

Klimaeffekte der Digitalisierung 2.0

Studie zur Abschätzung des Beitrags digitaler Technologien zum Klimaschutz in Deutschland

Durchgeführt von: **accenture**

Agenda

1	Zusammenfassung und Fazit	3
2	Ergebnisübersicht	5
3	Zielstellung und Methodik	13
4	Einsparpotenzial digitaler Technologien	21
5	Fußabdruck digitaler Technologien	85
6	Rebound-Effekte	90
7	Projektleitung und Projektteam	93
8	Anhang: Annahmen und Quellen	95

Zusammenfassung und Fazit (1/2)



Faktor 2,5: Das ist die Beschleunigung, die es jetzt bei der CO₂-Reduktion^a braucht.

Denn bis 2030 muss Deutschland 308 Millionen Tonnen CO₂ einsparen. Dazu hat sich die Bundesregierung mit der Novellierung des Klimaschutzgesetzes 2021 verpflichtet.

In den letzten 32 Jahren (1990–2022) hat Deutschland seine Emissionen um 40,4 Prozent reduziert, während das Bruttoinlandsprodukt (BIP) im gleichen Zeitraum um ca. 197 Prozent gewachsen ist.^b Das heißt, dass die Emissionen im Vergleich zum Jahr 1990 um 505 Millionