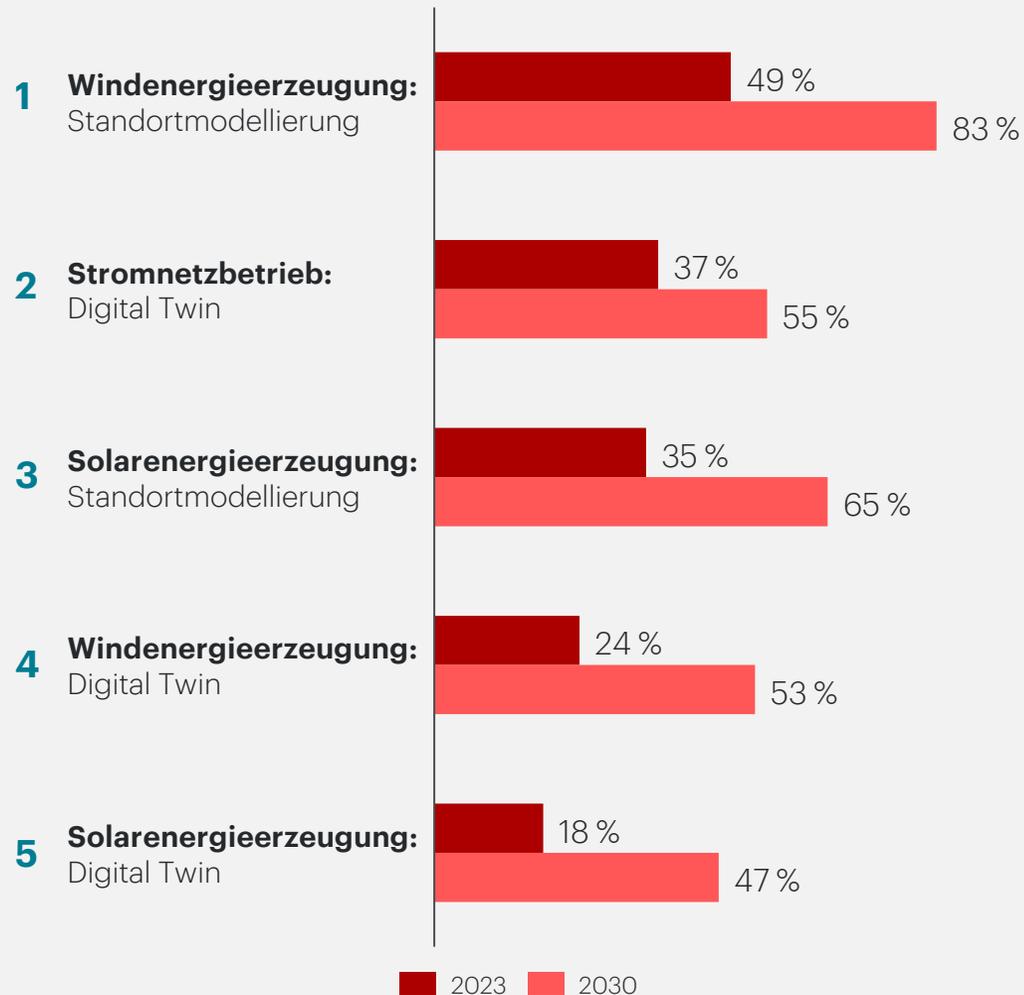
Der Einsatz digitaler Technologien führt heute schon zu einer deutlichen EBIT-Erhöhung – Dies geschieht vor allem aufgrund der heute schon höheren Adaption digitaler Technologien bei Windenergieerzeugern.^a

2,7-facher Anstieg der EBIT-Steigerungen bei den Solarenergieerzeugern bis 2030 – Dies ist hauptsächlich aufgrund von höherem Energie-Output durch Effizienzgewinne zu erwarten, der laut Befragung zu einer Steigerung des Umsatzes von bis zu 20 % führt.

Anmerkung: a) Siehe S. 83.

Adaptionsraten der Use Cases

[in %]



Anmerkung: a) Durchschnitt aus Wind- und Solarenergieerzeugung (Nr. 1 und 3 in der Abbildung).

Strom

Aktuelle und erwartete Adaption digitaler Technologien

Rund 2- bis 3-fache Adaption des Digital Twin im Wind- und Solarsektor bis 2030.

Die Unternehmens- und Expertenbefragung zeigt: Der Umsetzungsstand von Digital Twins bei Wind- und Solarerzeugern liegt heute bei nur ca. 20 %, wird aber um das 2- bis 3-Fache wachsen. Der erwartete Anstieg der Adaptionsraten lässt sich vor allem mit den neuesten technologischen Entwicklungen begründen, die sich durch fortschrittliche KI-Methoden, verbesserte Sensortechnologien und zunehmend leistungsfähigere Datenverarbeitungskapazitäten auszeichnen.

Hohe erwartete Adaptionsrate digitaler Technologien bei der Standortmodellierung: von heute durchschnittlich 42 % auf bis zu 74 % im Jahr 2030.^a

Die Modellierung von Standorten – sowohl in der anfänglichen Standortauswahl als auch im Betrieb – ermöglicht es Energieerzeugern, die Leistung der Anlagen sowohl auf der Kostenseite als auch auf der Output- bzw. Umsatzseite zu optimieren. Die hohe erwartete Adaptionsrate von bis zu durchschnittlich 74 % ist darauf zurückzuführen, dass die Standortmodellierung im Vergleich zum Digital Twin tendenziell reifer und etablierter ist. Sie ist mit geringeren Investitionskosten verbunden, weniger komplex und in der Regel der Schritt vor der Implementierung eines Digital Twin.



I. Windenergie

Digitale Optimierung in Aufbau, Betrieb und Wartung von Anlagen

Beschreibung des Subsektors

Im Jahr 2022 war die Windenergieerzeugung nach der Kohlekraft die zweitwichtigste Energiequelle Deutschlands. 2023 übernahm die Windkraft die Position als wichtigste Quelle zur öffentlichen Stromerzeugung, was die dynamische Entwicklung im Energiemarkt unterstreicht.¹ Die Windkraft wird als entscheidender Faktor der Energiewende weiter ausgebaut, um gemäß dem Erneuerbare-Energien-Gesetz bis 2030 eine Kapazität von 115 Gigawatt (GW) zu erreichen.² Das Windenergieflächenbedarfsgesetz soll sicherstellen, dass bis 2032 zwei Prozent der deutschen Fläche für Windkraftanlagen ausgewiesen werden.³

Herausforderungen und Digitalisierungsfelder

Eine zentrale Herausforderung der Windenergiebranche besteht in der effizienten Nutzung der durch das Windenergieflächenbedarfsgesetz bereitgestellten Flächen für Windanlagen.

Effizienzsteigerungen können bereits in der Planungsphase neuer Windanlagen realisiert werden. So lässt sich durch eine Standortmodellierung der Windverhältnisse die potenzielle Energieerzeugung der Anlage erhöhen.

Eine weitere Herausforderung liegt darin, dass die Produktion von Windenergie stark von den Wetterbedingungen abhängig ist.⁴ Um eine stabile Energieversorgung zu gewährleisten, ist es entscheidend, die Wartung von Windanlagen effizient zu gestalten und Ausfälle zu minimieren. Eine datengesteuerte Analyse der Windanlagen ermöglicht die prädiktive Planung und Durchführung von Wartungsmaßnahmen.

Use Cases

- 1** Standortmodellierung
- 2** Digital Twin und prädiktive Wartung



| | CO ₂ -Effekt | EBIT-Effekt |
|------|--|----------------------------------|
| 2023 | 0,8 % 1,9 MT CO ₂ | 2,5 % 536,6 Mio. EUR |
| 2030 | 4,2 % 5,1 MT CO ₂ | 4,7 % 1.253,0 Mio. EUR |

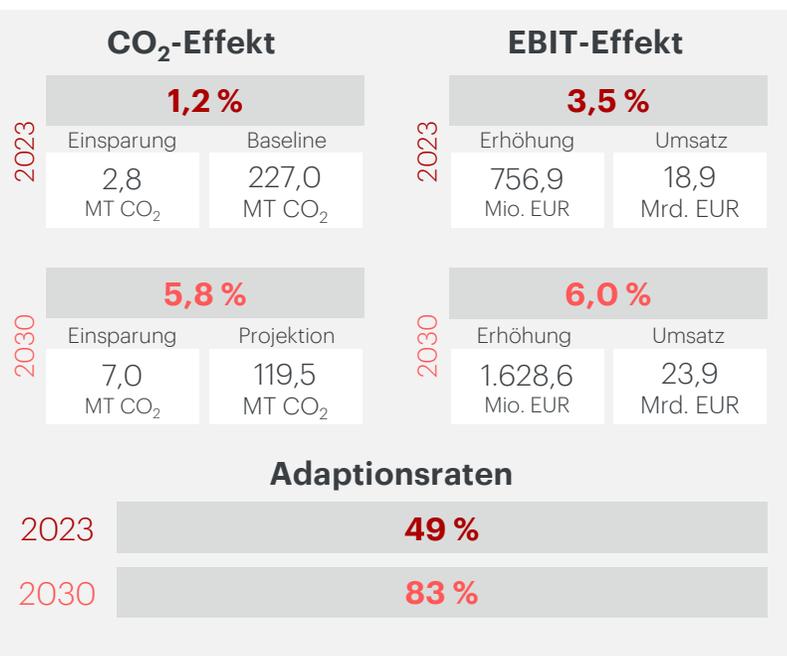
Anmerkung: Die digitalen Technologien der Use Cases im Subsektor bauen teilweise aufeinander auf, weshalb die CO₂- und EBIT-Effekte gemittelt werden.
 Quellen: 1) Fraunhofer ISE, 2024; 2) BMWK, 2023c; 3) UBA, 2023l; 4) Destatis, 2021d.



1 2 Use Case: Standortmodellierung

Kurzbeschreibung

Die Standortmodellierung zur Verbesserung des Energieertrags setzt auf digitale Technologien, um durch eine eingehende Standortanalyse die Windmuster und -eigenschaften an einem spezifischen Standort präzise zu bewerten. Dies ermöglicht eine exakte Ausrichtung und Platzierung von Windanlagen zur Maximierung des Energieertrags und steigert die Effizienz und Leistungsfähigkeit dieser Anlagen.



Verwendete digitale Technologien

Standortmodelle: Auf der Grundlage einer Vielzahl von Datenpunkten, z.B. Windgeschwindigkeit, natürliche Begrenzungen, Entfernung zu Landeigenschaften, wird eine Analyse der Eignung des Standorts durchgeführt.¹

Internet der Dinge Sensoren: Werden an Windanlagen angebracht werden, um kontinuierlich Daten, unter anderem zur Leistungsausgabe, Windrichtung und Wettersituation, zu sammeln.²

Künstliche Intelligenz (KI) und Maschinelles Lernen (ML): Die Erhöhung der Leistung von Windanlagen durch Windrichtungsnachführung und Rotorblattwinklereinstellung kann durch eine eingehende Analyse von Wetterdaten erreicht werden.³ Zusätzlich besteht die Möglichkeit einer datenbasierten Neuausrichtung einzelner Turbinen, um die Strömung im gesamten Windpark zu optimieren.⁴ Durch KI und ML können diese Analysen effektiv umgesetzt werden, um Optimierungen an Wind-anlageneinstellungen zu identifizieren.³

Automatisierte Steuerungssysteme: Auf Basis der Erkenntnisse aus den Wetterdatenanalysen können automatische Anpassungen an den Windanlagen durchgeführt werden, um die Effizienzsteigerung zu ermöglichen.³



Anmerkung: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren.
 Quellen: 1) Wimhurst et al., 2023; 2) Li et al., 2023; 3) WindEurope, 2021; 4) Chandler, 2022.



1 **2 Use Case: Digital Twin und prädiktive Wartung**

Kurzbeschreibung

In diesem Anwendungsfall wird ein virtuelles Abbild der Windkraftanlagen (Digital Twin) erstellt. Durch den Einsatz von vorausschauenden Analysen werden Echtzeitdaten erfasst, Muster analysiert und Anlagenausfälle vorhergesagt (prädiktive Wartung). Diese Herangehensweise ermöglicht eine proaktive Wartung und optimiert die Windenergieerzeugung. In der Folge werden die betriebliche Effizienz gesteigert, Ausfallzeiten minimiert und Kosten reduziert.

Verwendete digitale Technologien

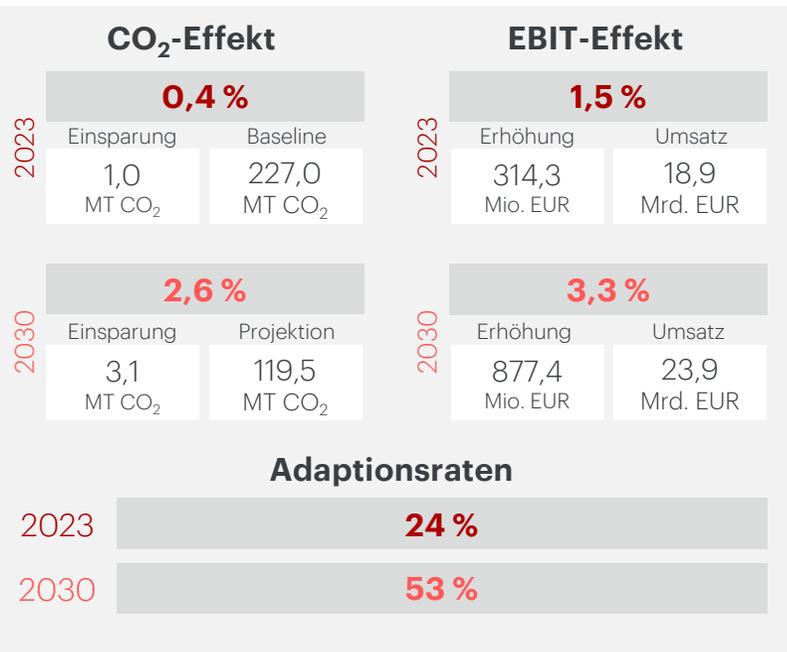
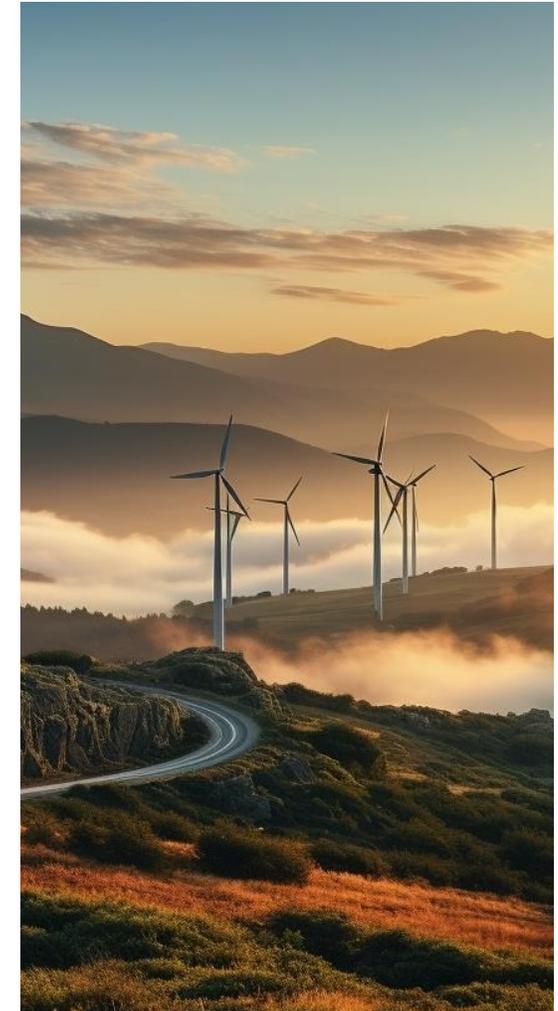
Zustandsüberwachung und prädiktive Wartung: Vibrationsensoren und Akustikmonitore (z.B. zur Erkennung von Getriebschäden durch ungewöhnliche Schwingungsmuster) werden verwendet, um Verschleiß vorherzusagen und Wartungsarbeiten rechtzeitig zu planen.

Internet der Dinge (IoT) und Fernüberwachung: Verbinden Sensoren und Aktuatoren an der Windkraftanlage mit zentralen Steuersystemen, um Betriebsdaten in Echtzeit zu übermitteln.

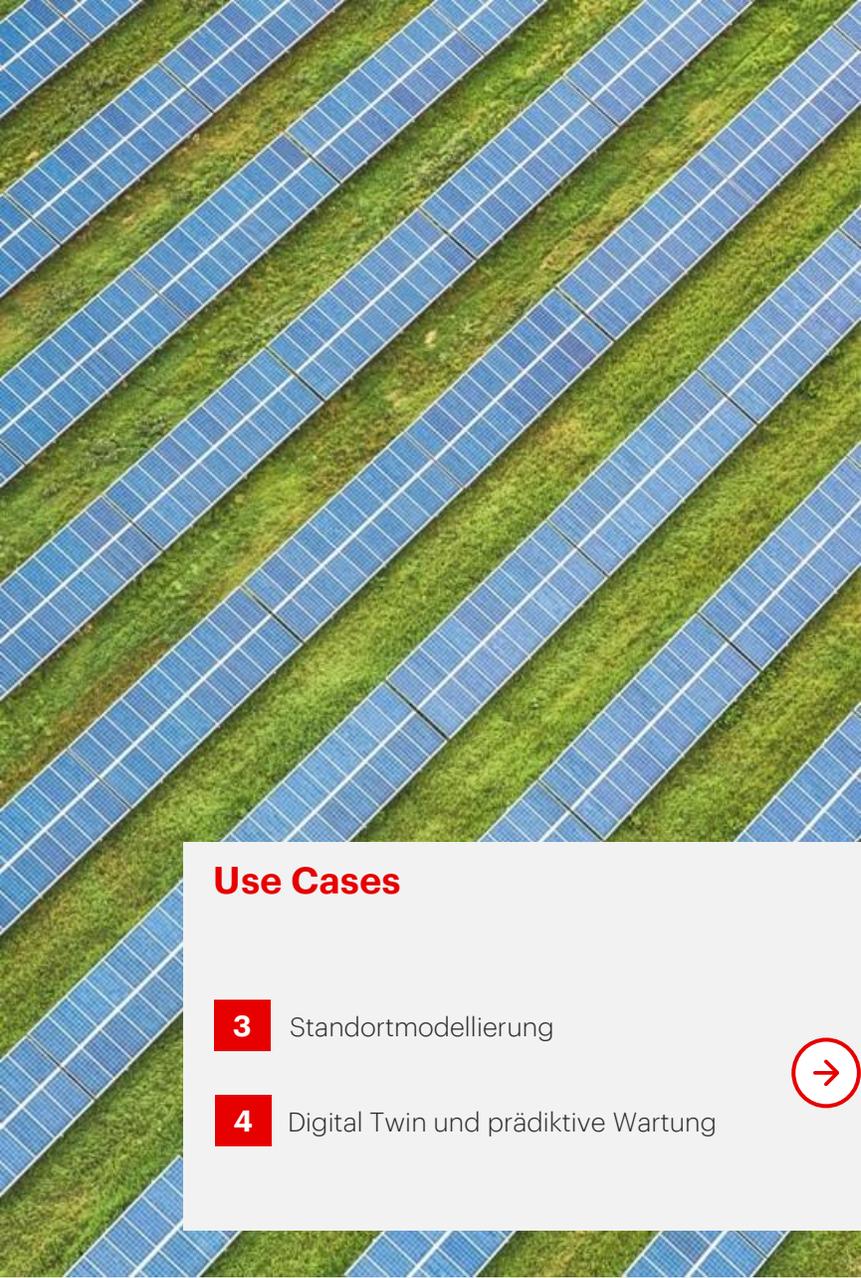
Simulation und Modellierung: Physikalische und mathematische Modelle werden genutzt, um das Verhalten der Windkraftanlage unter verschiedenen Windbedingungen vorherzusagen und die Blattverstellung für optimale Leistung zu steuern.

Datenanalyse und Maschinelles Lernen (ML): Algorithmen werden zur Mustererkennung eingesetzt (z.B. zur Vorhersage von Ausfällen, basierend auf historischen Betriebsdaten), um Leistungseinbußen zu identifizieren und Wartungseinsätze zu optimieren.¹

3D-Visualisierung: Virtuelle Modelle der Anlagenkomponenten (z.B. für Trainingszwecke von Wartungspersonal) werden erstellt, um Zugangspunkte für Reparaturen zu identifizieren und Wartungsprozesse zu simulieren.



Anmerkung: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren.
Quelle: 1) Udo & Muhammad, 2021.



II. Solarenergie

Digitale Optimierung in Aufbau, Betrieb und Wartung von Anlagen

Beschreibung des Subsektors

Im Jahr 2022 beschäftigte die deutsche Photovoltaikbranche rund 55.000 Personen und erwirtschaftete einen Umsatz von etwa 12 Mrd. EUR mit der Installation, Wartung und Herstellung von Solarzellen.¹ Angesichts der Vorgaben des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG 2023) plant das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, die jährlich installierte Leistung innerhalb weniger Jahre von 7,4 Gigawatt (GW) im Jahr 2022 auf 22 GW im Jahr 2026 zu verdreifachen.² Die Gesamtinstallationskapazität soll von 67 GW² im Jahr 2022 auf 202 GW³ im Jahr 2030 steigen, was einem Anteil von 57%³ an der Gesamtleistung der erneuerbaren Energien entspräche.

Herausforderungen und Digitalisierungsfelder

Um die ambitionierten Ausbauziele der Bundesregierung trotz des Fachkräftemangels und des straffen Zeitplans nicht zu gefährden, ist es entscheidend, die Effizienz und damit den Energieertrag von Photovoltaikmodulen zu steigern. Eine solche Effizienzsteigerung ermöglicht es, die Kosten der Solarmodule bei gleichbleibender Leistung zu reduzieren.

Ein Beispiel hierfür ist die Standortmodellierung, die im Rahmen der Planungsprozesse von Photovoltaikanlagen eingesetzt werden kann, um die optimale Ausrichtung und den Standort der Solarmodule zu ermitteln.

Eine bedeutende Herausforderung der Energiewende liegt in den natürlichen Schwankungen der erneuerbaren Energien. Um ein stabiles Netz zu gewährleisten, ist es unerlässlich, Angebot und Bedarf intelligent zu steuern und vorherzusagen. Daher ist es von essenzieller Bedeutung, Wartungsarbeiten durch vorausschauende Analysen zu minimieren oder sogar vorherzusagen. Dies führt auch zu geringeren Betriebskosten.

Use Cases

- 3** Standortmodellierung
- 4** Digital Twin und prädiktive Wartung



| | CO ₂ -Effekt | EBIT-Effekt |
|------|---------------------------------------|-------------------------------|
| 2023 | 0,7% 1,7 MT CO ₂ | 1,9% 163,1 Mio. EUR |
| 2030 | 3,4% 4,0 MT CO ₂ | 4,2% 609,3 Mio. EUR |

Anmerkung: Die digitalen Technologien der Use Cases im Subsektor bauen teilweise aufeinander auf, weshalb die CO₂- und EBIT-Effekte gemittelt werden.
 Quellen: 1) BSW Solar, 2023; 2) BMWK, 2023e; 3) UBA, 2023!



3 4 Use Case: Standortmodellierung

Kurzbeschreibung

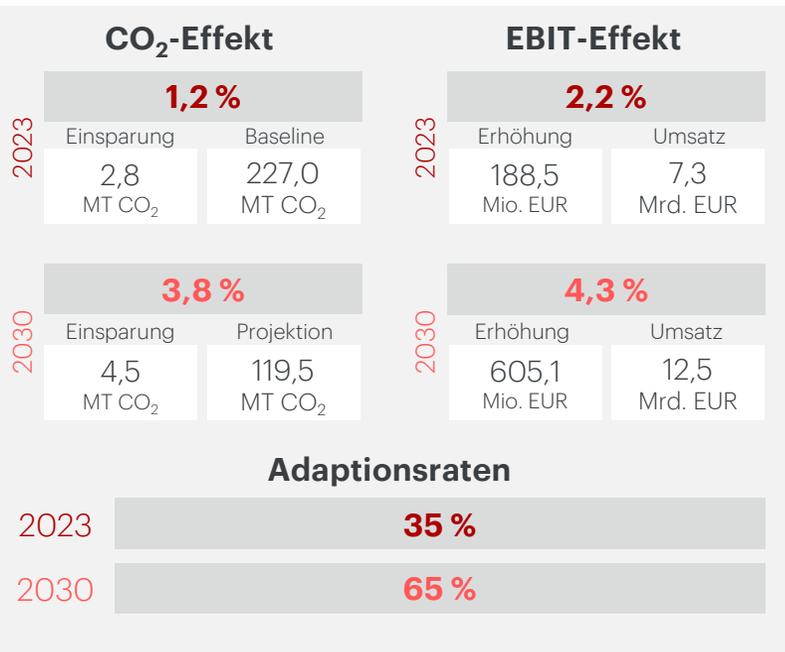
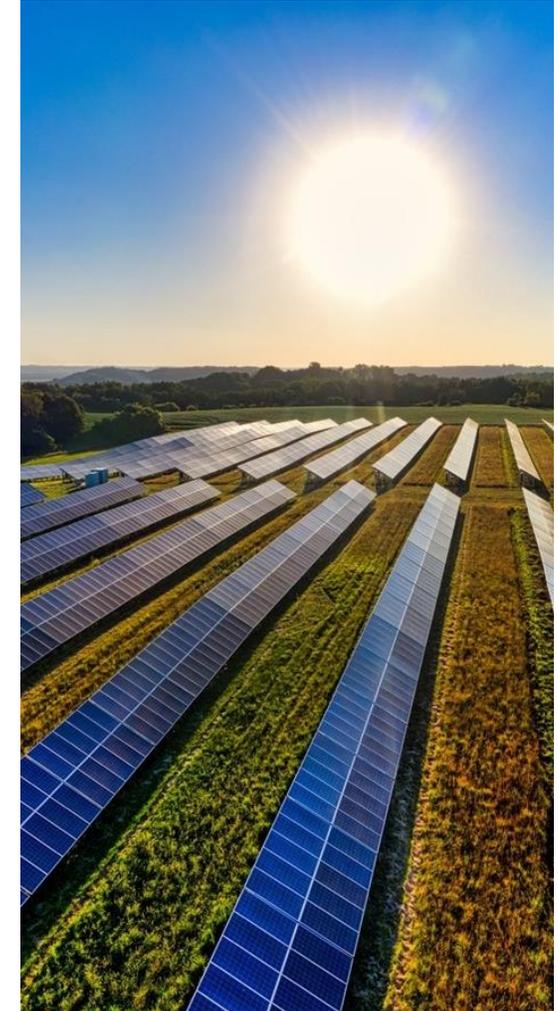
Die Standortmodellierung analysiert die Solarenergieverfügbarkeit an potenziellen Standorten. Mit Hilfe von fortschrittlicher Modellierungssoftware und Datenanalyse werden Solarmodule präzise platziert und ausgerichtet. Dies ermöglicht Entscheidungsträgern, den Energieertrag zu maximieren und die Umweltbelastung zu minimieren.

Verwendete digitale Technologien

3D-Standortmodellierung: Eine optimale Positionierung von Solaranlagen an Orten mit verstärkter Sonneneinstrahlung trägt wesentlich zur Steigerung ihrer Effizienz bei. Satelliten- und Drohnenbildgebung können dabei erste Anhaltspunkte zur Sonneneinstrahlung eines Standorts liefern.

Geodatenmanagement: Darüber hinaus können Daten aus geografischen Informationssystemen (GIS) dazu beitragen, den geeigneten Standort für Solaranlagen auszuwählen.¹

Datenanalyse: Die Auswertung von Wetterdaten, die von Fotosensoren erfasst wurden, ermöglicht eine präzise Ausrichtung von Solaranlagen in Richtung der Sonne, was als Solarnachführungssystem bezeichnet wird.²



Anmerkung: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren.
 Quellen: 1) Heo et al., 2021; 2) Kuttybay et al., 2020.



3 **4 Use Case: Digital Twin und prädiktive Wartung**

Kurzbeschreibung

In diesem Anwendungsfall wird ein virtuelles Abbild der Solaranlagen (Digital Twin) erstellt und durch die Anwendung von vorausschauenden Analysen erfolgt eine optimierte Solarenergieerzeugung sowie frühzeitige Wartung (prädiktive Wartung). Hierbei werden Echtzeitdaten erfasst und analysiert, um Prozesse zu optimieren und Anlagenausfälle proaktiv vorherzusagen. In der Folge werden die betriebliche Effizienz gesteigert, Ausfallzeiten minimiert und Kosten reduziert.

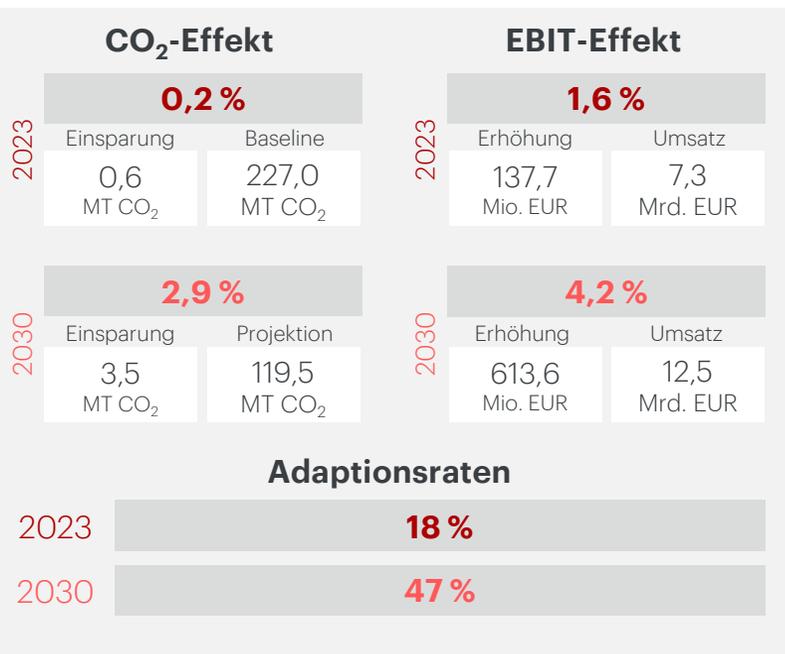
Verwendete digitale Technologien

Internet der Dinge (IoT) und Fernüberwachung: Nutzen IoT-Geräte zur Überwachung der Leistungsdaten der Photovoltaikmodule (wie Spannung und Stromstärke), um die Gesamteffizienz der Anlage zu überwachen und anzupassen.¹

Zustandsüberwachung und prädiktive Wartung: Setzen Thermografie und Elektrolumineszenz-Imaging ein (z.B. zur Entdeckung von Hot-Spots auf Photovoltaikmodulen), um die Effizienz der Energieumwandlung zu überwachen und Wartungsbedarf frühzeitig zu erkennen.

Datenanalyse und Maschinelles Lernen (ML): Verwenden Algorithmen zur Mustererkennung (z.B. zur Analyse von Leistungsschwankungen aufgrund von Verschmutzungen), um Reinigungs- und Wartungsintervalle zu optimieren.²

Integration erneuerbarer Energien: Kombiniert Betriebsdaten der Solaranlage mit Informationen aus dem Energiemanagementsystem, um die Speicherung oder Einspeisung von Solarstrom zu steuern.



Anmerkung: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren.
 Quellen: 1) Sutaria, 2023; 2) Mohammad & Mahjabeen, 2023.



III. Stromnetz

Funktionalität und digitale Wartung

Beschreibung des Subsektors

Deutschlands Stromnetz erstreckt sich über eine Länge von 1,7 Mio. Kilometern und besteht aus einem über-regionalen Übertragungsnetz sowie regionalen Verteilnetzen, die Haushalte und Unternehmen miteinander verbinden.¹ Im Jahr 2022 wurde eine Gesamtstromerzeugung von 509 Mrd. Kilowattstunden (kWh) verzeichnet, wobei Kohlekraftwerke einen Anteil von 33,3% hatten.² Der verstärkte Einsatz von Kohlestrom infolge des Ukrainekriegs führte 2022 zu einem Anstieg der Emissionen pro kWh auf 434 Gramm CO₂.³ Mit insgesamt 865 Stromnetzbetreibern⁴ nimmt Deutschland eine zentrale Rolle im europäischen Verbundsystem ein.⁵

Herausforderungen und Digitalisierungsfelder

Im Jahr 2023 wurden die letzten Kernkraftwerke in Deutschland abgeschaltet, die Kohlekraftwerke sollen bis spätestens 2038 stillgelegt werden. Um die sichere Stromversorgung mittels erneuerbarer Energien zu gewährleisten, ist ein rascher Ausbau des Übertragungsnetzes notwendig. Denn die geografische Entfernung zwischen Stromerzeugung und -verbrauch ist beträchtlich und das bestehende Netz stößt bereits jetzt an seine Kapazitätsgrenzen.⁶

Die alternde Infrastruktur des Stromnetzes stellt eine bedeutende Herausforderung dar, da sie anfällig für Störungen ist. Zur Bewältigung dieses Problems spielen digitale Technologien wie prädiktive Wartung und digitale Fehlererkennung eine entscheidende Rolle. Diese Technologien ermöglichen eine kontinuierliche Überwachung des Netzwerks und das frühzeitige Erkennen potenzieller Probleme.

Use Case

5 Digital Twin inklusive digitaler Fehlererkennung und prädiktiver Wartung



| | CO ₂ -Effekt | EBIT-Effekt |
|------|--|--------------------------------|
| 2023 | 3,4 % 7,9 MT CO ₂ | 1,6 % 421,4 Mio. EUR |
| 2030 | 4,4 % 5,2 MT CO ₂ | 2,3 % 691,4 Mio. EUR |



5 Use Case: Digital Twin inklusive digitaler Fehlererkennung und prädiktiver Wartung

Kurzbeschreibung

Die Implementierung digitaler Technologien wie eines Digital Twin des Stromnetzes, digitaler Fehlererkennung und prädiktiver Wartung optimiert die Effizienz des Stromnetzes. Vor dem Hintergrund der wachsenden Bedeutung erneuerbarer Energien zielt dieser Anwendungsfall darauf ab, Stromverluste zu reduzieren, ohne die für nachhaltige Energiequellen notwendige Netzflexibilität zu beeinträchtigen.

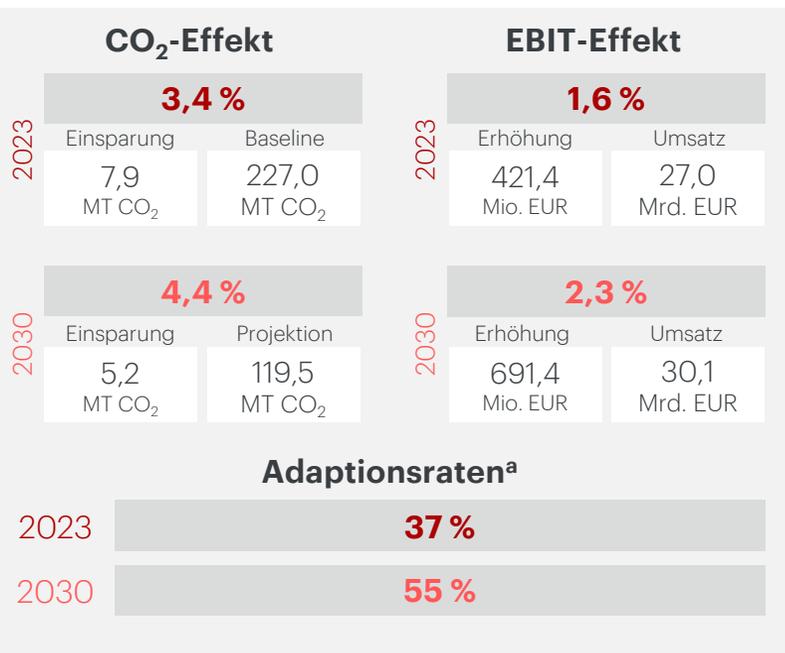
Verwendete digitale Technologien

Intelligente Geräte: Intelligente Zähler im Stromnetz ermöglichen die Echtzeitmessung und Fernablesung des Energieverbrauchs. Gleichzeitig können IoT-Geräte und Steuergeräte zur Kontrolle dezentraler Energiequellen eingesetzt werden.¹

Datenanalyse und Künstliche Intelligenz (KI) : Datenanalysen und KI ermöglichen wichtige Anwendungsfälle wie Netzstatusschätzungen, Szenarioanalysen und prädiktive Wartung. In Anbetracht der zunehmenden Komplexität von Netzplanung, -betrieb und -instandhaltung gewinnen diese digitalen Technologien an Bedeutung, um effizientere Prozesse zu fördern.²

Plattformen/Datenbanken: IoT-Plattformen ermöglichen die Verwaltung und Analyse von Daten aus vernetzten Geräten und die reibungslose Datenübertragung zwischen verschiedenen Plattformen und Komponenten im Stromnetz.³

Visualisierungssoftware: Zur Visualisierung komplexer Netzstrukturen, Identifikation von Fehlern und Optimierung des Netzbetriebs kommen Visualisierungstools und digitale 3D-Modelle zum Einsatz.⁴



Anmerkungen: Abweichungen in den Divisionen können aus Rundungen resultieren. a) In der Befragung wurden Adaptionenraten, CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerungen präzise für die Sub-Use-Cases (i) Digital Twin des Stromnetzes, (ii) digitale Fehlererkennung im Stromnetz und (iii) prädiktive Wartung im Stromnetz unterschieden und hier konsolidiert.

Quellen: 1) Bundesnetzagentur, 2023a; 2) Dena, 2023b; 3) Sieverding & Schneidewindt, 2016; 4) ZfK, 2021.



3 Ausblick und Empfehlungen

Ausblick und Empfehlungen

Das Handeln zentraler Akteure ist gefragt

Die Studie belegt, dass die Nutzung digitaler Technologien mit großen Dekarbonisierungs- und Profitabilitätseffekten einhergeht. Zugleich zeigt sie, dass sich in der deutschen Wirtschaft eine Digitalisierungslücke gegenüber globalen Benchmarks^a auf tun wird. Doch welche Akteure können die Digitalisierung beschleunigen und welche Hebel helfen, die Use Cases rascher in die Breite zu bringen?

Politik – Die Politik kann durch einen auf die Sektoren zugeschnittenen Instrumentenmix zwar eine große Lenkungswirkung entfalten. Wichtiger ist jedoch, dass sie die teils sehr spezifischen Hürden für die Digitalisierung zu überwinden hilft. Dazu gehören Projekte zum Aufbau souveräner Datenökosysteme wie GAIA-X, die den freiwilligen Datenaustausch zwischen Unternehmen und die Entwicklung neuer digitaler Geschäftsmodelle fördern.

Kapitalgeber – Investoren, Banken und weiteren Kreditgebern helfen die Studienergebnisse beim Ausbau ihrer finanziellen und

ESG-bezogenen Risikoanalysen. Sie zeigen, dass die Digitalisierung positiv auf den EBIT und auf die Dekarbonisierung der Wirtschaft wirkt. Letzteres müssen sie in ihrer kapitallenkenden Rolle im Rahmen der EU-Sustainable-Finance-Strategie beachten.

Branchenverbände – Sie sollten ihre Rolle als Wissensvermittler für ihre Mitgliedsunternehmen noch stärker auf die Beschleunigung der Digitalisierung und der Twin Transformation ausrichten. Als Bindeglied zwischen nationalen und branchenspezifischen Projekten und Datenplattformen können sie Konflikte moderieren und so den Erfolg steuern. Außerdem sollten sie dem weiter wachsenden Wissens- und Schulungsbedarf in den Unternehmen, vor allem in den KMU, mit Lösungen begegnen.

Technologieanbieter – Sie können mit standardisierten Digitalisierungslösungen vor allem bei KMU die Skalierung ermöglichen. Zugleich besteht hier auch eine große

Chance, mit innovativen, paketierte und einfach anwendbaren Lösungen die Digitalisierung in der Breite der Wirtschaft voranzubringen und die Basis für weitere datengetriebene Geschäftsmodelle zu legen.

Unternehmen – Sie sollten sich bei ihrer Digitalisierung stärker an den Use Cases ausrichten, die ihr Geschäftsmodell fördern. Damit können sie das wechselseitige Verständnis zwischen IT und Geschäftsentwicklung stärken und gegenüber Technologieanbietern einen größeren Nachfrage- druck erzeugen. Darüber hinaus werden die Vertiefung der Kollaboration mit anderen Akteuren wie etwa technologie- und datengetriebenen Start-ups, der Ausbau innovativer digitaler B2B-Plattformen sowie der von Verbänden initiierte Austausch in der Branche eine wichtige Rolle spielen, um gegenüber globalen Technologieführern aufzuholen, die Dekarbonisierung zu bewältigen und langfristig profitabel zu wirtschaften.

Anmerkung: a) Siehe auch Definition, S.13.

4 Beteiligte Institute und Projektteam





Beteiligte Institute

Vodafone Institut für Gesellschaft und Kommunikation

Das Vodafone Institut für Gesellschaft und Kommunikation ist Vodafones europäischer Think Tank. In Zusammenarbeit mit Instituten, Universitäten und Organisationen entstehen innovative Visionen für eine digitale und nachhaltigere Zukunft. Klare Handlungsempfehlungen für die Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft sollen nicht nur zum Nachdenken, sondern auch zum Handeln anregen.

Insbesondere bei der Bewältigung der Herausforderungen des Klimawandels spielen digitale Technologien und Innovationen eine immer wichtigere Rolle. Das Vodafone Institut fördert wissenschaftliche Forschung zu diesem Thema und veröffentlicht neueste Erkenntnisse in umfangreichen Studien sowie Strategie- und Forschungspapieren.

Damit bieten die Inhalte Anstoß zu einer breiteren Debatte auf politischer, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Ebene und sollen den Austausch zwischen Vordenkern dieser Disziplinen auch im europäischen Kontext fördern.

www.vodafone-institut.de

Accenture

Accenture ist ein weltweit tätiges Beratungsunternehmen, das führende Unternehmen, Regierungen und weitere Organisationen unterstützt. Durch den Aufbau eines digitalen Geschäftskerns, Prozessoptimierung, Beschleunigung des Umsatzwachstums und die Verbesserung öffentlicher Dienstleistungen schaffen wir für unsere Kunden in mehr als 120 Ländern Mehrwert. Technologie steht dabei im Mittelpunkt des Wandels, den wir mit starken Partnerschaften in unserem Ökosystem vorantreiben. Unsere rund 743.000 Mitarbeitenden verfügen über umfassende technologische Kompetenz, insbesondere auf den Gebieten Cloud, Data und Künstliche Intelligenz, sowie über tiefgehende Branchenkenntnis und funktionale Expertise. Damit setzen sie ein breites Spektrum an Dienstleistungen, Lösungen und Ressourcen in den Bereichen „Strategy & Consulting“, „Technology“, „Operations“, „Industry X“ sowie „Song“ um. Unser Erfolg misst sich dabei am Mehrwert für Kunden, Mitarbeitende, Aktionäre, Partner und die Gemeinschaft.

www.accenture.de

Projektteam

Enge und konstruktive Zusammenarbeit

Vodafone Institut für Gesellschaft und Kommunikation



Christina Arens

Leiterin Vodafone Institut für Gesellschaft und Kommunikation



Julia Ebert

Senior Researcherin Vodafone Institut für Gesellschaft und Kommunikation



Stephan Gesing

Programmkoordinator Vodafone Institut für Gesellschaft und Kommunikation



Olena Snidalova

Senior Researcherin Vodafone Institut für Gesellschaft und Kommunikation

Accenture



Balkan Cetinkaya

Principal Director Accenture Strategy & Consulting – Sustainability



Alexander Holst

Leiter Sustainability Practice DACH, Accenture Strategy & Consulting



Lea Schoppe

Consultant Accenture Strategy & Consulting – Sustainability



Jamie Sommer

Consultant Accenture Strategy & Consulting – Sustainability



Jonas Strunk

Consultant Accenture Strategy & Consulting – Sustainability

Fachexpert:innen

- Jürgen Bartz – Gebäudesektor
- Birte Buchwalder – Telekommunikation
- Balkan Cetinkaya – Güterverkehr
- Ria Chopra – IKT-Fußabdruck
- Eike Haas – Landwirtschaft
- Sayali Karekar – IKT-Fußabdruck
- Akshay Kasera – IKT-Fußabdruck
- Yasar Mert – Güterverkehr
- Alisa Orlov – Landwirtschaft
- Frank Rütten – Telekommunikation
- Jonas Schwaben – Energiesektor
- Michal Stachera – Energiesektor
- Tomek Stec – Energiesektor

Erweitertes Team

- Anna-Laura Bonk
- Sabine Braun
- Laura Katryn Caspers
- Katharina Ent
- Maria Fitz
- Johannes Fuxjäger
- Jennifer Juch
- Jette Ohlert
- Magnus Petz
- Karolina Reichert
- Tilman Sauter
- Paula Schulze
- Manuel Simon
- Julia Tomaselli

5 Anhang

| | |
|-----------------------------------|------------|
| 5.1 Methodik | 98 |
| Untersuchungslücke | 99 |
| Untersuchungsgegenstand | 100 |
| Datengrundlage | 101 |
| Berechnungen | 103 |
| Fußabdruck digitaler Technologien | 115 |
| Limitationen und Annahmen | 116 |
| 5.2 Zahlen im Detail | 117 |
| 5.3 Quellenverzeichnis | 123 |

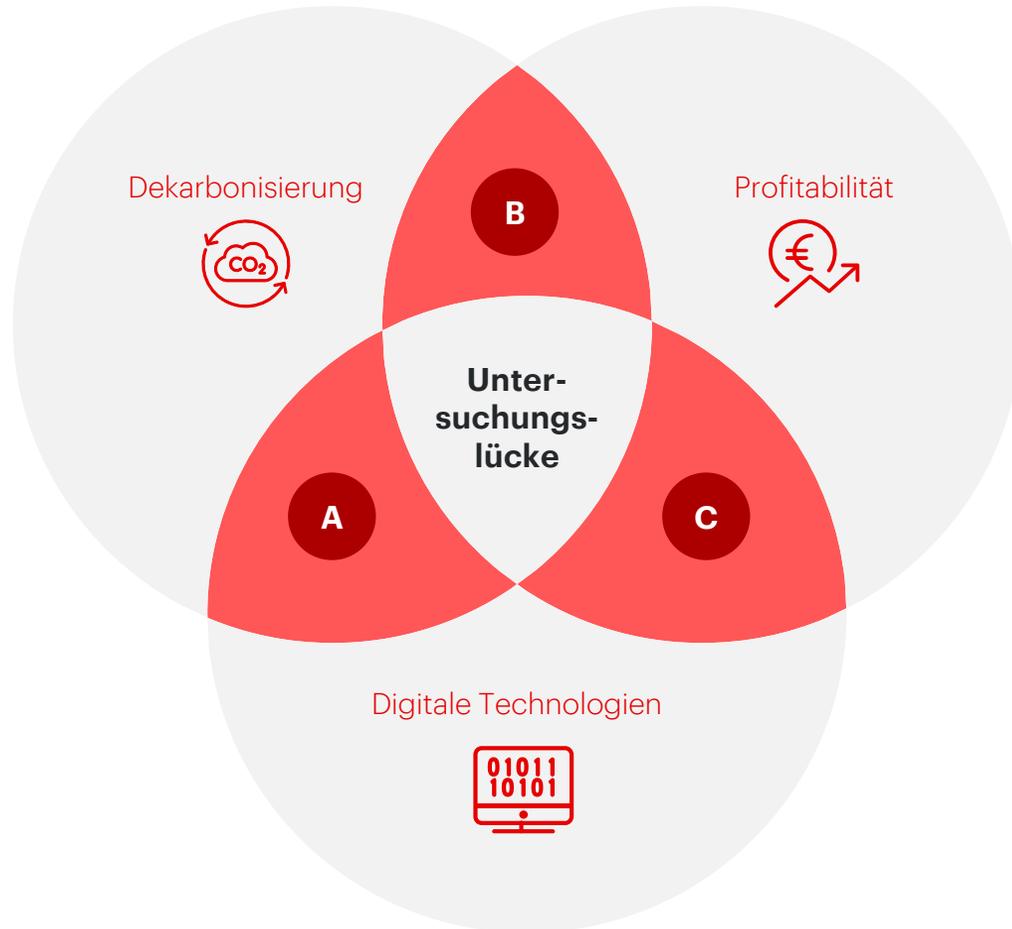


5 Anhang

5.1 Methodik



Untersuchungslücke



Dreiklang als Zielbild – Die enge Verzahnung von Digitalisierung, Dekarbonisierung und Profitabilität stellt eine große Chance für Unternehmen dar. Denn die damit einhergehende Twin Transformation – die Integration der Digitalisierungs- und Dekarbonisierungsstrategien – hilft ihnen, ihre Licence-to-Operate zu sichern, neue Innovations- und Wachstumsfelder zu erschließen und Kosten zu senken. Damit können Unternehmen ihre Wettbewerbsfähigkeit steigern und zugleich ihren CO₂-Fußabdruck reduzieren.

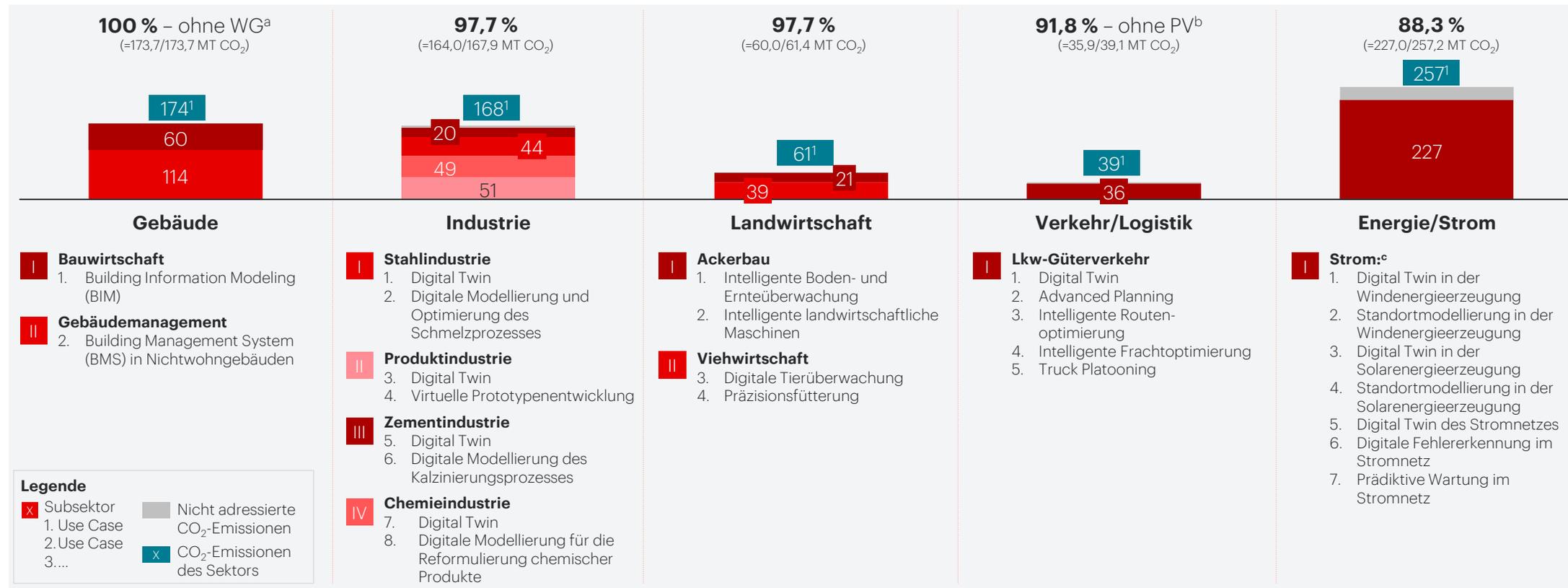
Erkenntnisbedarf – Um datenbasierte Entscheidungen treffen zu können, müssen Unternehmenslenker:innen die Wirkungszusammenhänge zwischen den drei Dimensionen genau verstehen. Bislang allerdings besteht hier neben dem Umsetzungs- noch immer auch ein Erkenntnisproblem, mit dem sich die anwendungsorientierte Wissenschaft beschäftigt.

Untersuchungsfragen – Um geeignete Untersuchungsfragen im Interesse des oben genannten Zielbilds und zur Konkretisierung des Erkenntnisbedarfs zu definieren, haben wir im Zeitraum 1. März 2023 bis 30. April 2023 im Rahmen einer Vorstudie 98 Literaturquellen zu den genannten Themen erfasst und analysiert.

Untersuchungslücke – Obwohl die Schnittmengen von Digitalisierung und Dekarbonisierung oder von Profitabilität und Dekarbonisierung (siehe A, B und C in der Grafik) bereits erforscht werden und sowohl im akademischen Feld als auch in der Wirtschaft auf großes Interesse stoßen, zeigt sich eine Untersuchungslücke hinsichtlich der integrierten Betrachtung dieser Themen. Untersuchungen, die sich gezielt mit dieser Kernschnittmenge befassen, gibt es zwar, doch haben sie nicht die notwendige Qualität und Tiefe, die für die Beantwortung unserer primären Untersuchungsfrage erforderlich wäre. Diese lautet: Wie und in welchem Ausmaß wirken digitale Technologien, in Form von konkreten Anwendungsfällen, auf die CO₂-Emissionen und die Profitabilität der Unternehmen in Deutschland?

Untersuchungsgegenstand – Auswahl der Subsektoren und Use Cases

Adressierte CO₂-Emissionen Deutschlands in 2022 [MT CO₂]



Bei der Auswahl der Sektoren und Use Cases lag der Hauptfokus auf einer effektiven Dekarbonisierung. Die Leitfrage war daher: Welche Sektoren, Subsektoren und Use Cases adressieren den größten Teil der unternehmensbedingten CO₂-Emissionen? Somit wurden Use Cases ausgewählt, die die

emissionsintensivsten Sektoren und Subsektoren in Deutschland adressieren. Die untersuchten 12 Subsektoren mit den insgesamt 26 Use Cases decken 94,5 %^d der von Unternehmen adressierten CO₂-Emissionen Deutschlands ab.

Anmerkungen: a) Ohne CO₂-Emissionen von Wohngebäuden, b) Ohne CO₂-Emissionen des Personenverkehrs; c) Umfasst drei Subsektoren: Windenergieerzeuger, Solarenergieerzeuger, Stromnetzbetreiber; d) 660,5 MT CO₂ von 699,2 MT CO₂.
Quellen: 1) UBA, 2024a; UBA, 2023I.

Datengrundlage – Literaturanalyse, Experteninterviews und Unternehmensbefragung

Wissenschaftliche Publikationen

Zur Triangulation der Primärdaten wurden wissenschaftliche Studien herangezogen, die Status quo, Wachstumsraten und Prognosen zu Adaptionen digitaler Technologien und deren Auswirkungen auf die CO₂-Emissionen und die Profitabilität beleuchten. Zur Analyse der CO₂- und EBIT-Effekte wurden zudem öffentliche Studien und Statistiken (z.B. vom Umweltbundesamt) herangezogen, die makroökonomische Kennzahlen wie CO₂-Emissionen, Umsätze, Ausgaben und Kosten auf Sektorebene beinhalten.

Experteninterviews

Zur Validierung der Befragungs- und Analyseergebnisse wurden Interviews mit Expert:innen geführt. Dabei ging es insbesondere um die realistische Bewertung der Adaptionen digitaler Technologien sowie die Einschätzung der regulatorischen und technologischen Entwicklungen spezifisch für den deutschen Kontext. So wurde beispielsweise die Übertragbarkeit globaler Benchmarks auf Deutschland hinterfragt und ggf. nicht berücksichtigt.

Unternehmensbefragung

Die Befragung diente der Ermittlung der aktuellen Adaptionenrate von Use Cases digitaler Technologien sowie der Erwartungen der Unternehmen hinsichtlich einer weiteren Adaption bis zum Jahr 2030. Zudem wurden Primärdaten zu den Auswirkungen der Use Cases auf Umsatz, Kosten und CO₂-Emissionen der Unternehmen gewonnen. Durchgeführt wurde die telefonische Befragung vom Marktforschungsinstitut Atheneum im Zeitraum 1. Juli 2023 bis 15. September 2023.

Grundgesamtheit – Alle in Deutschland registrierten Unternehmen, die den untersuchten Subsektoren zuzuordnen sind. Dies ermöglichte eine repräsentative Stichprobenziehung und die Subsektor-spezifische Analyse.

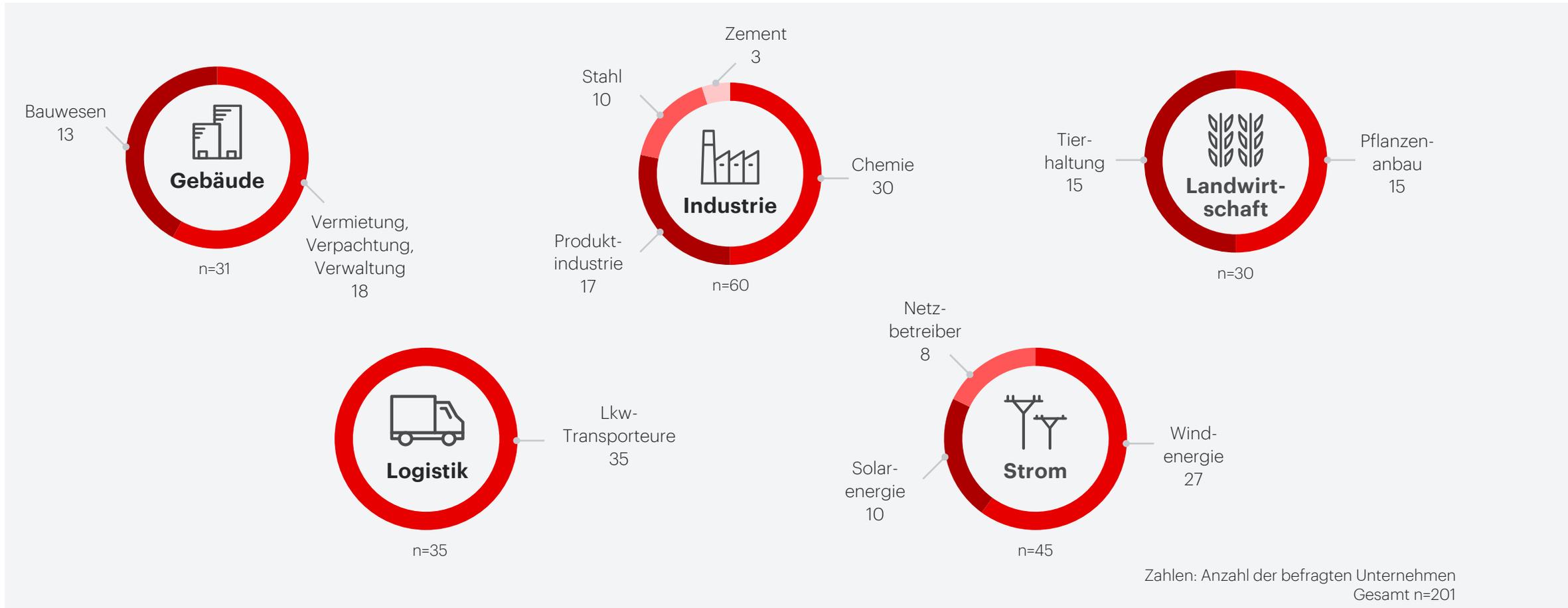
Anzahl der Befragungen – Befragt wurden 201 Unternehmen. Die Stichproben verteilten sich auf die fünf Sektoren wie folgt: Gebäude (n=31), Industrie (n=60), Landwirtschaft (n=30), Logistik (n=35), Strom (n=45). Details dazu siehe nächste Seite.

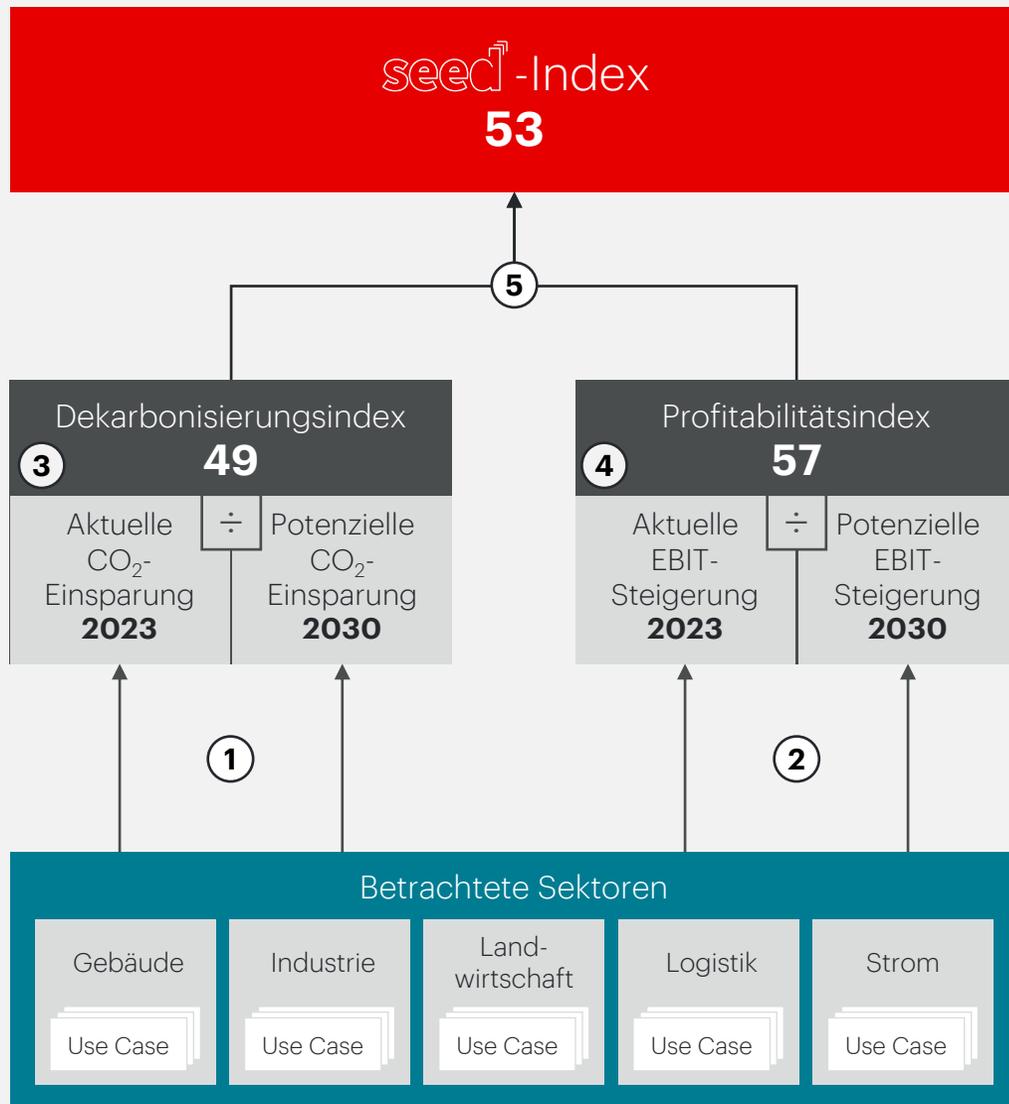
Stichprobe – Die Stichprobe basierte auf einer stratifizierten Zufallsauswahl innerhalb der Subsektoren, wobei sowohl allgemeine Unternehmensmerkmale (z.B. Mitarbeiterzahl, Umsatz) als auch spezifische Kriterien (z.B. Nutztieranzahl, Hektargröße, Flottengröße) berücksichtigt wurden. Eine Mindestanzahl von 30 Unternehmen pro Sektor sorgt für statistische Verlässlichkeit.

Erhebungsmethode – Telefonische Befragungen mit begleitendem Webzugriff ermöglichten den Teilnehmenden die interaktive Eingabe der Antworten, während ein Mitarbeiter für Rückfragen zur Verfügung stand. Die Befragung dauerte durchschnittlich eine Stunde und folgte dieser Struktur.

1. Firmenstrukturdaten
2. Aktuelle und erwartete Adaptionenraten der Use Cases digitaler Technologien
3. Auswirkungen der Use-Case-Adaption auf CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerungen auf Ebene einzelner CO₂- und Kostentreiber

Datengrundlage – Anzahl der Befragungen pro Sektor und Subsektor





Berechnungen – Bausteine

Der SEED-Index wird durch eine Bottom-up-Berechnung erstellt, basierend auf den Use Cases digitaler Technologien.

Auf den folgenden Seiten finden sich zu jedem der folgenden fünf Berechnungsbauusteine detaillierte Beschreibungen (siehe auch Nummerierungen in der Abbildung).

1. Berechnung der CO₂-Einsparung pro Use Case
2. Berechnung der EBIT-Erhöhung pro Use Case
3. Berechnung des Dekarbonisierungsindex pro Sektor und Konsolidierung zu einem Gesamt-Dekarbonisierungsindex
4. Berechnung des Profitabilitätsindex pro Sektor und Konsolidierung zu einem Gesamt-Profitabilitätsindex
5. Berechnung des SEED-Index

Zu Beginn der Beschreibungen findet sich eine tabellarische Übersicht über die verwendeten Berechnungsparameter mit Angaben zu Einheit, Granularität bzw. Bezugsgröße, Datengrundlage und Berechnungsweise.

1

Berechnungen – Parameter zur Berechnung der CO₂-Einsparung pro Use Case (1/2)

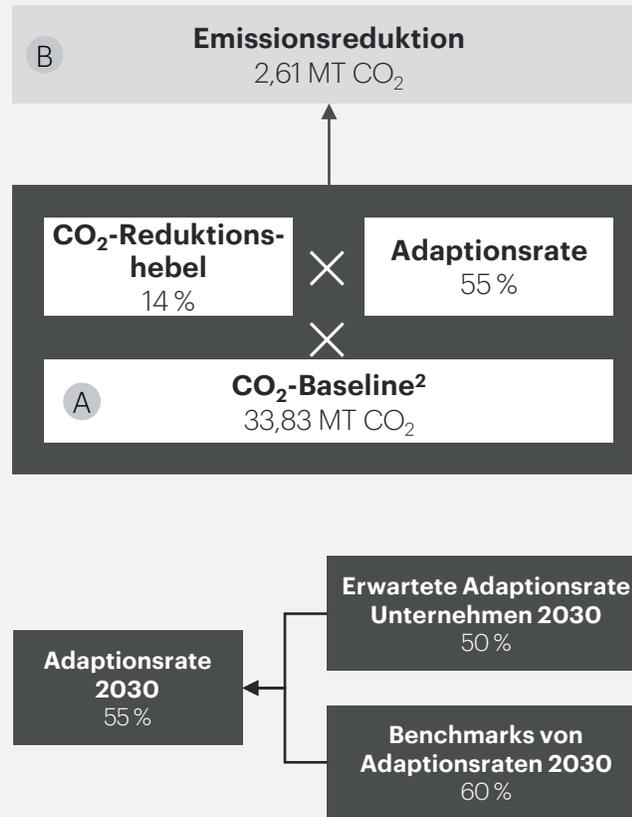
| Abk. | Parameter | Einheit | Granularität / Bezugsgröße | Primärdaten | Sekundärdaten | Expertenmeinung | Berechnung (vereinfacht) |
|-------|--|--------------------|----------------------------|-------------|---------------|-----------------|--------------------------|
| CO%23 | Aktuelle CO ₂ -Einsparung 2023 (CO ₂ -Effekt) | % | Sektorspezifisch | | | | = CO23 / CBI23 |
| CO%30 | Potenzielle CO ₂ -Einsparung 2030 (CO ₂ -Effekt) | % | Sektorspezifisch | | | | = CO30 / CPr30 |
| CO23 | Aktuelle CO ₂ -Einsparung 2023 | MT CO ₂ | Sektorspezifisch, Use Case | | | | = CBI23 x CHb x AR23 |
| CO30 | Potenzielle CO ₂ -Einsparung 2030 | MT CO ₂ | Sektorspezifisch, Use Case | | | | = CPr30 x CHb x AR23 |
| CBI23 | CO ₂ -Baseline 2023 | MT CO ₂ | Sektor, Subsektor | | | x | |
| CPr30 | CO ₂ -Projektion 2030 | MT CO ₂ | Sektor, Subsektor | | | x | |

Berechnungen – Parameter zur Berechnung der CO₂-Einsparung pro Use Case (2/2)

| Abk. | Parameter | Einheit | Granularität / Bezugsgröße | Primär- daten | Sekundär- daten | Experten- meinung | Berechnung (vereinfacht) |
|-------|--|---------|--------------------------------|------------------|--------------------|----------------------|---|
| CHb | CO ₂ -Reduktionshebel | % | Use Case | x | x | x | Gewichtete Mittelwerte |
| AR23 | Adaptionsrate 2023 | % | Use Case, Subsektor, Sektor | x | | | Median oder arithmetischer Mittelwert über alle Befragten |
| AR30 | Adaptionsrate 2030 | % | Use Case, Subsektor, Sektor | | | | = ARU30 / ART30 |
| ARU30 | Adaptionsrate Unternehmen in Deutschland 2030 | % | Use Case | x | | | Median oder arithmetischer Mittelwert über alle Befragten |
| ART30 | Adaptionsrate Benchmarks 2030 | % | Use Case | | x | x | |

1

Schritt 1: Berechnung der Emissionsreduktion in MT CO₂ pro Use Case^b



Berechnungen – CO₂-Reduktion pro Use Case

Schritt 1: Für jeden Use Case wird die Reduktion (B) in Mio. (MT) CO₂ ermittelt, die sich aus dem Einsatz digitaler Technologien ergibt – sowohl für das Jahr 2023 als auch für 2030. Unter Use Case wird der kombinierte Einsatz verschiedener digitaler Technologien verstanden, die ihre Potenziale insbesondere in ihrer Kombination an der konkreten Anwendung im Subsektor entfalten. Die Berechnungslogik für die Jahre 2023 und 2030 ist weitgehend^a identisch und wird anhand der Beispielberechnung erläutert.^b

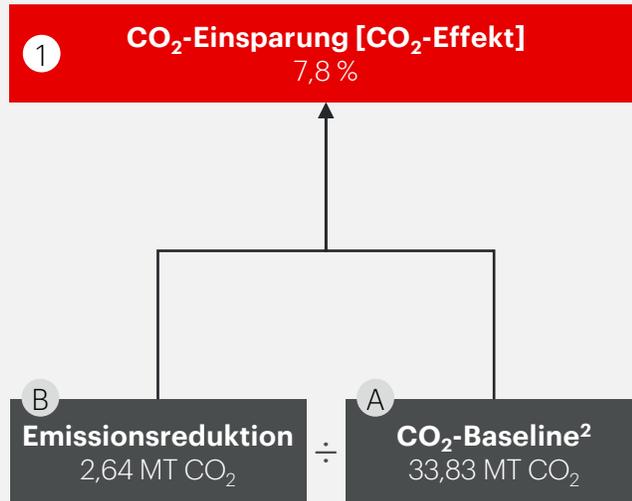
Zur Berechnung der Emissionsreduktion (B) werden folgende Parameter miteinander multipliziert:

- 1. CO₂-Baseline 2023 oder CO₂-Projektion 2030 des (Sub-)Sektors (A)** – CO₂-Emissionen des Sektors oder Subsektors, die durch den Use Case im jeweiligen Jahr adressiert werden können. Beide Werte basieren auf Sekundärdaten.
- 2. CO₂-Reduktionshebel** – Durchschnittlicher Anteil an CO₂-Emissionen, der sich durch den Einsatz digitaler Technologien bzw. deren smart kombinierter Anwendung pro Use Case reduzieren lässt. Beispielsweise braucht es für die teilflächenspezifische Düngung nicht nur eine intelligente Drohne und damit Künstliche Intelligenz und Maschinelles Lernen, sondern ebenso den Zugriff auf granulare Daten zur Bodenbeschaffenheit, die durch Sensoren im Boden bereitgestellt werden.
- 3. Adaptionrate** – Ausmaß der durchschnittlichen Nutzung des Use Case im Subsektor für das betrachtete Jahr. Die für 2023 erwartete Adaptionrate wurde per o.g. Unternehmensbefragung mittels einer Likertskala (5 Stufen von 0 bis 100%) erfragt: 0% keine Implementierung bis 100% volle Implementierung. Die Adaptionrate für 2030 ergibt sich aus zwei Werten: der erwarteten durchschnittlichen Adaptionrate für 2030 aus der Unternehmensbefragung sowie der erwarteten durchschnittlichen Adaptionrate, die sich aus prognostizierten Benchmarks bzw. theoretisch möglichen Implementierungsgraden digitaler Technologien für den konkreten Use Case ergibt. Die Benchmarks stützen sich auf Prognosen, die wiederum auf Sekundärdaten und Experteneinschätzungen basieren. Als Anhaltspunkte dienen (i) weltweit führende Unternehmen oder (ii) Länder mit umfangreicher Implementierung der Use Cases sowie (iii) Wachstumsraten zu technologischen Entwicklungen.

Vereinfacht lässt sich die Multiplikation der drei Parameter wie folgt formulieren: Welche Emissionen kann man mit einem Hebel reduzieren und wie stark wird (2023) bzw. sollte (2030) dieser Hebel von den Unternehmen im jeweiligen Jahr genutzt werden?

Anmerkungen: a) Der Unterschied liegt zum einen in der Ermittlung der Adaptionraten für 2023 und 2030 (siehe Fließtext diese und nächste Seite), zum anderen in der Berechnung der CO₂-Baseline 2023 und CO₂-Projektionen 2030. Bei Ersterem wurde eine Baseline ohne Adaption des Use Case berechnet und als (A) verwendet. Für Letzteres wurden die Daten aus dem UBA-Projektionsbericht (2023) verwendet; b) Exemplarische Berechnung der CO₂-Einsparung für das Jahr 2030 am Beispiel des Use Case „Präzisionsfütterung“ im Sektor Landwirtschaft.

Schritt 2: Berechnung der Emissionsreduktion in Prozent^a pro Use Case



1

Berechnungen – CO₂-Effekt pro Use Case

Schritt 2: Im zweiten Schritt wird die CO₂-Einsparung in Prozent (1) ermittelt. Diese wird in der Studie auch als CO₂-Effekt bezeichnet. Dazu wird die in Schritt 1 ermittelte Emissionsreduktion (B) in MT CO₂ durch die in Schritt 1 ermittelte CO₂-Baseline in MT CO₂ dividiert.

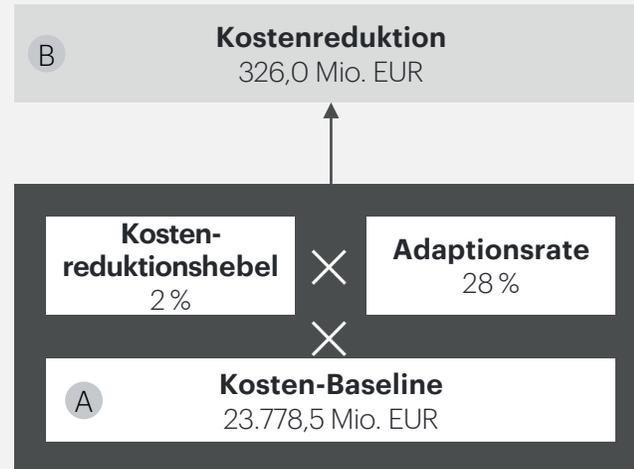
Im Ergebnis gibt die ermittelte Prozentzahl an, welchen Anteil der adressierbaren Emissionen des (Sub-)Sektors durch die Adaption des konkreten Use Case im jeweiligen Jahr eingespart wurde bzw. wird.

Anmerkung: a) Exemplarische Berechnung der CO₂-Einsparung für das Jahr 2030 am Beispiel des Use Case „Präzisionsfütterung“ im Sektor Landwirtschaft.

Berechnungen – Parameter zur Berechnung der EBIT-Erhöhung pro Use Case

| Abk. | Parameter | Einheit | Granularität / Bezugsgröße | Primärdaten | Sekundärdaten | Expertenmeinung | Berechnung (vereinfacht) |
|-------|--|--------------------|----------------------------|-------------|---------------|-----------------|--------------------------------|
| EB%23 | Aktuelle EBIT-Margen-Erhöhung 2023 (EBIT-Effekt) | % | Sektorspezifisch | | | | = EB23 / VE23 |
| EB%30 | Potenz. EBIT-Margen-Erhöhung 2030 (EBIT-Effekt) | % | Sektorspezifisch | | | | = EB30 / VE30 |
| EB23 | Aktuelle EBIT-Erhöhung 2023 | Mio. oder Mrd. EUR | Sektorspezifisch, Use Case | | | | = (VE23 x VEh) – (KBI23 x KOh) |
| EB30 | Potenzielle EBIT-Erhöhung 2030 | Mio. oder Mrd. EUR | Sektorspezifisch, Use Case | | | | = (VE30 x VEh) – (KPr30 x KOh) |
| KBI23 | Kosten-Baseline 2023 | Mrd. EUR | Sektor, Subsektor | | x | | |
| KPr30 | Kosten-Projektion 2030 | Mrd. EUR | Sektor, Subsektor | | x | | |
| VE23 | Verkaufserlöse 2023 | Mrd. EUR | Sektor, Subsektor | | x | | |
| VE30 | Verkaufserlöse 2030 | Mrd. EUR | Sektor, Subsektor | | x | | |
| KOh | Kostensenkungshebel | % | Use Case | x | x | x | Gewichtete Mittelwerte |
| VEh | Verkaufserlössteigerungshebel | % | Use Case | x | x | x | Gewichtete Mittelwerte |

Schritt 1: Berechnung der Kostenreduktion in EUR pro Use Case^a



2

Berechnungen – EBIT-Erhöhung pro Use Case

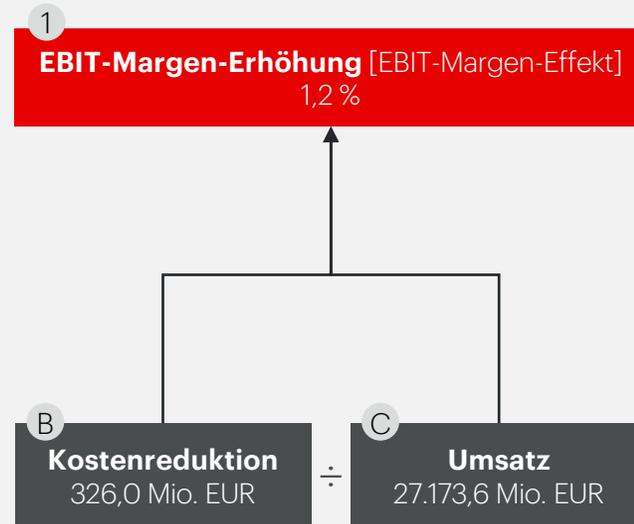
Schritt 1: Für jeden Use Case pro Subsektor wird im ersten Schritt die Kostenreduktion (B) in Mio. oder Mrd. EUR ermittelt, die sich aus dem Einsatz digitaler Technologien ergibt – sowohl für das Jahr 2023 als auch für 2030. Unter Use Case wird der kombinierte Einsatz verschiedener digitaler Technologien verstanden, die ihre Potenziale insbesondere in ihrer Kombination an der konkreten Anwendung im Subsektor entfalten. Die Berechnungslogik für die Jahre 2023 und 2030 ist identisch und wird anhand der Beispielberechnung erläutert.^a

Für die Berechnung der Kostenreduktion (B) werden folgende drei Parameter miteinander multipliziert:

- 1. Kosten-Baseline 2023 oder Kosten-Projektion 2030 des (Sub-)Sektors (A)** – Kosten des Sektors oder Subsektors, die durch den Use Case im jeweiligen Jahr adressiert werden können. Beide Werte basieren auf Sekundärdaten.
- 2. Kostenreduktionshebel** – Durchschnittlicher Prozentsatz an Kosteneinsparungen, der auf den Einsatz digitaler Technologien bzw. deren smart kombinierte Anwendung pro Use Case zurückzuführen ist – dies resultiert aus der positiven Beeinflussung der Kostentreiber, wie zum Beispiel Energieverbrauch oder Personalkosten, durch die genannten Technologien.
- 3. Adaptionsrate** – Ausmaß der durchschnittlichen Nutzung des Use Case im Subsektor für das betrachtete Jahr. Die Berechnung ist unabhängig davon, ob es um die CO₂-Reduktion oder den EBIT-Effekt geht.

Anmerkung: a) Exemplarische Berechnung für das Jahr 2030 am Beispiel des Use Case „Präzisionsfütterung“ im Sektor Landwirtschaft.

Schritt 2: Berechnung der EBIT-Margen-Erhöhung in Prozent pro Use Case^a



2

Berechnungen – EBIT-Effekt pro Use Case

Schritt 2: Im zweiten Schritt wird die EBIT-Margen-Erhöhung in Prozent (1) ermittelt. Diese wird in der Studie auch als EBIT-Margen-Effekt bezeichnet. Dazu wird die in Schritt 1 ermittelte Kostenreduktion (B) in EUR durch den Umsatz des (Sub-)Sektors in EUR (C) dividiert.

Im Ergebnis gibt die ermittelte Prozentzahl an, um wie viele Prozentpunkte die EBIT-Marge des betreffenden (Sub-)Sektors durch die Adaption des Use Case steigt.

Falls der Use Case auch zu einer Steigerung der Umsatzerlöse führt (zum Beispiel im Stromsektor, wo beispielsweise die Standortmodellierung die Stromproduktion pro Windanlage erhöht und die Energieproduktionskosten senkt), wurde die EBIT-Marge ohne Adaption des Use Case berechnet und von der EBIT-Marge mit Adaption des Use Case subtrahiert.

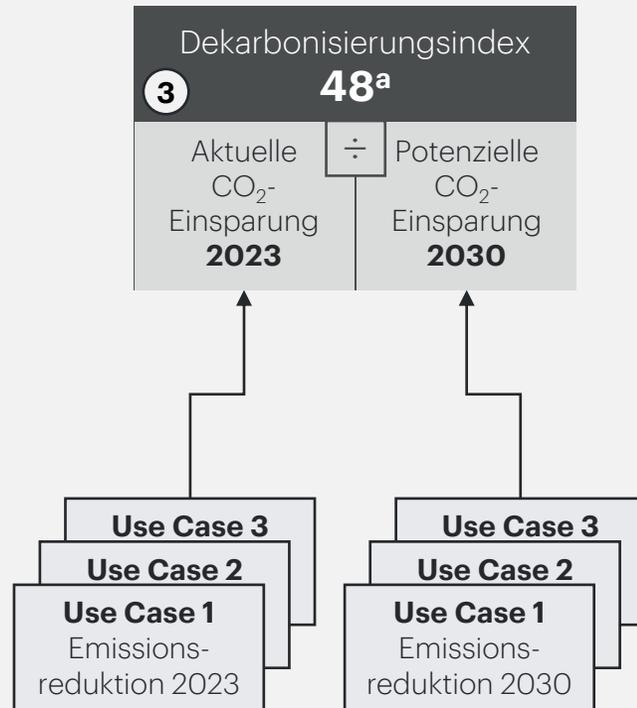
Anmerkung: a) Exemplarische Berechnung für das Jahr 2030 am Beispiel des Use Case „Präzisionsfütterung“ im Sektor Landwirtschaft.

Berechnungen – Parameter zur Berechnung der Indizes

| Abk. | Parameter | Einheit | Granularität / Bezugsgröße | Primär- daten | Sekundär- daten | Experten- meinung | Berechnung (vereinfacht) |
|------|--------------------------------------|---------|-------------------------------|------------------|--------------------|----------------------|---|
| SI | SEED-Index | Keine | Sektorübergreifend | | | | $= (DIg \times PIg) / 2$ |
| DIg | Dekarbonisierungsindex, gewichtet | Keine | Sektorübergreifend | | | | Gewichteter Mittelwert über alle DIs |
| PIg | Profitabilitätsindex, gewichtet | Keine | Sektorübergreifend | | | | Gewichteter Mittelwert über alle PIs |
| DIs | Dekarbonisierungsindex | Keine | Sektorspezifisch | | | | $= CO\%23 / CO\%30$ |
| PIs | Profitabilitätsindex | Keine | Sektorspezifisch | | | | $= EB\%23 / EB\%30$ |

3

Berechnungen – Dekarbonisierungsindex



Der Dekarbonisierungsindex wird zunächst pro Sektor ermittelt, um dann über einen gewichteten Mittelwert zum Gesamt-Dekarbonisierungsindex zu kommen. Hierzu werden folgende Berechnungsschritte durchgeführt:

Schritt 1: Gesamt-CO₂-Einsparungen in Mio. Tonnen (MT) CO₂ pro Sektor

Zunächst werden die unter Berechnungsbaustein 1 pro Use Case ermittelten CO₂-Einsparungen in MT CO₂ für den betrachteten Sektor aufaddiert. Dies erfolgt sowohl für die Einsparungen im Jahr 2023 [CO23] als auch für 2030 [CO30].

Schritt 2: Gesamt-CO₂-Einsparungen in % pro Sektor

Für das Jahr 2023 wird die in Schritt 1 ermittelte Gesamt-CO₂-Einsparung für 2023 in MT CO₂ durch die CO₂-Baseline 2023 [CBI23] des Sektors dividiert. [CO%23]

Für das Jahr 2030 wird die in Schritt 1 ermittelte Gesamt-CO₂-Einsparung für 2030 in MT CO₂ durch die CO₂-Projektion 2030 [CPr30] des Sektors dividiert. [CO%30]

Schritt 3: Berechnung der Dekarbonisierungsindizes pro Sektor

Für jeden Sektor wird die in Schritt 2 für 2023 ermittelte Gesamt-CO₂-Einsparung in % [CO%23] durch die Gesamt-CO₂-Einsparung in % für das Jahr 2030 [CO%30] dividiert.

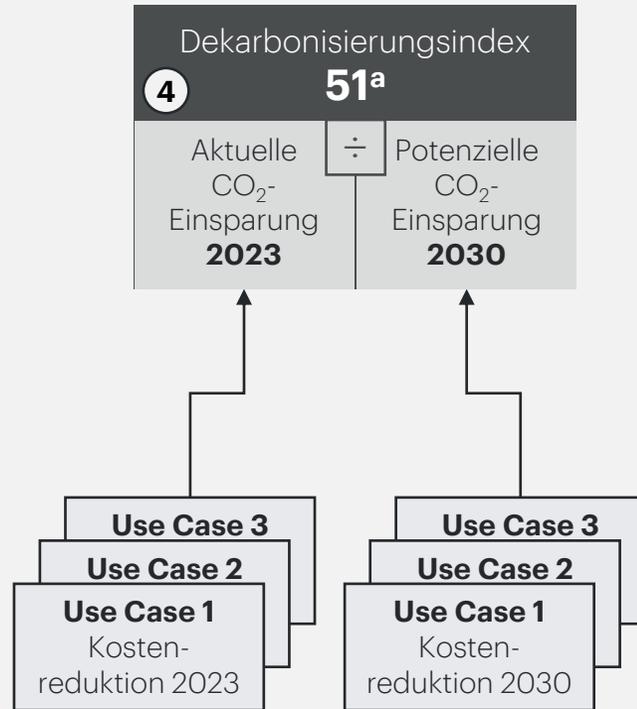
Schritt 4: Berechnung des Gesamt-Dekarbonisierungsindex

Die in Schritt 3 ermittelten Sektor-Dekarbonisierungsindizes werden über einen gewichteten Mittelwert gemäß der CO₂-Emissionsgewichte (siehe Tabelle [S. 114](#)) zu einem Dekarbonisierungsindex für die SEED-Studie zusammengefasst.

Anmerkung: a) Am Beispiel Landwirtschaftssektor.

4

Berechnungen – Profitabilitätsindex



Der Profitabilitätsindex wird zunächst pro Sektor ermittelt, um dann über einen gewichteten Mittelwert zum Gesamt-Profitabilitätsindex zu kommen. Hierzu werden folgende Berechnungsschritte durchgeführt:

Schritt 1: Gesamtkostenreduktion in Mio. EUR pro Sektor

Zunächst werden die unter Berechnungsbaustein 2 pro Use Case ermittelten Kostenreduktionen in Mio. EUR für den betrachteten Sektor aufaddiert. Dies erfolgt sowohl für die Reduktionen im Jahr 2023 als auch für 2030.

Schritt 2: EBIT-Erhözung in % pro Sektor

Für das Jahr 2023 wird die in Schritt 1 ermittelte Gesamtkostenreduktion für 2023 in Mio. EUR durch die Verkaufserlöse 2023 [VE23] des Sektors dividiert.

Für das Jahr 2030 wird die in Schritt 1 ermittelte Gesamtkostenreduktion für 2030 in Mio. EUR durch die projizierten Verkaufserlöse 2030 [VE30] des Sektors dividiert.

Schritt 3: Berechnung der Profitabilitätsindizes pro Sektor

Für jeden Sektor wird die in Schritt 2 für 2023 ermittelte Gesamt-EBIT-Erhözung in % [EB%23] durch die EBIT-Erhözung in % für das Jahr 2030 [EB%30] dividiert.

Schritt 4: Berechnung des Gesamt-Profitabilitätsindex

Die in Schritt 3 ermittelten Sektor-Profitabilitätsindizes werden über einen gewichteten Mittelwert gemäß der Sektor-Umsätze (siehe Tabelle S. 114) zu einem Profitabilitätsindex für die SEED-Studie zusammengefasst.

Anmerkung: a) Am Beispiel Landwirtschaftssektor.

5

Berechnungen – SEED-Index



| Sektor | Gewichtung (CO ₂ -Emissionen) | Sektor | Gewichtung (Umsatz) |
|----------------|--|----------------|---------------------|
| Gebäude | 23,2 % | Gebäude | 5,1 % |
| Industrie | 26,8 % | Industrie | 86,1 % |
| Landwirtschaft | 10,3 % | Landwirtschaft | 2,4 % |
| Logistik | 8,4 % | Logistik | 3,6 % |
| Strom | 31,3 % | Strom | 2,7 % |

Der SEED-Index ist der arithmetische Mittelwert aus dem Gesamt-Dekarbonisierungsindex und dem Gesamt-Profitabilitätsindex. Die verknüpfte gleichgewichtige Betrachtung ökologischer und ökonomischer Effekte drückt sich auch im Namen des Index aus: Sustainable Economic Efficiency through Digitalization (SEED).

Wie bereits bei den Berechnungen zu den Subindizes in Schritt 4 erläutert, ergeben sich sowohl der Gesamt-Dekarbonisierungsindex als auch der Gesamt-Profitabilitätsindex aus einer Gewichtung der Sektoren. Der nachstehenden Gewichtungslogik liegen zwei Kriterien zugrunde: Zum einen ist dies die Abbildung der Gesamtwirtschaft, die anhand der Gewichtungskriterien Sektoremissionen und Sektorumsätze hergestellt wird. Zum anderen ist dies die zeitliche Entwicklung, die mit der Betrachtung der Werte für die Jahre 2023 und 2030 dargestellt wird.

Im Detail erfolgt die Gewichtung wie hier beschrieben:

Gewichtung beim Gesamt-Dekarbonisierungsindex: Die einzelnen Sektor-Dekarbonisierungsindizes werden nach den jeweiligen CO₂-Emissionen des Sektors gewichtet, da diese die Bedeutung darstellen, die der Sektor für die Dekarbonisierung in Deutschland hat. Um die Gewichte pro Sektor zu ermitteln, wird der folgende Quotient gebildet: (1) Mittelwert aus Sektor-CO₂-Emissionen-2023 und Sektor-CO₂-Emissionsprojektionen-2030 geteilt durch (2) Gesamt-CO₂-Emissionsmittelwert über alle Sektoren. Um den Gesamt-Dekarbonisierungsindex zu ermitteln, werden dann die Gewichte und die einzelnen Sektorindizes mit der Methode „gewichteter Mittelwert“ über alle Sektoren aufaddiert.

Gewichtung beim Gesamt-Profitabilitätsindex: Die einzelnen Sektor Profitabilitätsindizes werden nach den jeweiligen Umsatzerlösen des Sektors gewichtet, da diese die Bedeutung darstellen, die der Sektor für die Bruttowertschöpfung in Deutschland hat. Um die Gewichte pro Sektor zu ermitteln, wird der folgende Quotient gebildet: (1) Mittelwert aus Sektor-Umsatz-2023 und Sektor-Umsatz-2030 geteilt durch (2) Gesamt-Umsatz über alle Sektoren. Um den Gesamt-Profitabilitätsindex zu ermitteln, werden dann die Gewichte und die einzelnen Sektorindizes mit der Methode „gewichteter Mittelwert“ über alle Sektoren aufaddiert.

Fußabdruck digitaler Technologien

Mehr CO₂-Einsparung als -Ausstoß

Der Fußabdruck digitaler Technologien resultiert aus den CO₂-Emissionen, die nicht nur während der Nutzung, sondern auch bei der Herstellung von Rechen-, Speicher- und Kommunikationskomponenten sowie Endgeräten entstehen.

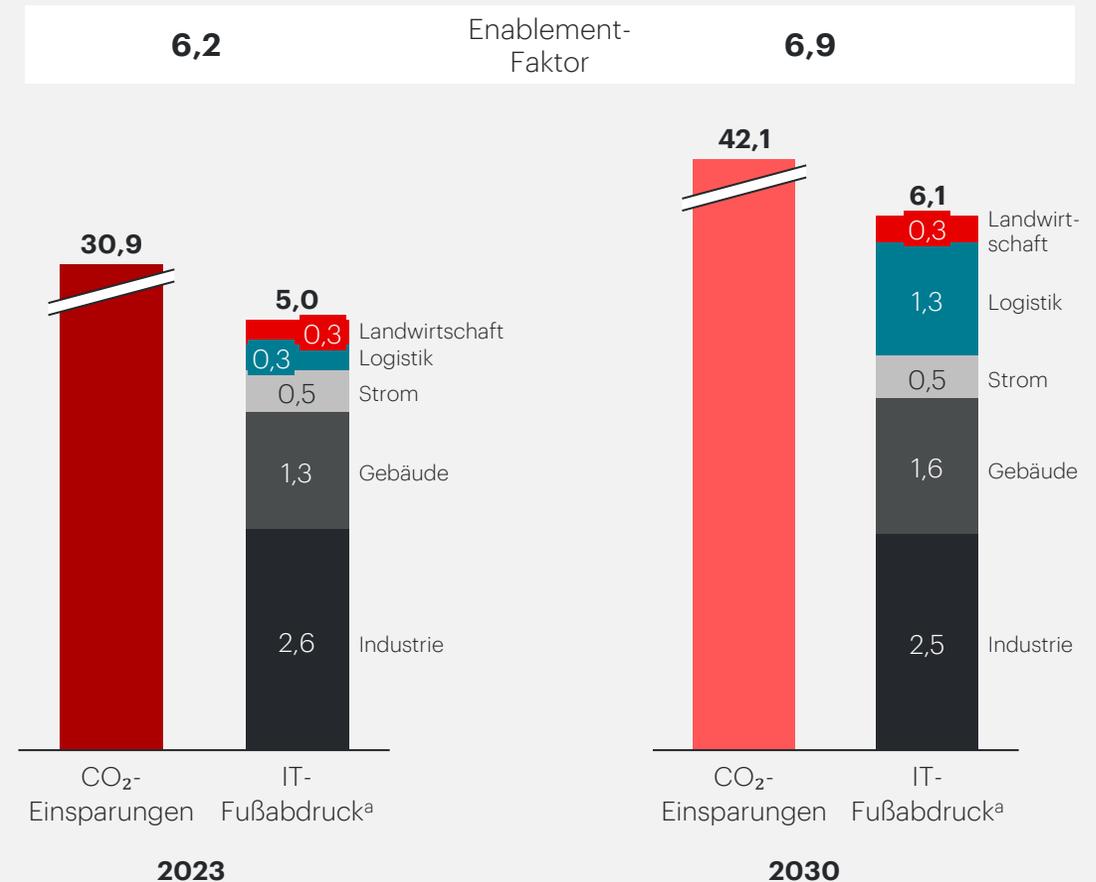
Die Digitalisierung der einzelnen Sektoren zeigt sich auch in deren Fußabdruck: In allen Sektoren ist ein Anstieg des CO₂-Fußabdrucks^a zu beobachten, was auf die zunehmende Digitalisierung in den Sektoren zurückzuführen ist. Der Anstieg ist unterproportional, da mit der Energiewende bis 2030 bessere Stromemissionsfaktoren zu erwarten sind. Der starke Anstieg im Logistiksektor ist primär auf die steigende Güterverkehrsnachfrage zurückzuführen.^b

Der positive Einfluss der digitalen Technologien auf die Dekarbonisierung wird durch die Enablement-Faktoren von 6 bis 7 bestätigt: Für das Jahr 2023 liegt der Faktor bei 6,2. Das heißt, dass die digitalen Technologien durch ihren Hebeleffekt 6,2-mal so viel CO₂ eingespart haben, wie sie durch den Energieverbrauch bei Herstellung und Nutzung verursacht haben. Für 2030 ist mit einem leicht höheren Enablement-Faktor von 6,9 zu rechnen.

Definition

Enablement-Faktor: Der Enablement-Faktor misst das Verhältnis zwischen der induzierten CO₂-Einsparung und dem CO₂-Fußabdruck einer digitalen Technologie.

[Alle Zahlen in den Balken in MT CO₂]



Anmerkungen: a) Es handelt sich hierbei um den CO₂-Fußabdruck der digitalen Technologien in den betrachteten Use Cases; b) Siehe auch Kap. 2.4 Logistik, S. 69.

Limitationen und Annahmen

Die Studie unterliegt folgenden Limitationen und Annahmen

Limitationen

Kein Kausalmodell: Die Autoren der Studie gehen angesichts der vielen Belege davon aus, dass die Implementierung digitaler Technologien immer zu CO₂-Einsparungen und Profitabilitätssteigerungen führt, ohne dass dafür schon ein statistisch signifikantes Kausalmodell existieren würde.

Repräsentativität der Daten: Obwohl die Stichprobe logisch abgeleitet wurde (stratifiziert) und die Zuteilung der Befragten per Zufall (randomisiert) erfolgte, können die Daten – bedingt durch die unterschiedlichen situativen Kontexte der telefonischen Befragung – eine gewisse Verzerrung aufweisen.

Latente Faktoren: Die Studie konzentriert sich auf die Haupteffekte digitaler Technologien – Dekarbonisierung und Profitabilität – und blendet damit weitere mögliche Faktoren für CO₂-Einsparungen und EBIT-Steigerungen wie etwa Veränderungen der Regulatorik oder der Marktdynamik tendenziell aus.

Übertragbarkeit der Ergebnisse: Die Ergebnisse fokussieren sich auf deutsche Unternehmen. Sie sind nicht direkt auf andere Länder oder Regionen – insbesondere außerhalb der EU – übertragbar, da dort andere regulatorische Rahmenbedingungen und Marktbedingungen bestehen.

Annahmen

Verlässlichkeit der Daten: Die Autoren der Studie gehen davon aus, dass die Angaben der Unternehmen aus den Befragungen verlässlich sind und die aktuellen wie die erwarteten CO₂-Einsparungen und Profitabilitätssteigerungen korrekt wiedergeben.

Vergleich mit globalen Benchmarks: Der Vergleich der Adaptionsraten digitaler Technologien bei deutschen Unternehmen mit globalen Benchmarks (Ländern, Sektoren, Technologieführern) setzt voraus, dass diese auch in Deutschland realisierbar wären. Diese Bedingung wurde für jeden Use Case geprüft und gegebenenfalls relativiert, allerdings ohne statistische Validierung. Ein Beispiel ist das Truck Platooning, für das in Deutschland bezüglich des vollautonomen Fahrens eine strengere Regulierung als andernorts erwartet wird.

Technologische Verbesserungen: Die Studie bezieht die Effizienzgewinne der Weiterentwicklung digitaler Technologien nicht mit ein. Damit werden für die Jahre 2023 und 2030 die gleichen Hebelwirkungen digitaler Technologien für die Emissionsminderung wie für die Kostenreduktion bzw. EBIT-Steigerung angenommen.

5 Anhang

5.2 Zahlen im Detail

Zahlen im Detail – Gebäude

| Datenpunkt | Sektor | Building Information Modeling (BIM) | Building Management System (BMS) in Nichtwohngebäuden | |
|------------------------------------|--|-------------------------------------|---|-----------|
| Dekarbonisierung | CO ₂ -Effekt 2022 in % | 4,0 % | 2,8 % | 4,6 % |
| | CO ₂ -Effekt 2030 in % | 7,8 % | 5,1 % | 10,8 % |
| | CO ₂ -Einsparung 2022 in MT CO ₂ /Jahr | 7,2 | 1,7 | 5,5 |
| | CO ₂ -Einsparung 2030 in MT CO ₂ /Jahr | 6,7 | 2,4 | 4,4 |
| | CO ₂ -Reduktionshebel in % ^a | n.a. | 9,7 % | 14,0 % |
| | CO ₂ -Baseline 2022 in MT CO ₂ | 173,6 | 60,1 | 113,5 |
| | CO ₂ -Projektion 2030 in MT CO ₂ | 86,7 | 46,4 | 40,4 |
| Profitabilität | EBIT-Effekt 2022 in % | 1,0 % | 1,0 % | 4,6 % |
| | EBIT-Effekt 2030 in % | 1,9 % | 1,9 % | 10,7 % |
| | EBIT-Erhöhung 2022 in Mio. EUR | 2.919,1 € | 1.130,1 € | 1.789,1 € |
| | EBIT-Erhöhung 2030 in Mio. EUR | 4.859,9 € | 2.371,4 € | 2.488,5 € |
| | Kostenreduktionshebel in % ^{a,b} | n.a. | 3,9 % | 28,2 % |
| | Umsatz 2022 in Mio. EUR | 108.353,7 € | 108.353,7 € | c |
| Umsatz-Projektion 2030 in Mio. EUR | 122.766,0 € | 122.766,0 € | c | |
| Adap- tion | Adaptionsrate 2022 in % | 31,1 % | 29,2 % | 33,0 % |
| | Adaptionsrate 2030 in % | 65,0 % | 52,5 % | 77,5 % |

Dekarbonisierung: Sekundärquellen zur Kalkulation

1. BAFA, 2021
2. BDEW, 2022
3. DBFZ, 2023
4. Dena, 2022
5. PlanRadar, 2021
6. Statista, 2023a
7. UBA, 2021b
8. UBA, 2023c
9. UBA, 2023l
10. UBA, 2023k
11. vbw, 2021

Profitabilität: Sekundärquellen zur Kalkulation

1. BAFA, 2024
2. BVMB, 2021
3. Destatis, 2019b
4. Destatis, 2024d
5. IBISWorld, 2023a
6. PlanRadar, 2021
7. vbw, 2023

Anmerkungen: a) Berechnung basiert auf spezifischen Wirkungshebeln. Angegebene Zahlen repräsentieren gewichtete Durchschnitte der minimalen und maximalen Wirkungshebel; b) Gewichtung der Wirkungshebel basiert auf der Kostenstruktur des Subsektors. Wirkungshebel: „Baumaterial“, „Planungs- und Projektmanagementzeit“, „Bauzeit“, „Heizen“, „Warmwasser“, „Klima- und Lüftungsanlagen“ und „Beleuchtung“; c) Kosteneinsparungen durch BMS werden sektorübergreifend im EBIT von Gebäudemietern wirksam und nicht nur bei den Unternehmen des Gebäudesektors.

Zahlen im Detail – Industrie

| Datenpunkt | Sektor | Stahl: Digital Twin ^a | Produkt: Digital Twin und virtuelle Prototypentwicklung | Zement: Digital Twin ^b | Chemie: Digital Twin ^c | |
|------------------------------------|--|----------------------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------|
| Dekarbonisierung | CO ₂ -Effekt 2022 in % | 3,3 % | 4,2 % | 2,8 % | 3,7 % | 3,0 % |
| | CO ₂ -Effekt 2030 in % | 5,6 % | 5,4 % | 4,8 % | 7,1 % | 5,9 % |
| | CO ₂ -Einsparung 2022 in MT CO ₂ /Jahr | 5,7 | 1,9 | 1,5 | 0,8 | 1,5 |
| | CO ₂ -Einsparung 2030 in MT CO ₂ /Jahr | 7,9 | 2,2 | 1,9 | 1,3 | 2,5 |
| | CO ₂ -Reduktionshebel in % ^d | n.a. | 11,2 % | 9,1 % | 12,0 % | 10,8 % |
| | CO ₂ -Baseline 2022 in MT CO ₂ | 164,0 | 44,1 | 50,9 | 20,4 | 48,6 |
| | CO ₂ -Projektion 2030 in MT CO ₂ | 140,1 | 40,0 | 39,1 | 18,5 | 42,5 |
| Profitabilität | EBIT-Effekt 2022 in % | 1,2 % | 1,7 % | 1,2 % | 1,2 % | 1,0 % |
| | EBIT-Effekt 2030 in % | 2,1 % | 2,2 % | 2,1 % | 2,4 % | 1,9 % |
| | EBIT-Erhöhung 2022 in Mio. EUR | 22.861,0 € | 934,3 € | 20.317,3 € | 42,3 € | 1.567,1 € |
| | EBIT-Erhöhung 2030 in Mio. EUR | 42.214,7 € | 1.275,1 € | 37.570,5 € | 87,2 € | 3.282,0 € |
| | Kostenreduktionshebel in % ^{d,e} | n.a. | 4,8 % | 4,8 % | 4,5 % | 3,7 % |
| | Umsatz 2022 in Mio. EUR | 1.870.621,1 € | 55.200,0 € | 1.650.991,1 € | 3.430,0 € | 161.000,0 € |
| Umsatz-Projektion 2030 in Mio. EUR | 1.994.465,4 € | 58.854,5 € | 1.760.294,8 € | 3.657,1 € | 171.659,0 € | |
| Adaption | Adaptionsrate 2022 in % | 31,6 % | 37,5 % | 30,6 % | 30,3 % | 28,0 % |
| | Adaptionsrate 2030 in % | 55,8 % | 56,0 % | 53,0 % | 58,7 % | 55,0 % |

Dekarbonisierung: Sekundärquellen zur Kalkulation

1. [DEHSt, 2023](#)
2. [Dena, 2023a](#)
3. [Global Energy Solutions e.V., 2022](#)
4. [UBA, 2023h](#)
5. [UBA, 2023i](#)
6. [UBA, 2023j](#)
7. [VCI, 2023](#)
8. [VDZ, 2023a](#)
9. [VDZ, 2023b](#)
10. [Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2023](#)

Profitabilität: Sekundärquellen zur Kalkulation

1. [BBS, 2023](#)
2. [Destatis, 2019b](#)
3. [Holcim, 2022](#)
4. [IBISWorld, 2023b](#)
5. [onvista, 2023](#)
6. [Salzgitter AG, 2023](#)
7. [Statista, 2023b](#)
8. [Thyssenkrupp, 2023a](#)
9. [VDZ, 2023b](#)
10. [VCI, 2024](#)

Anmerkungen: a) Inkl. digitaler Modellierung und Optimierung des Schmelzprozesses; b) Inkl. digitaler Modellierung des Kalzinierungsprozesses; c) Inkl. digitaler Modellierung für die Reformulierung chemischer Produkte; d) Berechnung basiert auf spezifischen Wirkungshebeln. Angegebene Zahlen repräsentieren gewichtete Durchschnitte der minimalen und maximalen Wirkungshebel; e) Gewichtung der Wirkungshebel basiert auf der Kostenstruktur des Subsektors. Wirkungshebel: „Energieverbrauch“, „Rohstoffverbrauch“, „Arbeitsaufwand“, „Rohstoffbrennung“, „Wasserverbrauch“, „Wartung“, „Ausfallzeit“ und „Materialverbrauch“.

Zahlen im Detail – Landwirtschaft

| Datenpunkt | Sektor | Ackerbau: intelligente Boden- und Ernteüberwachung | Ackerbau: intelligente landwirtschaftliche Maschinen | Viehwirtschaft: digitale Tierüberwachung | Viehwirtschaft: Präzisionsfütterung | |
|------------------------------------|--|--|--|--|-------------------------------------|------------|
| Dekarbonisierung | CO ₂ -Effekt 2022 in % | 8,1% | 3,6 % | 5,1 % | 4,3 % | 4,0 % |
| | CO ₂ -Effekt 2030 in % | 16,9% | 7,3 % | 9,0 % | 9,4 % | 7,8 % |
| | CO ₂ -Einsparung 2022 in MT CO ₂ /Jahr | 5,3 | 0,8 | 1,1 | 1,8 | 1,7 |
| | CO ₂ -Einsparung 2030 in MT CO ₂ /Jahr | 9,1 | 1,5 | 1,8 | 3,2 | 2,6 |
| | CO ₂ -Reduktionshebel in % ^a | n.a. | 9,7 % | 17,1 % | 13,5 % | 14,2 % |
| | CO ₂ -Baseline 2022 in MT CO ₂ | 60,0 | 20,8 | 20,8 | 39,2 | 39,2 |
| | CO ₂ -Projektion 2030 in MT CO ₂ | 53,9 | 20,1 | 20,1 | 33,8 | 33,8 |
| Profitabilität | EBIT-Effekt 2022 in % | 2,4% | 1,7 % | 2,1 % | 0,7 % | 0,6 % |
| | EBIT-Effekt 2030 in % | 4,6% | 3,5 % | 3,6 % | 1,6 % | 1,2 % |
| | EBIT-Erhöhung 2022 in Mio. EUR | 1.453,9 € | 437,2 € | 524,5 € | 262,6 € | 229,6 € |
| | EBIT-Erhöhung 2030 in Mio. EUR | 2.211,8 € | 718,3 € | 746,7 € | 420,8 € | 326,0 € |
| | Kostenreduktionshebel in % ^{a,b} | n.a. | 5,0 % | 7,5 % | 2,5 % | 2,5 % |
| | Umsatz 2022 in Mio. EUR | 61.648,7 € | 25.352,6 € | 25.352,6 € | 36.296,1 € | 36.296,1 € |
| Umsatz-Projektion 2030 in Mio. EUR | 47.960,9 € | 20.787,3 € | 20.787,3 € | 27.173,6 € | 27.173,6 € | |
| Adaption | Adaptionsrate 2022 in % | 31,9% | 37,1 % | 30,0 % | 32,0 % | 28,4 % |
| | Adaptionsrate 2030 in % | 63,1% | 75,0 % | 52,5 % | 70,0 % | 55,0 % |

Dekarbonisierung: Sekundärquellen zur Kalkulation

1. [Andeweg & Reisinger, 2015](#)
2. [Bartzanas et al., 2017](#)
3. [Bitkom e.V., 2023](#)
4. [Bosco et al., 2021](#)
5. [Chen et al., 2021](#)
6. [Corsini et al., 2015](#)
7. [Farooque et al., 2023](#)
8. [Gabriel & Gandorfer, 2022](#)
9. [Groher et al., 2020](#)
10. [Maloku, 2020](#)
11. [Masi et al., 2023](#)
12. [Mirzakaninafchi, 2022](#)
13. [Pomar & Remus, 2019](#)
14. [Research and Markets, 2023](#)
15. [Shi et al., 2023](#)
16. [Späti, 2022](#)
17. [UBA, 2024e](#)

Profitabilität: Sekundärquellen zur Kalkulation

1. [Bitkom e.V., 2023](#)
2. [BMEL, 2023e](#)
3. [Chen et al., 2021](#)
4. [Corsini et al., 2015](#)
5. [DBV, 2018](#)
6. [DBV, 2019](#)
7. [DBV, 2020](#)
8. [DBV, 2021b](#)
9. [DBV, 2022](#)
10. [DBV, 2023](#)
11. [Farooque et al., 2023](#)
12. [Gabriel & Gandorfer, 2022](#)
13. [Groher et al., 2020](#)
14. [Maloku, 2020](#)
15. [Masi et al., 2023](#)
16. [Mirzakaninafchi, 2022](#)
17. [Research and Markets, 2023](#)
18. [Schimmelpfennig, 2016](#)
19. [Shi et al., 2023](#)
20. [Späti, 2022](#)

Anmerkungen: a) Berechnung basiert auf spezifischen Wirkungshebeln. Angegebene Zahlen repräsentieren gewichtete Durchschnitte der minimalen und maximalen Wirkungshebel; b) Gewichtung der Wirkungshebel basiert auf der Kostenstruktur des Subsektors. Wirkungshebel: „Dünger“, „manuelle Arbeit“ und „Kraftstoffverbrauch“.

Zahlen im Detail – Logistik

| Datenpunkt | Sektor | Lkw-Güterverkehr: Digital Twin und Advanced Planning | Lkw-Güterverkehr: intelligente Routen- und Frachtoptimierung | Lkw-Güterverkehr: Truck Platooning |
|------------------------------------|--|--|--|------------------------------------|
| Dekarbonisierung | CO ₂ -Effekt 2022 in % | 3,3 % | 2,4 % | a |
| | CO ₂ -Effekt 2030 in % | 7,1 % | 4,5 % | 1,4% |
| | CO ₂ -Einsparung 2022 in MT CO ₂ /Jahr | 1,2 | 0,9 | a |
| | CO ₂ -Einsparung 2030 in MT CO ₂ /Jahr | 4,1 | 2,6 | 0,8 |
| | CO ₂ -Reduktionshebel in % ^b | n.a. | 11,6 % | 13,6 % |
| | CO ₂ -Baseline 2022 in MT CO ₂ | 35,9 | 35,9 | 35,9 |
| | CO ₂ -Projektion 2030 in MT CO ₂ | 58,5 | 58,5 | 58,5 |
| Profitabilität | EBIT-Effekt 2022 in % | 1,1 % | 1,3 % | a |
| | EBIT-Effekt 2030 in % | 2,3 % | 2,4 % | 0,4% |
| | EBIT-Erhöhung 2022 in Mio. EUR | 779,2 € | 919,1 € | 600,7 € |
| | EBIT-Erhöhung 2030 in Mio. EUR | 2.139,4 € | 2.238,9 € | 1.330,3 € |
| | Kostenreduktionshebel in % ^{b,c} | n.a. | 6,4 % | 2,9 % |
| | Umsatz 2022 in Mio. EUR | 70.400,0 € | 70.400,0 € | 70.400,0 € |
| Umsatz-Projektion 2030 in Mio. EUR | 92.742,7 € | 92.742,7 € | 92.742,7 € | |
| Adap- tion | Adaptionsrate 2022 in % | 17,2 % | 20,8 % | < 1,0 % |
| | Adaptionsrate 2030 in % | 34,2 % | 38,5 % | 14,0 % |

Dekarbonisierung: Sekundärquellen zur Kalkulation

1. [Coherent Market Insights, 2023](#)
2. [Destatis, 2023c](#)
3. [Fraunhofer IIS, 2022](#)
4. [Fraunhofer IIS, 2020](#)
5. [GMI, 2022](#)
6. [HBEFA, 2024](#)
7. [KBA, 2023](#)
8. [Lehmann, 2020](#)
9. [MarketsandMarkets, 2023](#)
10. [Market Research Future, 2024](#)
11. [UBA, 2024c](#)
12. [UBA, 2024b](#)

Profitabilität: Sekundärquellen zur Kalkulation

1. [BGL, 2023](#)
2. [Coherent Market Insights, 2023](#)
3. [Destatis, 2023c](#)
4. [GMI, 2022](#)
5. [HBEFA, 2024](#)
6. [KBA, 2023](#)
7. [Lehmann, 2020](#)
8. [MarketsandMarkets, 2023](#)
9. [Market Research Future, 2024](#)
10. [UBA, 2024c](#)
11. [UBA, 2024b](#)

Anmerkungen: a) Befindet sich in Deutschland aktuell in der Pilotphase, weshalb für 2023 keine signifikanten Effekte ermittelt werden können; b) Berechnung basiert auf spezifischen Wirkungshebeln. Angegebene Zahlen repräsentieren gewichtete Durchschnitte der minimalen und maximalen Wirkungshebel; b) Gewichtung der Wirkungshebel basiert auf der Kostenstruktur des Subsektors. Wirkungshebel: „Gesamtkraftstoffverbrauch“, „Anzahl Fahrzeuge der Gesamtflotte“, „Wartungskosten“, „Lohnkosten“, „Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch“ und „Kraftstoffverbrauch“.

Zahlen im Detail – Strom

| Datenpunkt | Sektor | Wind: Standortmodellierung | Wind: Digital Twin und prädiktive Wartung | Solar: Standortmodellierung | Solar: Digital Twin und prädiktive Wartung | Stromnetz: Digital Twin ^a | |
|------------------------------------|--|----------------------------|---|-----------------------------|--|--------------------------------------|------------|
| Dekarbonisierung | CO ₂ -Effekt 2022 in % | 4,7 % | 1,2 % | 0,4 % | 1,2 % | 0,2 % | 3,4 % |
| | CO ₂ -Effekt 2030 in % | 12,0 % | 5,8 % | 2,6 % | 3,8 % | 2,9 % | 4,4 % |
| | CO ₂ -Einsparung 2022 in MT CO ₂ /Jahr | 11,4 | 2,8 | 1,0 | 2,8 | 0,6 | 7,9 |
| | CO ₂ -Einsparung 2030 in MT CO ₂ /Jahr | 14,3 | 7,0 | 3,1 | 4,5 | 3,5 | 5,2 |
| | CO ₂ -Reduktionshebel in % ^b | n.a. | 5,4 % | 3,8 % | 4,8 % | 7,9 % | 8,0 % |
| | CO ₂ -Baseline 2022 in MT CO ₂ | 227,0 | 227,0 | 227,0 | 227,0 | 227,0 | 227,0 |
| | CO ₂ -Projektion 2030 in MT CO ₂ | 119,5 | 119,5 | 119,5 | 119,5 | 119,5 | 119,5 |
| Profitabilität | EBIT-Effekt 2022 in % | 3,4 % | 3,5 % | 1,5 % | 2,2 % | 1,6 % | 1,6 % |
| | EBIT-Effekt 2030 in % | 6,6 % | 6,0 % | 3,3 % | 4,3 % | 4,2 % | 2,3 % |
| | EBIT-Erhöhung 2022 in Mio. EUR | 1.818,9 € | 756,9 € | 314,3 € | 188,5 € | 137,7 € | 421,4 € |
| | EBIT-Erhöhung 2030 in Mio. EUR | 4.416,0 € | 1.628,6 € | 877,4 € | 605,1 € | 613,6 € | 691,4 € |
| | Kostenreduktionshebel in % ^{b,c} | n.a. | 3,7 % | 4,1 % | 3,4 % | 3,3 % | 4,4 % |
| | Umsatz 2022 in Mio. EUR | 53.170,5 € | 18.903,2 € | 18.903,2 € | 7.286,2 € | 7.286,2 € | 26.981,1 € |
| Umsatz-Projektion 2030 in Mio. EUR | 66.569,7 € | 23.946,0 € | 23.946,0 € | 12.519,0 € | 12.519,0 € | 30.104,6 € | |
| Adaption | Adaptionsrate 2022 in % | 32,5 % | 48,6 % | 24,1 % | 34,8 % | 18,1 % | 37,1 % |
| | Adaptionsrate 2030 in % | 60,4 % | 82,5 % | 53,1 % | 65,0 % | 46,9 % | 54,6 % |

Dekarbonisierung: Sekundärquellen zur Kalkulation

1. [AGEB, 2023](#)
2. [Betti et al., 2019](#)
3. [Chandler, 2022](#)
4. [DWD, 2023](#)
5. [Fraunhofer ISE, 2024](#)
6. [Klima- und Energiefonds, 2012](#)
7. [Kuttybay et al., 2020](#)
8. [Schlömer et al., 2014](#)
9. [Schmidt, 2022](#)
10. [UBA, 2023l](#)
11. [UBA, 2023h](#)
12. [WindEurope, 2021](#)

Profitabilität: Sekundärquellen zur Kalkulation

1. [Amprion, 2022](#)
2. [BDEW, 2023a](#)
3. [BDEW, 2023c](#)
4. [BDEW, 2023a](#)
5. [BDEW, 2023b](#)
6. [Bundesnetzagentur, 2023b](#)
7. [Deutsche WindGuard, 2023](#)
8. [Encavis, 2022](#)
9. [Fraunhofer ISE, 2021](#)
10. [Honna et al., 2022](#)
11. [Lico & Barr, 2022](#)
12. [Research and Markets, 2022](#)
13. [Research and Markets, 2024](#)
14. [Scatec, 2022](#)
15. [Strom-Report, 2023](#)
16. [vbw, 2023](#)
17. [vbw, 2023](#)
18. [50hertz, 2023](#)

Anmerkungen: a) Inklusiv digitaler Fehlererkennung und prädiktiver Wartung; b) Berechnung basiert auf spezifischen Wirkungshebeln. Angegebene Zahlen repräsentieren gewichtete Durchschnitte der minimalen und maximalen Wirkungshebel; b) Gewichtung der Wirkungshebel basiert auf der Kostenstruktur des Subsektors. Wirkungshebel: „Kosten der Energieerzeugung“, „Kosten der Energieübertragung“.

5 Anhang

5.3 Quellen- verzeichnis



Quellenverzeichnis (1/13)

- 50hertz. (2023). Informationen für Investoren. <https://www.50hertz.com/de/Investoren>
- Accenture. (2021). The European double up: A twin strategy that will strengthen competitiveness. <https://www.accenture.com/content/dam/accenture/financial/a-com-migration/r3-3/pdf/pdf-144/accenture-the-european-double-up.pdf#zoom=50>
- AEA. (2022). Auswirkungen der Digitalisierung auf Energieverbrauch und Klima in Österreich. https://www.energyagency.at/fileadmin/1_energyagency/projekte/digitalisierung/digat/digat2040_d3.1_szenarien_final.pdf
- AGEB. (2023). Stromerzeugung nach Energieträgern (Strommix) von 1990 bis 2022 (in TWh) Deutschland insgesamt. https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/10/STRERZ_Abgabe-12-2023.pdf
- Agora Energiewende. (2024). Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2023. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2024. https://www.agora-energiawende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-35_DE_JAW23/A-EW_317_JAW23_WEB.pdf
- Alajmi, M. S. & Almeshal, A. M. (2020). Prediction and optimization of surface roughness in a turning process using the ANFIS-QPSO method. *Materials*, 13(13), 2986. <https://doi.org/10.3390/ma13132986>
- Altair. (2022). 2022 digital twin global survey report. https://altair.com/docs/default-source/pdfs/altair_dt-global-survey-report_web.pdf?sfvrsn=457856ab_9
- Amprion. (2022). HGB-Jahresabschluss der Amprion GmbH, Dortmund 2022. <https://www.amprion.net/Dokumente/Amprion/Gesch%C3%A4ftsberichte/2022/HGB-Jahresabschluss-2022-der-Amprion-GmbH.pdf>
- Andeweg, K. & Reisinger, A. (2015). Reducing greenhouse gas emissions from livestock: Best practice and emerging options. In SAI Platform. https://saiplatform.org/uploads/Modules/Library/lrg-sai-livestock-mitigation_web2.pdf
- Aras. (2023). Aras-Studie 2023: Europas Industrie im Wandel. <https://www.aras.com/de-de/resources/all/rep-europes-industry-in-transition>
- Atasayar, H., Blass, P., Kaiser, S. (2022). Truck Platooning Worldwide. In *Energy-Efficient and Semi-automated Truck Platooning*. Springer https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-88682-0_2
- BAFA. (2021). Informationsblatt CO₂-Faktoren. https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2021.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- BAFA. (2024). Merkblatt zur Ermittlung des Gesamtendenergieverbrauchs. https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ea_ermittlung_gesamtenergieverbrauch.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- Baldwin, M. (2018). *Der BIM-Manager: Praktische Anleitung für das BIM-Projektmanagement*. Beuth Verlag.
- BALM. (2020). Struktur der Unternehmen des gewerblichen Güterkraftverkehrs und des Werkverkehrs. https://www.balm.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Unternehmen/Ustat/Ustat_2020.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- BALM. (2023). Marktbeobachtung Güterverkehr. Jahresbericht 2022. https://www.balm.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Marktbeobachtung/Jahresberichte/Jahr_2022.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- Banhazi, T., Babinszky, L., Halas, V. & Tschärke, M. (2012). Precision livestock farming: Precision feeding technologies and sustainable livestock production. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 5(4), 54–61. <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/600/0>
- Bartzanas, T., Amon, B., Calvet, S., Mele, M., Morgavi, D., Norton, T., Yanez-Ruiz, D. & Vandongen, C. (2017). Mini-paper – Precision Livestock Farming. In EIP-AGRI Focus Group. European Commission. https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/default/files/f_g18_mp_precision_livestock_farming_2017_en.pdf
- Baunormlexikon. (2023). DIN EN ISO 19650-2 | 2019-08. <https://www.baunormlexikon.de/norm/din-en-iso-19650-2/c279bdc5-7116-4f98-8bc1-05c34565b1b2>
- BBS. (2023). Zahlen, Daten, Fakten zur Baustoff-Steine-Erden-Industrie 2023. https://assets.website-files.com/64104084c797d19513417f63/6478782ec7b7fd5334c4247b_Tabellen_Statistik_JB_2023.pdf
- BCLDE. (2023). EU „Deforestation Act“ – Quo Vadis Lieferkette und Beschaffung? <https://www.bclde.de/news/detail/eu-deforestation-act-quo-vadis-lieferkette-und-beschaffung-1>
- BDEW. (2022). Grundlagenpapier Primärenergiefaktoren. https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20221124_BDEW-Grundlagenpapier_PEF_final.pdf
- BDEW. (2023a). BDEW-Strompreisanalyse Dezember 2023. <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>
- BDI. (2023). Hohe Energiepreise: Warum die ernste Lage der energieintensiven Industrien uns alle betrifft. <https://bdi.eu/artikel/news/hohe-energiepreise-warum-die-ernste-lage-der-energieintensiven-industrien-uns-alle-betrifft>

Quellenverzeichnis (2/13)

- Bennui, A., Rattanamanee, P., Puetpaiboon, U., Phukpattaranont, P. & Chetpattananondh, K. (2007). Site selection for large wind turbine using GIS. In PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment, 561-566. https://www.researchgate.net/publication/313578739_Site_selection_for_large_wind_turbine_using_GIS
- Bertelsmann Stiftung. (2023). Doppelte Transformation. <https://www.bertelsmann-stiftung.de/de/unsere-projekte/nachhaltig-wirtschaften/doppelte-transformation>
- Betti, A., Lo Trovato, M., Leonardi, F., Leotta, G., Ruffini, F. & Lanzetta, C. (2019). Predictive maintenance in photovoltaic plants with big data approach. arXiv. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1901/1901.10855.pdf>
- BfT. (2023a). Technologie, Ortung und Rückverfolgbarkeit in der Tiergesundheit. <https://www.bft-online.de/themen/digitalisierung-und-tiergesundheit/>
- BfT. (2023b). Tiergesundheit - Impulse für eine nachhaltige Lebensmittelproduktion. <https://www.bft-online.de/themen/tiergesundheit-und-landwirtschaft/nachhaltigkeit>
- BGL. (2023). Branchenkostenentwicklung. <https://www.bgl-ev.de/interaktiver-branchenkostenmodellrechner/>
- BIM Deutschland. (2023). BIM Deutschland – die zentrale Anlaufstelle rund um das Thema BIM. <https://www.bimdeutschland.de/>
- Bitkom e.V. (2021). Klimaschutz und Energieeffizienz durch digitale Gebäudetechnologien Studie. https://www.bitkom.org/sites/main/files/2021-11/211111_st_klimaschutz-und-energieeffizienz.pdf
- Bitkom e.V., Accenture. (2022). Datenschutz als Herausforderung für die Digitalisierung. <https://www.bitkom.org/sites/main/files/2023-01/Studie-Datenschutz-als-Herausforderung-fur-die-Digitalisierung-final.pdf>
- Bitkom e.V. (2023). Schon 8 von 10 Landwirten setzen auf digitale Technologien. <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Schon-8-von-10-Landwirten-setzen-auf-digitale-Technologien>
- BLE. (2023). Extremes Wetter: Wie das Klima die Landwirtschaft verändert. <https://www.praxis-agrar.de/umwelt/klima/wie-das-klima-die-landwirtschaft-veraendert>
- BMEL. (2020). Landwirtschaft verstehen. Fakten und Hintergründe. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Landwirtschaft-verstehen.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- BMEL. (2022). Daten und Fakten. Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft mit Fischerei und Wein- und Gartenbau. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/daten-fakten-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- BMEL. (2023a). Agrarexporte. <https://www.bmel.de/DE/themen/internationales/ausse-nwirtschaftspolitik/handel-und-export/agrarexporte.html>
- BMEL. (2023b). Landwirtschaft. https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/landwirtschaft_node.html
- BMEL. (2023c). Tiergesundheit. https://www.bmel.de/DE/themen/tiere/tiergesundheit/tiergesundheit_node.html
- BMEL. (2023d). Tierhaltung. <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/tierhaltung>
- BMEL. (2023e). Verkaufserlöse der Landwirtschaft nach Erzeugnissen. [Datensatz]. <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.bmel-statistik.de%2Ffileadmin%2Fdaten%2F3130200-0000.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK>
- BMEL. (2024). Ausgaben der Landwirtschaft für zugekaufte Düngemittel. <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/landwirtschaftliche-gesamtrechnung/ausgaben>
- BMI. (2021). Masterplan BIM für Bundesbauten. https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/2021/10/masterplan-bim.pdf.jsessionid=BA100CF59399F0BC4821BB09B107503E1_cid364?__blob=publicationFile
- BMWK. (2023a). Bürgerdialog. Beteiligungsmöglichkeiten beim Übertragungsnetzausbau. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/buergerdialog.html>
- BMWK. (2023b). Ein Stromnetz für die Energiewende. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/netze-und-netzausbau.html>
- BMWK. (2023c). Erneuerbare Energien. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html>
- BMWK. (2023d). Gesetzlicher Smart-Meter-Rolloutfahrplan. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/infografik-smart-meter-rolloutfahrplan.html>
- BMWK. (2023e). Photovoltaik-Strategie. Handlungsfelder und Ausbaumaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der Photovoltaik. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/photovoltaik-strategie-2023.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- Bogue, R. (2017). Sensors key to advances in precision agriculture. Sensor Review, 37(1), 1-6. <https://doi.org/10.1108/SR-10-2016-0215>

Quellenverzeichnis (3/13)

- Bosco, S., Volpi, I., Cappucci, A., Mantino, A., Ragolini, G., Bonari, E. & Mele, M. (2021). Innovating feeding strategies in dairy sheep farming can reduce environmental impact of ewe milk. *Italian Journal of Animal Science*, 20(1), 2147–2164.
<https://doi.org/10.1080/1828051x.2021.2003726>
- Bosman, L., Leon-Salas, W. D., Hutzler, W. J. & Soto, E. A. (2020). PV system predictive maintenance: Challenges, current approaches, and opportunities. *Energies*, 13(6), 1398.
<https://doi.org/10.3390/en13061398>
- BSW Solar. (2023). Solarbranche unter Strom – vom Solarbooster zum Solarboom.
https://www.solarwirtschaft.de/wp-content/uploads/2023/06/Intersolar2023_BSW_PK-Praesentation_fin.pdf
- Bundesnetzagentur. (2023a). Messeinrichtung / Intelligente Messsysteme.
<https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Vportal/Energie/Metering/start.html>
- Bundesnetzagentur. (2023b). Monitoringbericht 2023.
<https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/MonitoringberichtEnergie2023.pdf>
- Bundesregierung. (2022). BIM-Portal des Bundes geht an den Start.
<https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/digitalisierung/bim-portal-freigeschaltet-2132842>
- Bundesregierung. (2023a). Mehr Energie aus erneuerbaren Quellen.
<https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/energiewende-beschleunigen-2040310>
- Bundesregierung. (2023b). Von der Kohle zur Zukunft.
<https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/kohleausstieg-1664496>
- BVL. (2023). Logistikumsatz und Beschäftigung.
<https://www.bvl.de/service/zahlen-daten-fakten/umsatz-und-beschaeftigung>
- BVMB. (2021). Aktuelle Preistreiber in der Bauwirtschaft.
https://www.bvmb.de/images/Veroeffentlichungen/Baupreisentwicklung/2021-03-24_Flyer_Baupreise_Stand_Mrz_2021.pdf
- BWP. (2023). Wärmepumpenabsatz 2022: Wachstum von 53 Prozent gegenüber dem Vorjahr.
<https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilung/en/details/waermepumpenabsatz-2022-wachstum-von-53-prozent-gegenueber-dem-vorjahr/>
- CAD. (2022). Platooning becomes a reality in Europe.
<https://www.connectedautomateddriving.eu/blog/platooning-becomes-a-reality-in-europe/>
- Castrignano, A., Buttafuoco, G., Khosla, R., Mouazen, A., Moshou, D. & Naud, O. (2020). *Agricultural Internet of Things and Decision Support for Precision Smart Farming*. Academic Press.
- CattleData. (2023). CattleData – Modernstes Herdenmonitoring.
<https://cattledata.de/>
- Chalal, L., Saadane, A. & Rachid, A. (2023). Unified environment for real time control of hybrid energy system using digital twin and IoT approach. *Sensors*, 23(12), 5646.
<https://doi.org/10.3390/s23125646>
- Chandler, D. (2022). A new method boosts wind farms' energy output, without new equipment. *MIT News | Massachusetts Institute of Technology*.
<https://news.mit.edu/2022/wind-farm-optimization-energy-flow-0811>
- Chen, L., Zhu, H., Horst, L., Wallhead, M., Reding, M. E. & Fulcher, A. (2021). Management of pest insects and plant diseases in fruit and nursery production with laser-guided variable-rate sprayers. *Hortscience*, 56(1), 94–100.
<https://doi.org/10.21273/hortsci15491-20>
- Coherent Market Insights. (2023). Truck platooning market analysis.
<https://www.coherentmarketinsights.com/market-insight/truck-platooning-market-5707>
- Corsini, L., Gocke, A., Kurth, T. & Wagner, K. (2015). *Crop Farming 2030*.
https://web-assets.bcg.com/img-src/BCG-Crop-Farming-2030-May-2015_tcm9-184100.pdf
- Crispeels, P., Inia D., Legge, H., Nauclér, T., Radtke, P. (2023). Decarbonize and create value: How incumbents can tackle the steep challenge.
https://www.mckinsey.com/~/_/media/mckinsey/business%20functions/sustainability/our%20insights/decarbonize%20and%20create%20value%20how%20incumbents%20can%20tackle%20the%20steep%20challenge/decarb-onize-and-create-value-how-incumbents-can-tackle-the-steep-challenge.pdf?shouldIndex=false
- DBFZ. (2023). Optionen zum Einsatz fester Biomasse in dekarbonisierten Wärmenetzen (SmartBioGrid).
https://www.energetische-biomassennutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB159_SmartBioGrid_Endbericht.pdf
- DBV. (2018). Situationsbericht 2018/19. Trends und Fakten zur Landwirtschaft.
https://www.bauernverband.de/fileadmin/user_upload/Kapitel1.pdf
- DBV. (2019). Situationsbericht 2019/20. Trends und Fakten zur Landwirtschaft.
https://www.bauernverband.de/fileadmin/user_upload/Kap1.pdf

Quellenverzeichnis (4/13)

- DBV. (2020). Situationsbericht 2020/21. Trends und Fakten zur Landwirtschaft.
https://www.bauernverband.de/fileadmin/user_upload/dbv/situationsbericht/2020-2021/kapitel1/Kap_1.pdf
- DBV. (2021a). DBV-Zukunftskonzept 2021.
<https://www.bauernverband.de/dbv-positionen/positionen-beschluesse/position/zukunftskonzept-2021>
- DBV. (2021b). Situationsbericht 2021/22. Trends und Fakten zur Landwirtschaft.
https://magazin.diemayrei.de/storage/media/1ed75fd6-6af3-6bec-b3d0-5254a201e2da/Sit_2023_Kapitel1.pdf
- DBV. (2022). Situationsbericht 2022/23. Trends und Fakten zur Landwirtschaft.
<https://www.bauernverband.de/fileadmin/berichte/2021/index.html#3>
- DBV. (2023). Situationsbericht 2023/24. Trends und Fakten zur Landwirtschaft.
https://magazin.diemayrei.de/storage/media/1ee9439f-5412-69f0-b9b1-5254a201e2da/DBV_SB_2024-web.pdf
- DEHSt. (2023). Treibhausgasemissionen 2022 – Kurzfassung.
https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2022_Summary.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Demografie-Portal (2022). Bevölkerungszahl in Rheinland-Pfalz.
<https://www.demografie-portal.de/DE/Fakten/bevoelkerungszahl-rheinland-pfalz.html>
- Dena. (2022). Dena-Gebäudereport 2023.
https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/dena_Gebaedereport_2023.pdf
- Dena. (2023a). Chemieindustrie.
<https://www.co2-leuchttuerme-industrie.de/branchen/branchensteckbrief-chemie-industrie/#:~:text=An%20den%20Emissionen%20der%20gesamten,Energieverbraucher%20unter%20den%20verarbeitenden%20Industrien>
- Dena. (2023b). Datenanalysen und künstliche Intelligenz im Stromverteilnetz.
https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/ABSCHLUSSBERICHT_Datenanalysen_und_kuenstliche_Intelligenz_im_Stromverteilnetz.pdf
- Dena. (2023c). Fit für 2045: Zielparame-ter für Nichtwohngebäude im Bestand.
https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2023/STUDIE_Fit_fuer_2045_Zielparame-ter_fuer_Nicht_wohngebaeude_im_Bestand.pdf
- Dena. (2023d). Keine Energiewende ohne Wärmewende.
<https://www.dena.de/themen-projekte/energieeffizienz/gebaeude/#:~:text=Der%20Gr%C3%B6%C3%9Fte%20Anteil%20des%20Energieverbrauchs,auf%20das%20Konto%20der%20Nichtwohngeb%C3%A4ude>
- Destatis. (2019a). Dienstleistungen. Struktur-erhebung im Dienstleistungsbereich Grundstücks- und Wohnungswesen.
https://destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Dienstleistungen/Publikationen/Downloads-Dienstleistungen-Struktur/grundstuecks-wohnungswesen-2090430197004.pdf?__blob=publicationFile
- Destatis. (2019b). Produzierendes Gewerbe. Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/Publikationen/Downloads-Struktur/kostenstruktur-2040430177004.pdf?__blob=publicationFile
- Destatis. (2021a). Energie. Beschäftigte, Umsatz, Investitionen.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Beschaeftigte-Umsatz-Investitionen_inhalt.html
- Destatis. (2021b). Kurzübersicht Abfallbilanz.
<https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/abfallbilanz-kurzuebersicht-2021.html>
- Destatis. (2021c). Produzierendes Gewerbe. Kostenstruktur im Baugewerbe nach rechtlichen Einheiten. [Datensatz].
<https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Tabellen/sonderauswertung-kse-bau.html>
- Destatis. (2021d). Viehhaltung im letzten Jahrzehnt: Weniger, aber größere Betriebe.
https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/07/PD21_NO43_41.html
- Destatis. (2021e). Windkraft-Anlagen waren im 1. Halbjahr 2021 zu 21% ausgelastet.
https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/10/PD21_NO62_41.html
- Destatis. (2022). CO₂-Emissionsintensität der deutschen Wirtschaft 2020 weiterhin rückläufig.
https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/10/PD22_437_43.html#:~:text=Der%20zweitgr%C3%B6%C3%9Fte%20Emittent%20unter%20den,pro%201%20000%20Euro%20Bruttowertsch%C3%B6pfung

Quellenverzeichnis (5/13)

- Destatis. (2023a). Bildung, Forschung und Kultur. Forschung und Entwicklung.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bildung-Forschung-Kultur/Forschung-Entwicklung/_inhalt.html#234658
- Destatis. (2023b). Erwerbstätige im Inland nach Wirtschaftssektoren.
<https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Konjunkturindikatoren/Lange-Reihen/Arbeitsmarkt/lrerw13a.html>
- Destatis. (2023c). Güterverkehr.
<https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Tabellen/verkehrstraeger-gueterabteilung-b.html#fussnote-2-121628>
- Destatis. (2023d). Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Feldfrüchte und Grünland.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/_inhalt.html
- Destatis. (2023e). Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Tiere und tierische Erzeugung.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Tiere-Tierische-Erzeugung/_inhalt.html
- Destatis. (2023f). Straßenverkehr: EU-weite CO₂-Emissionen seit 1990 um 21 % gestiegen.
https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Umwelt-Energie/CO2_Strassenverkehr.html#:~:text=Pkw%20und%20Motorr%C3%A4der%20verursachen%20mit,weitere%2010%20%25%20auf%20leichte%20Nutzfahrzeuge
- Destatis. (2023g). Stromerzeugung 2022: Ein Drittel aus Kohle, ein Viertel aus Windkraft.
https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/03/PD23_090_43312.html
- Destatis. (2024a). Bedeutung der energieintensiven Industriezweige in Deutschland.
<https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/produktionsindex-energieintensive-branchen.html#:~:text=Energieintensive%20Industriezweige%20sind%20vor%20allem,und%20Pappe%20sind%20energieintensive%20Wirtschaftsbereiche>
- Destatis. (2024b). Branchen und Unternehmen. Industrie, Verarbeitendes Gewerbe.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/_inhalt.html
- Destatis. (2024c). Bruttoinlandsprodukt 2023.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/_Grafik/_Interaktiv/bip-wirtschaftsstruktur.html
- Destatis. (2024d). Durchschnittlicher Verbraucherpreis für leichtes Heizöl in Deutschland in den Jahren 1960 bis 2024.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2633/umfrage/entwicklung-des-verbraucherpreises-fuer-leichtes-heizoel-seit-1960/>
- Destatis. (2024e). Branchen und Unternehmen Bauen.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/_inhalt.html
- Destatis. (2024f). Agrarstrukturserhebung 2023: Zahl viehhaltender Betriebe zwischen 2020 und 2023 um 4 % gesunken.
https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/03/PD24_123_41.html
- Deter, A. (2023). Forscher warnen: Fachkräftemangel bedroht Innovationsfähigkeit.
<https://www.topagrar.com/betriebsleitung/news/forscher-warnen-fachkraeftemangel-bedroht-innovationsfaehigkeit-13452290.html>
- Deutsche WindGuard. (2023). Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland erstes Halbjahr 2023.
https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/06-zahlen-und-fakten/20230718_Status_des_Windenergieausbaus_an_Land_Halbjahr_2023.pdf
- Deutscher Bundestag. (2022). Digitalisierung der Landwirtschaft: gesellschaftliche Voraussetzungen, Rahmenbedingungen und Effekte.
<https://dserver.bundestag.de/btd/20/016/2001649.pdf>
- DGNB. (2021). Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion. Ergebnisse einer Studie mit 50 Gebäuden.
<https://www.dgnb.de/?elD=dumpFile&t=f&download=1&=7680&token=6b175c48a009cc37052cad1afd3e3c20de079836>
- DIN e.V. (Hrsg.) (DIN EN ISO 19650-2:2018-12, 2018): DIN EN ISO 19650-2:2018-12, Beuth-Verlag, Berlin, 2018.
- DWD. (2023). Zeitreihen und Trends.
<https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html?nn=480164#buehneTop>
- EEA. (2023). EEA greenhouse gases – data viewer.
<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>
- Encavis. (2022). Geschäftsbericht 2022.
<https://www.encavis.com/Dokumente/IR/Finanzberichte/Encavis%20AG/Gesch%C3%A4ftsjahr%202022/20230328-Encavis-Geschaeftsbericht2022.pdf>
- Energiewendebauen. (2021). Datenbank schließt Wissenslücke über Nichtwohngebäude.
<https://www.energiewendebauen.de/forschung-im-dialog/neuigkeiten-aus-der-forschung/detailansicht/datenbank-schliesst-wissensluecke-ueber-nichtwohngebaeude>

Quellenverzeichnis (6/13)

- European Commission. (2019). Wearable livestock device reduces methane emissions. <https://cordis.europa.eu/article/id/418257-wearable-livestock-device-reduces-methane-emissions>
- European Commission. (2023). Farm to fork targets - Progress. https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/sustainable-use-pesticides/farm-fork-targets-progress_en#:~:text=The%20European%20Commission%20announced%20two%20pesticide%20reduction%20targets,at%20European%20Union%20level%20towards%20meeting%20both%20targets
- Eurostat. (2023). Disaggregated final energy consumption in households - quantities. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_D_HHQ_custom_2684395/default/table?lang=en
- Evonik. (2023). Top Thema: Blockchain und der digitale Zwilling. <https://digital.evonik.com/de/thema-des-monats/archiv/top-thema-blockchain-und-der-digitale-zwilling-162021.html>
- ew. (2022). Die Digitalisierung der europäischen Stromnetze - eine umsetzbare Herausforderung. <https://www.energie.de/ew/news-detailansicht/nsctrl/detail/News/die-digitalisierung-der-europaeischen-stromnetze-eine-umsetzbare-herausforderung>
- Fantke, P., Cinquemani, C., Yaseneva, P., De Mello, J., Schwabe, H., Ebeling, B. & Lapkin, A. (2021). Transition to sustainable chemistry through digitalization. Chem, 7(11), 2866–2882. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2021.09.012>
- Farooque, A. A., Hussain, N., Schumann, A. W., Abbas, F., Afzaal, H., McKenzie-Gopsill, A., Esau, T., Zaman, Q., & Wang, X. (2023). Field evaluation of a deep learning-based smart variable-rate sprayer for targeted application of agrochemicals. Smart Agricultural Technology, 3, 100073. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100073>
- Fischer, K. (2022). How Breuninger stores cut their carbon footprint with energyControl. <https://recogizer.com/en/blog/how-breuninger-stores-cut-their-carbon-footprint-with-energycontrol>
- Fraunhofer IAO. (2023). Digitalisierung und Nachhaltigkeit im Doppelpack. <https://www.iao.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/aktuelles/digitalisierung-und-nachhaltigkeit-im-doppelpack.html>
- Fraunhofer IIS. (2020). Top 100 der Logistik 2020/2021. DVV Media Group GmbH.
- Fraunhofer IIS. (2022). Executive Summary Top 100 der Logistik 2022/2023. DVV Media Group GmbH. https://www.scs.fraunhofer.de/content/dam/scs/DE/publikationen/studien/maerkte-standorte-logistik/2022_ExecSumm_Top100.pdf
- Fraunhofer IML. (2024). Klimaschutz in Logistik und Verkehr. https://www.iml.fraunhofer.de/de/abteilungen/b3/nachhaltigkeit-und-kreislaufwirtschaft/dienstleistungen/umwelt_und_ressourcen/klimaschutz.html
- Fraunhofer IMWS. (2019). Einsatz von Schrott in der Stahlherstellung mindert CO2-Ausstoß erheblich. <https://www.imws.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/stahl-schrott-kreislaufwirtschaft-co2.html>
- Fraunhofer ISE. (2021). Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf
- Fraunhofer ISE. (2024). Öffentliche Stromerzeugung 2023: Erneuerbare Energien decken erstmals Großteil des Stromverbrauchs. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2024/oeffentliche-stromerzeugung-2023-erneuerbare-energien-decken-erstmals-grossteil-des-stromverbrauchs.html>
- Fraunhofer. (2019). Fehler in Stromnetzen mit Künstlicher Intelligenz automatisiert erkennen. <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformation/en/2019/april/fehler-in-stromnetzen-mit-kuenstlicher-intelligenz-automatisiert-erkennen.html>
- Gabot.de. (2023). Hohe Düngerpreise: Über Risiken und Nebenwirkungen. <https://www.gabot.de/ansicht/hohe-duengerpreise-ueber-risiken-und-nebenwirkungen-421213.html>
- Gabriel, A., & Gandorfer, M. (2022). Adoption of digital technologies in agriculture—an inventory in a european small-scale farming region. Precision Agriculture, 24(1), 68–91. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09931-1>
- Galler, R. (2019). Bürogebäude OST BMW Freimann München. <https://worldofporr.com/de/173-2019/buerogebaeude-ost-bmw-freimann-muenchen/>
- GEZE. (2023). Energieeffizienz im Gebäudebereich. <https://www.geze.at/de/entdecken/themen/energieeffizienz-von-gebaeuden>
- Ghafar, A. S. A., Hajjaj, S. S. H., Gsangaya, K. R., Sultan, M. T. H., Mail, M. F. & Hua, L. S. (2023). Design and development of a robot for spraying fertilizers and pesticides for agriculture. Materials Today: Proceedings, 81, 242–248. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.174>

Quellenverzeichnis (7/13)

- Global Energy Solutions e.V. (2022). Klimafreundlicher Stahl Factsheet. https://global-energy-solutions.org/wp-content/uploads/2022/08/factsheet_stahl_DE.pdf#:~:text=Bei%20der%20Stahlproduktion%20kommt%20es%20auch%20hier%20zu,entstehen%20zus%C3%A4tzliche%20Kosten%20f%C3%BCr%20das%20Abfangen%20von%20CO2
- GMI. (2022). Truck platooning market. <https://www.gminsights.com/industry-analysis/truck-platooning-market>
- Göggerle, T. (2020). Precision-farming: Warum teilflächenspezifisch wirtschaften?. <https://www.agrarheute.com/technik/precision-farming-teilflaechenspezifisch-wirtschaften-569816>
- Groher, T., Heitkämper, K., Walter, A., Liebisch, F. & Umstätter, C. (2020). Status quo of adoption of precision agriculture enabling technologies in Swiss plant production. Precision Agriculture, 21, 1327–1350. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09723-5>
- Grömbling, M. (2022). Inflation: Zwei von fünf Unternehmen bleiben auf hohen Kosten sitzen. <https://www.iwkoeln.de/presse/pressemitteilungen/michael-groembling-zwei-von-fuenf-unternehmen-bleiben-auf-hohen-kosten-sitzen.html>
- Hahne, J. & Clauß, M. (2022). Emissionen aus der Tierhaltung. <https://www.thuenen.de/de/themenfelder/nutztierhaltung-und-aquakultur/emissionen-mehr-als-nur-gestank>
- Handelsblatt. (2019). Digitalisierung erhöht den Wettbewerbsdruck. <https://www.handelsblatt.com/technik/it-internet/bitkom-studie-digitalisierung-erhoeht-den-wettbewerbsdruck/24203818.html>
- Handelsblatt (Neuerer, D.). (2021). Schnelles Internet: Kommunen warnen vor digitaler Spaltung. <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/abgehaengte-laendliche-regionen-schnelles-internet-kommunen-warnen-vor-digitaler-spaltung/27380092.html>
- Handelsblatt (Neuerer, D.). (2022). Das sind die größten Datenschutz-Ärgernisse für Unternehmen <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/dsgvo-regeln-das-sind-die-groessten-datenschutz-aergernisse-fuer-unternehmen/28707246.html>
- Handelsblatt. (2023a). 3D-Druck: die Antwort auf den Fachkräftemangel in der Baubranche. <https://www.handelsblatt.com/adv/firmen/fachkraeftemangel-baubranche.html>
- Handelsblatt. (2023b). Digitale Gebäudesanierung senkt Energieverbrauch und CO2 Emissionen. <https://www.handelsblatt.com/adv/presseportal/schneider-electric-gmbh-digitale-gebaeudesanierung-senkt-energieverbrauch-und-co2-emissionen/29418850.html>
- Hartmann, M. (2023). Für klimaneutrale Gebäude braucht es auch digitale Technologien. https://www.focus.de/earth/experten/waermepumpen-smart-meter-sektorenkopplung-technologien-fuer-den-klimaneutralen-gebaeudebestan_id_190452494.html
- HBEFA. (2024). Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs. <https://www.hbefa.net/de/software#online-version>
- Heeke, M. (2021). Wie funktioniert das Stromnetz?. <https://www.mdr.de/wissen/faszination-technik/wie-funktioniert-unser-stromnetz-100.html>
- Heidelberg Materials. (2021). HeidelbergCement produziert Zement mit klimaneutralem Brennstoffgemisch unter Einsatz von Wasserstofftechnologie. <https://www.heidelbergmaterials.com/de/pi-01-10-2021>
- Henkel. (2021). Der Digital Twin als Wegbereiter der Fabrik von morgen. <https://www.henkel.de/spotlight/2021-11-04-der-digital-twin-als-wegbereiter-der-fabrik-von-morgen-1406300>
- Heo, J. Y., HyounSeok, M., Chang, S. C., Han, S. & Lee, D. (2021). Case study of solar photovoltaic power-plant site selection for infrastructure planning using a BIM-GIS-based approach. Applied sciences, 11(18), 8785. <https://doi.org/10.3390/app11188785>
- Holcim. (2022). Successful Transformation 2022 integrated annual report. <https://www.holcim.com/sites/holcim/files/2023-02/24022023-finance-holcim-fy-2022-report-full-en-3914999618.pdf>
- Honna, M., Parikh, V., Chakka, S. & Hughes, H. (2022). Grid Resilience: The Opportunity of the Digital Twin. <https://www.infosys.com/iki/perspectives/grid-resilience-digital-twin.html>
- Horndasch, J. (2020). Die Wiese von oben gedüngt. <https://www.swp.de/lokales/geislingen/landwirtschaft-die-wiese-von-oben-geduengt-46264344.html>
- HTWG Konstanz. (2018). Klinikum Frankfurt-Höchst, BAM Deutschland AG Projektzusammenfassung. https://www.htwg-konstanz.de/fileadmin/pub/konferenzen/applied5d/Projektzusammenfassung_Klinikum_Frankfurt_Hoehchst.pdf
- IBISWorld. (2023a). Baugewerbe in Deutschland Marktforschung, Kennzahlen, Statistiken, Studien und Analysen. <https://www.ibisworld.com/de/branchenreporte/baugewerbe/38/>

Quellenverzeichnis (8/13)

- IBISWorld. (2023b). Erste Bearbeitung von Eisen und Stahl in Deutschland.
<https://www.ibisworld.com/de/branchenreporte/erste-bearbeitung-eisen-stahl/1018/#:~:text=Der%20Umsatz%20der%20Branche%20der,voraussichtlich%20%2C9%20%25%20betragen>
- IBISWorld. (2023c). Verwaltung von Immobilien in Deutschland Marktforschung, Kennzahlen, Statistiken, Studien und Analysen.
<https://www.ibisworld.com/de/branchenreporte/verwaltung-immobilien/372/>
- IEA. (2023). Germany.
<https://www.iea.org/countries/germany>
- Inoue, Y. (2020). Satellite- and drone-based remote sensing of crops and soils for smart farming – A review. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66(6), 798-810.
<https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1738899>
- Joseph, R. B., Lakshmi, M. B., Salini, S., & Ramasamy, S. (2020). Innovative Analysis of Precision Farming Techniques with Artificial Intelligence. *Proceedings of the International Conference on Innovations in Mechanical Engineering and Industrial Applications*, 353-358.
<https://doi.org/10.1109/ICIMIA48430.2020.9074937>
- Karydas, C., Chatziantoniou, M., Stamkopoulos, K., Iatrou, M., Vassiliadis, V. & Mourelatos, S. (2023). Embedding a precision agriculture service into a farm management information system - ifarma/PreFer. *Smart Agricultural Technology*, 4, 100175.
<https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100175>
- KBA. (2023). Verkehrsaufkommen 2022.
https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/deutscher>Lastkraftfahrzeuge/vd_Verkehrsaufkommen/vd_verkehrsaufkommen_node.html;jsessionid=5ADE2268FC58019B6F932481AE6659FB.live11311
- Klima- und Energiefonds. (2012). Smart Loss Reduction.
<https://www.klimafonds.gv.at/wp-content/uploads/sites/16/BGR0092012SESmart-Loss-Reduction.pdf>
- Knitterscheidt, K. (2023). Milliarden für den Systemwechsel: Die Aussichten für die deutsche Stahlbranche sind düster.
<https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/serie-branchenausblick-milliarden-fuer-den-systemwechsel-die-aussichten-fuer-die-deutsche-stahlbranche-sind-duester/28899942.html>
- Kohl, E. (2021). Homöopathie für den Acker aus der Luft.
https://rp-online.de/nrw/staedte/rheinberg/bio-hof-in-alpen-betreibt-pflanzenschutz-mit-drohnen_aid-57234311
- Kracht, Sylvia. (2019). Anforderungen an BIM- und FM-Projekträume.
https://www.bisg-ev.de/sites/default/files/download/bcscadit_bimdatenschutz_acm-2019-06-flyer.pdf
- Krapp, C. (2023). Alternative Technologien zum Heizen werden immer beliebter.
<https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/waermepumpe-statt-gas-alternative-technologien-zum-heizen-werden-immer-beliebter/28930456.html>
- Küster Simic, A., Knigge, M. & Schönfeldt, J. (2020). Struktur, Entwicklung und Zukunft der deutschen Stahlindustrie.
https://www.boeckler.de/fpdf/HBS-007701/p_fofoe_WP_187_2020.pdf
- Kuttybay, N., Saymbetov, A., Mekhilef, S., Nurgaliyev, M., Tukymbekov, D., Dosymbetova, G., Meirkhanov, A. & Svanbayev, Y. (2020). Optimized Single-Axis Schedule Solar Tracker in different weather conditions. *Energies*, 13(19), 5226.
<https://doi.org/10.3390/en13195226>
- Lehmann, S. (2020). Autonomes Fahren: Markt wächst bis 2030 auf 13,7 Milliarden US-Dollar.
<https://logistik-heute.de/news/autonomes-fahren-markt-waechst-bis-2030-auf-13-7-milliarden-us-dollar-29681.html>
- Lemmer Fullwood. (2023a). Herdenmanagement.
<https://www.lemmer-fullwood.info/loesungen/herdenmanagement/fullexpert/>
- Lemmer Fullwood. (2023b). Volle Übersicht über die Herde: 24/7, von jedem Platz im Stall.
<https://www.lemmer-fullwood.info/loesungen/herdenmanagement/fullbeacon-1/>
- Li, S., Patnaik, S. & Li, J. (2023). IoT-based technologies for wind energy microgrids management and control. *Electronics*, 12(7), 1540.
<https://doi.org/10.3390/electronics12071540>
- Lico, E. & Barr, A. (2022). Wind industry faces a perfect storm of profit pressures.
<https://www.woodmac.com/news/opinion/wind-industry-faces-a-perfect-storm-of-profit-pressures/>
- Liebich, T. (2016). BIM Standards für den Infrastrukturbereich.
https://www.buildingsmart.de/sites/default/files/2020-03/Liebich%28AEC3%29_BIM%20Standards%20fu%CC%88r%20Infrastruktur_Austausch%20mit%20Verba%CC%88nden.pdf
- Ludwig, A., Rodrigues, C. M. G., Zhang, Z., Zhang, H., Karimi-Sibaki, E., Barati, H., Vakhrushev, A., Al-Nasser, M., Wu, M. & Kharicha, A. (2021). Important key process simulations in the field of steel metallurgy. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 167(1), 2-9.
<https://doi.org/10.1007/s00501-021-01184-1>
- Maloku, D. (2020). Adoption of precision farming technologies: USA and EU situation. *SEA - Practical Application of Science*, 8(22), 7-14.
https://seaopenresearch.eu/Journals/articles/SPAS_22_1.pdf

Quellenverzeichnis (9/13)

- Market Research Future. (2024). Truck platooning market. https://www.marketresearchfuture.com/reports/truck-platooning-market-6278?utm_term=&utm_campaign=&utm_source=adword_s&utm_medium=ppc&hsa_acc=2893753364&hsa_cam=20823382727&hsa_grp=156072965253&hsa_ad=683128373471&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa-2194013871021&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&qad_source=1&qclid=Cj0KCCiAKKqsBhC3ARiSAEEjuJiUWQfBYimUNfzYbf5g_9tY772gDR3UaWNPfZXLKwXSmy1GMxF2K8aAsD9EALw_wcB
- MarketsandMarkets. (2023). Truck platooning market. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/truck-platooning-market-157561428.html#:~:text=The%20truck%20platooning%20market%20is,60.96%25%20during%20the%20forecast%20period>
- Masi, M. G., Di Pasquale, J., Vecchio, Y., & Capitanio, F. (2023). Precision Farming: Barriers of variable rate technology adoption in Italy. *Land*, 12(5), 1084. <https://doi.org/10.3390/land12051084>
- Michel, J. (2022). CO2-Grenzausgleich der EU wird Düngemittel verteuern. <https://www.agrarheute.com/politik/co2-grenzausgleich-eu-duengemittel-verteuern-601620>
- Microdrones. (2020). Increasing farming productivity using agricultural drone surveying equipment from microdrones. <https://www.microdrones.com/en/content/increasing-farming-productivity-using-agricultural-drone-surveying-equipment-from-microdrones/>
- Mirzakhani, H., Singh, M., Dixit, A., Prakash, A., Sharda, S., Kaur, J., & Nafchi, A. M. (2022). Performance assessment of a sensor-based variable-rate real-time fertilizer applicator for rice crop. *Sustainability*, 14(18), 11209. <https://doi.org/10.3390/su141811209>
- Misra, N., Dixit, Y., Al-Mallahi, A., Bhullar, M., Upadhyay, R. & Martynenko, A. (2022). IoT, big data, and artificial intelligence in agriculture and food industry. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(9), 6305–6324. <https://doi.org/10.1109/jiot.2020.2998584>
- Mohammad, A. & Mahjabeen, F. (2023). Revolutionizing Solar Energy: The impact of artificial intelligence on photovoltaic systems. <https://jurnal.itscience.org/index.php/ijmdsa/article/view/2599/2004>
- Nachtwey, T. & Schmid, U. (2022). Digitale Technik beschleunigt Dekarbonisierung. <https://www.cio.de/a/digitale-technik-beschleunigt-dekarbonisierung,3697146>
- Nathusius, I. (2023). Chemieindustrie im Würgegriff. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/chemiebranche-energiekosten-100.html>
- Netz + Service. (2023). Netzverluste. <https://netzplusservice.de/fuer-partner/fuer-marktpartner/netzverluste/>
- OECD. (2022). Gross domestic spending on R&D. <https://data.oecd.org/rd/gross-domestic-spending-on-r-d.htm>
- Olk, J. (2023). Hohe Preise bedrohen den Standort Deutschland. <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/energiekosten-hohe-preise-bedrohen-den-standort-deutschland/29361760.html>
- Onvista. (2023). Heidelberg Materials Kennzahlen. <https://www.onvista.de/aktien/kennzahlen/HeidelbergCement-Aktie-DE0006047004?referrer>
- Pém, J. & Dvořáková, I. (2022). Case study: How our client earned up to EUR 2 million more thanks to digital twins. <https://kpmg.com/cz/en/home/insights/2022/10/digital-twin.html>
- Pieringer, M. (2019). Lkw-Platoons: Praxistest-Partner sehen große Potenziale. *Logistik Heute*. <https://logistik-heute.de/news/lkw-platoons-praxistest-partner-sehen-grosse-potenziale-17496.html>
- PlanRadar. (2021). BIM adoption in Europe: 7 countries compared. <https://www.planradar.com/bim-adoption-in-europe/>
- Pomar, C., & Remus, A. (2019). Precision pig feeding: a breakthrough toward sustainability. *Animal Frontiers*, 9(2), 52–59. <https://doi.org/10.1093/af/vfz006>
- Pomar, C., van Milgen, J. & Remus, A. (2019). Precision livestock feeding, principle and practice. https://www.feed-a-gene.eu/sites/default/files/documents/pomar_2019_precision_livestock_feeding_principle_practice.pdf
- Porsche. (2023). 3D-Druck-Technik optimiert Kolben für den leistungsstarken 911 GT2 RS. <https://media.porsche.com/mediakit/porsche-innovationen/de/porsche-innovationen/3d-printed-pistons>
- Rejeb, A., Abdollahi, A., Rejeb, K. & Treiblmaier, H. (2022). Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107017. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107017>
- Research and Markets. (2022). Germany Wind Energy Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2022 - 2027). <https://www.researchandmarkets.com/reports/5012533/germany-wind-energy-market-growth-trends>

Quellenverzeichnis (10/13)

- Research and Markets. (2023). Variable Rate Technology (VRT): Global Strategic Business Report. Research and Markets Ltd 2023.
<https://www.researchandmarkets.com/reports/4806368/variable-rate-technology-vrt-global-strategic>
- Research and Markets. (2024). Germany Solar Energy - Market Share Analysis, Industry Trends & Statistics, Growth Forecasts 2020-2029.
<https://www.researchandmarkets.com/reports/5025492/germany-solar-energy-market-share-analysis>
- Rieder, J. (2023). Wie KI hilft, Immobilien nachhaltiger zu machen.
<https://www.handelsblatt.com/finanzen/immobilien/energetische-sanierung-wie-ki-hilft-immobilien-nachhaltiger-zu-machen/29263990.html>
- RSC. (2016). Energieertragsberechnung für Windkraftanlagen.
https://www.enzkreis.de/media/custom/2032_3695_1.PDF?1462518715
- RSC. (2016). Energieertragsberechnung für Windkraftanlagen.
https://www.enzkreis.de/media/custom/2032_3695_1.PDF?1462518715
- Saarstahl AG. (2023). Geschäftsbericht 2022.
<https://www.saarstahl.de/sag/de/konzern/medien/publikationen/geschaeftsberichte/index.shtml>
- Salzgitter AG. (2023). Der Salzgitter-Konzern in Zahlen.
<https://www.salzgitter-ag.com/de/konzern/konzernzahlen.html>
- Scatec. (2022). Annual Report 2022.
https://scatec.com/wp-content/uploads/sites/7/2023/03/Scatec-Annual-Report_2022.pdf
- Schillings, J., Bennett, R. & Rose, D. C. (2021). Exploring the potential of precision livestock farming technologies to help address farm animal welfare. *Frontiers in animal science*, 2.
<https://doi.org/10.3389/fanim.2021.639678>
- Schimmelpfennig. (2016). Cost savings from precision agriculture technologies on U.S. corn farms.
https://www.researchgate.net/publication/301891880_Cost_Savings_From_Precision_Agriculture_Technologies_on_US_Corn_Farms
- Schlautmann, C. (2023). Verbrauchern drohen höhere Preise.
<https://www.handelsblatt.com/unternehmen/handel-konsumgueter/lkw-maut-steigt-drastisch-verbrauchern-drohen-hoehere-preise/29492808.html>
- Schlömer, S., Bruckner, T., Fulton, L., Hertwich, E., McKinnon, A., Perczyk, D., Roy, J., Schaeffer, R., Sims, R., Smith, P., & Wisser, R. (2014). Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, & J. C. Minx (Eds.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf
- Schmidt, T. (2022). Sonnenscheindauer: Ist es im Süden Deutschlands grundsätzlich sonniger als im Norden?
<https://www.rnd.de/wissen/sonnenscheindauer-in-sueddeutschland-und-norddeutschland-mehr-sonne-im-sueden-UJXJFTSN2FFOZKS5NXQMBGB3IQ.html#:~:text=Theoretisch%20w%C3%BCrde%20die%20Sonne%20sogar,am%20n%C3%B6rdlichen%20Polarkreis%204647%20Stunden>
- Schwenk. (2020). Pilotprojekt der Zementhersteller plant künftig abgeschiedenes CO2 als Rohstoff für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe zu nutzen.
<https://www.schwenk.de/pilotprojekt-der-zementhersteller-plant-kuenftig-abgeschiedenes-co2-als-rohstoff-fuer-die-herstellung-synthetischer-kraftstoffe-zu-nutzen/>
- Shi, Y., Chen, M., Wang, X., Wang, Z., Yu, H., & Hao, X. (2023). Efficiency analysis and evaluation of centrifugal variable-rate fertilizer spreading based on real-time spectral information on rice. *Computers and Electronics in Agriculture*, 204, 107505.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107505>
- Siemens AG. (2021). Siemens Elektronikwerk Amberg als digitale Leuchtturmfabrik benannt.
<https://press.siemens.com/de/de/pressemitteilung/siemens-elektronikwerk-amberg-als-digitale-leuchtturmfabrik-benannt>
- Sieverding, U. & Schneidewindt, H. (2016). Blockchain in der Energiewirtschaft.
<https://library.fes.de/pdf-files/wiso/12996.pdf>
- SMS Group. (2023). The digital twin - as real as steel.
<https://www.sms-group.com/de-de/services/lifecycle-partnership/the-digital-twin-as-real-as-steel>
- Sourav, A. I. & Emanuel, A. W. R. (2021). Recent trends of big data in precision agriculture: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1096(1), 012081.
<https://doi.org/10.1088/1757-899x/1096/1/012081>
- Späti, K. (2022). Economics and Policy of Precision Agriculture: The Case of Variable Rate Fertilization in Switzerland [PhD dissertation]. ETH Zurich.
https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/600987/Dissertation_Karin_Sp%C3%A4ti.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Quellenverzeichnis (11/13)

- SSAB. (2018). SmartSteel 1.0 - The first step toward an internet of materials.
<https://www.ssab.com/en/news/2018/05/smartsteel-10-the-first-step-toward-an-internet-of-materials>
- Stark, R., Hayka, H., Israel, J. H., Kim, M., Müller, P. & Völlinger, U. (2011). Virtuelle Produktentstehung in der Automobilindustrie.
https://www.researchgate.net/publication/220352802_Virtuelle_Produktentstehung_in_der_Automobilindustrie
- Statista. (2023a). Treibhausgasemissionen des deutschen Bauhauptgewerbes in den Jahren 2000 bis 2021.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/476879/umfrage/treibhausgasemissionen-des-deutschen-bauhauptgewerbes/>
- Statista. (2023b). Umsatz der Stahlindustrie in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2022.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/74060/umfrage/umsatzerloese-in-der-stahlindustrie-in-deutschland-seit-1995/>
- Statista. (2024a). Anteil der Lkw an der Transportleistung im Güterverkehr in Deutschland von 2013 bis 2026*.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12195/umfrage/anteil-der-lkw-am-gueterverkehr-in-deutschland/>
- Statista. (2024b). Anteil der Wirtschaftszweige an der Bruttowertschöpfung in Deutschland im Jahr 2022.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36846/umfrage/anteil-der-wirtschaftsbereiche-am-bruttoinlandsprodukt/>
- Statista. (2024c). Anzahl der steuerpflichtigen Unternehmen der Branche Verwaltung von Grundstücken, Gebäuden und Wohnungen für Dritte in Deutschland von 2009 bis 2020.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/368617/umfrage/unternehmen-der-branche-verwaltung-von-grundstuecken-gebaeuden-und-wohnungen/>
- Statista. (2024d). Anzahl der Stromnetzbetreiber in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2023.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/152937/umfrage/anzahl-der-stromnetzbetreiber-in-deutschland-seit-2006/>
- Statista. (2024e). Statistiken zum Thema nachhaltige Logistik- und Gütertransportbranche.
<https://de.statista.com/themen/10337/nachhaltige-logistik-und-guetertransportbranche/#editorsPicks>
- Statista. (2024f). Statistiken zum Thema Transport und Logistik.
<https://de.statista.com/themen/733/transport-und-logistik/#topicOverview>
- Straßen.NRW. (2022). BIM Umsetzung bei Straßen.NRW.
https://www.strassen.nrw.de/files/a_snrw-2022/dokumente/O1_planen-und-bauen/O8_Infos-Umsetzungspartner/O2_BIM/BIM%20bei%20Stra%C3%9Fen%20NRW.pdf
- Streit. (2024). PV Planungssoftware kostenlos nutzen - Top 13 Softwares im Vergleich.
<https://www.streit-software.de/wissen/pv-planungssoftware#c8006>
- Strom-Report. (2023). Photovoltaik in Deutschland.
<https://strom-report.com/photovoltaik/#:~:text=Wie%20viele%20Photovoltaikanlagen%20gibt%20es,Anteil%20von%2012%25%20am%20Strommix>
- Sutaria, R. (2023). Moving toward a sustainable future with IoT-driven solar energy systems.
<https://www.iot-now.com/2023/07/14/132946-moving-toward-a-sustainable-future-with-iot-driven-solar-energy-systems/>
- Thyssenkrupp. (2022). Wie wir das Zementwerk der Zukunft gestalten.
<https://insights.thyssenkrupp-polysius.com/de/story/wie-wir-das-zementwerk-der-zukunft-gestalten.pdf>
- Thyssenkrupp. (2023a). Annual report 2022/2023.
https://d2zo35mdb530wx.cloudfront.net/_binary/UCPthyssenkruppAG/cd0ce7a9-baff-4b56-a400-8c871c778441/Annual-Report-2022_2023-thyssenkrupp.pdf
- Thyssenkrupp. (2023b). Smarte Sensorik für die Stahlproduktion.
<https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/unternehmen/digitalisierung/smart-factory/smart-factory.html>
- UBA. (2020a). Dekarbonisierung der Zementindustrie.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/factsheet_zementindustrie.pdf
- UBA. (2020b). Material- und Energieeffizienz in der Zementindustrie.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/material-energieeffizienz-in-der-zementindustrie>
- UBA. (2021). Emissionsquellen.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-emissionen/emissionsquellen#energie-stationar>
- UBA. (2021). Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgas-Emissionen für das Jahr 2020. [Datensatz].
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2021_03_10_trendtabellen_thg_na_ch_sektoren_v1.0.xlsx
- UBA. (2023a). Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgas-Emissionen.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas#treibhausgas-emissionen-aus-der-landwirtschaft>
- UBA. (2023b). CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom stiegen in 2022.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-stiegen-in>

Quellenverzeichnis (12/13)

- UBA. (2023c). Dekarbonisierung von Energieinfrastrukturen. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_08-2023_dekarbonisierung_von_energieinfrastrukturen.pdf
- UBA. (2023d). Emissionen der Landnutzung, -änderung und Forstwirtschaft. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-der-landnutzung-aenderung#bedeutung-von-landnutzung-und-forstwirtschaft>
- UBA. (2023e). Emissionen des Verkehrs. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#verkehr-belastet-luft-und-klimaminderungsziele-der-bundesregierung>
- UBA. (2023f). Emissionsübersichten nach Sektoren des Bundesklimaschutzgesetzes. https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.umweltbundesamt.de%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fmedien%2F361%2Fdokumente%2F2023_03_15_em_entwicklung_in_d_ksg-sektoren_pm.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK
- UBA. (2023g). Energiesparende Gebäude. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/energiesparende-gebäude#gebäude-wichtig-für-den-klimaschutz>
- UBA. (2023h). Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2022. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023_05_23_climate_change_20-2023_strommix_bf.pdf
- UBA. (2023i). Erstmals über die Hälfte des Stroms in Deutschland erneuerbar. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/erstmals-ueber-die-haelfte-des-stroms-in>
- UBA. (2023j). Indikator: Treibhausgas-Emissionen der Industrie. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-treibhausgas-emissionen-der-industrie#die-wichtigsten-fakten>
- UBA. (2023k). Kernindikatoren des Projektionsberichtes 2023. [Datensatz]. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/dokumente/deutscher_projektionsbericht2023_kernindikatoren_0_2.0.xlsx
- UBA. (2023l). Projektionsbericht 2023 für Deutschland. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/39_2023_cc_projektionsbericht_2023.pdf
- UBA. (2023m). Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung>
- UBA. (2023n). Wie hoch sind die Treibhausgasemissionen pro Person in Deutschland durchschnittlich? [https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wie-hoch-sind-die-treibhausgasemissionen-pro-person#:~:text=Wie%20hoch%20sind%20die%20Treibhausgasemissionen%20pro%20Person%20in%20Deutschland%20durchschnittlich%3F,-06.04.2023%2098&text=Der%20deutsche%20Aussto%C3%9F%20an%20Treibhausgasen,\(CO2e\)%20pro%20Jahr.](https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wie-hoch-sind-die-treibhausgasemissionen-pro-person#:~:text=Wie%20hoch%20sind%20die%20Treibhausgasemissionen%20pro%20Person%20in%20Deutschland%20durchschnittlich%3F,-06.04.2023%2098&text=Der%20deutsche%20Aussto%C3%9F%20an%20Treibhausgasen,(CO2e)%20pro%20Jahr.)
- UBA. (2023o). UBA-Prognose: Treibhausgasemissionen sanken 2022 um 1,9 Prozent. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/uba-prognose-treibhausgasemissionen-sanken-2022-um>
- UBA. (2024a). Emissionsdaten. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/emissionsdaten#hbefa>
- UBA. (2024b). Fahrleistungen, Verkehrsleistung und Modal Split. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#fahrleistung-im-personen-und-guterverkehr>
- UBA. (2024c). Lachgas und Methan. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/lachgas-methan>
- UBA. (2024d). Treibhausgas-Emissionen nach Kategorien. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#treibhausgas-emissionen-nach-kategorien>
- Udo, W. & Muhammad, Y. (2021). Data-Driven Predictive maintenance of wind turbine based on SCADA data. IEEE Access, 9, 162370-162388. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3132684>
- UNFCCC. (2022). Germany. 2022 National Inventory Report (NIR). <https://unfccc.int/documents/461930>
- vbw. (2021). Constructing our future. Planen. Bauen. Leben. Arbeiten. https://www.vbw-zukunftsrat.de/downloads/2021/vbw_ZKR_2021_ConstructingOurFuture_Studie.pdf
- vbw. (2023). Internationaler Energiepreisvergleich für die Industrie. https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Freizugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2023/Downloads/vbw-Studie_Internationaler-Energiepreisvergleich_Oktober-2023.pdf
- VCI. (2017). Chemie 4.0 Wachstum durch Innovation in einer Welt im Umbruch. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/vci-deloitte-studie-chemie-4-punkt-0-kurzfassung.pdf>

Quellenverzeichnis (13/13)

- VCI. (2023). Daten und Fakten im Überblick Branchenporträt. <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/branchenportraet-2023.pdf>
- VCI. (2024). Chemiewirtschaft in Zahlen online. <https://www.vci.de/die-branche/zahlen-berichte/chemiewirtschaft-in-zahlen-online.jsp>
- VDE FNN. (2023). Das Stromnetz in Deutschland: Was es kann und wie es funktioniert. <https://backbone.vde.com/das-stromnetz-was-es-kann-wie-es-funktioniert/>
- VDZ. (2020). Zementindustrie stellt sich umwelt- und klimapolitischen Herausforderungen. <https://www.vdz-online.de/aktuelles/zementindustrie-stellt-sich-umwelt-und-klimapolitischen-herausforderungen>
- VDZ. (2023a). Klimaschutz. <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/klimaschutz/uebersicht#:~:text=Die%20Herstellung%20einer%20Tonne%20Zement,aktuell%20auf%20etwa%2020%20Mio>
- VDZ. (2023b). Zementindustrie im Überblick 2023/2024. https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/zementindustrie_ueberblick/VDZ_Zementindustrie_im_Ueberblick_2023-2024.pdf
- VDZ. (2023c). Zementindustrie: Weg zur Klimaneutralität erfordert praxistaugliche Regeln. <https://www.vdz-online.de/aktuelles/zementindustrie-weg-zur-klimaneutralitaet-erfordert-praxistaugliche-regeln#:~:text=Die%20deutsche%20Zementindustrie%20hat%20sich,CO%E2%82%82%20Deffizienterer%20Zemente%20und%20Betone>
- VDZ. (2024). Klimaschutz. <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/klimaschutz/uebersicht>
- Vigna, M., Bocharnikova, Y., Shalaeva, A., Marbach, Q., (2023). Carbonomics. <https://www.goldmansachs.com/intelligence/pages/g-s-research/carbonomics-updated-cost-curve-shows-diverging-trends/report.pdf>
- von Kittlitz, V. (2022). Warum wir jetzt keinen Mist bauen dürfen. <https://www.deutschlandfunkkultur.de/neubau-klimaziele-nachhaltigkeit-bezahlbares-wohnen-100.html>
- WEF. (2022). Winning the Race to Net Zero: The CEO Guide to Climate Advantage. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Winning_the_Race_to_Net_Zero_2022.pdf
- Wimhurst, J., Nsude, C. & Greene J. (2023) Standardizing the factors used in wind farm site suitability models: A review. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023031109#sec3>
- WindEurope. (2021). Wind energy digitalisation towards 2030. <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-digitalisation-towards-2030/>
- Wirtschaftsvereinigung Stahl. (2022a). Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland. https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Fakten-2022_RZ_neu_Web.pdf
- Wirtschaftsvereinigung Stahl. (2022b). Wesentliche Daten und Fakten rund um Stahl und die Stahlindustrie auf einen Blick. <https://www.stahl-online.de/startseite/stahl-in-deutschland/zahlen-und-fakten/>
- Wirtschaftsvereinigung Stahl. (2023). Daten und Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland. https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Fakten-2023_Web.pdf
- WOTech. (2023). Der Weg zur klimaneutralen Stahlproduktion und darüber hinaus. https://www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2023/03/04_ssg_stahl_03j2023/04_ssg_stahl_03j2023.php
- WWF. (2019). Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie. https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Klimaschutz_in_der_Beton-_und_Zementindustrie_WEB.pdf
- YAVEON. (2023). ERP für die Chemie-Branche. <https://www.yaveon.de/referenzen/farrl/>
- Zajonz, D. (2023). Wie die Zementindustrie ihr Klima-Problem lösen will. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/energie/zement-industrie-energieverbrauch-klimaschutz-100.html>
- Zanoli, S. M., Pepe, C. & Orlietti, L. (2023). Synergic combination of hardware and software innovations for energy efficiency and process control improvement: a steel industry application. *Energies*, 16(10), 4183. <https://doi.org/10.3390/en16104183>
- ZfK. (2021). Europas größte Netzleitwarte setzt auf neue Technologien. <https://www.zfk.de/energie/strom/europas-groesste-netzleitwarte-setzt-auf-neue-technologien>
- Zimmermann, H. & Frank, D. (2019). Künstliche Intelligenz für die Energiewende: Chancen und Risiken. <https://www.germanwatch.org/sites/germanwatch.org/files/K%C3%BCnstliche%20Intelligenz%20f%C3%BCr%20die%20Energiewende%20-%20Chancen%20und%20Risiken.pdf>

Impressum

SEED-Index 2023

Erstellt im Auftrag des Vodafone Institut für Gesellschaft und Kommunikation GmbH
Behrenstraße 18
10117 Berlin
www.vodafone-institut.de

Bearbeitet von:
Accenture GmbH
Campus Kronberg 1
61476 Kronberg im Taunus
www.accenture.de

Layout: Blomqvist Design GmbH & Co. KG
Stand: April 2024

Alle Inhalte dieses Werkes, insbesondere Texte, Abbildungen und Grafiken, sind urheberrechtlich geschützt. Das Urheberrecht liegt, soweit nicht ausdrücklich anders gekennzeichnet, bei Accenture / Vodafone Institut. Jede Art der Vervielfältigung, Verbreitung, öffentlichen Zugänglichmachung oder andere Nutzung bedarf der ausdrücklichen, schriftlichen Zustimmung von Accenture / Vodafone Institut.

Zitate im Sinne von § 51 UrhG sollen mit folgender Quellenangabe versehen sein: Accenture, Vodafone Institut für Gesellschaft und Kommunikation; 2024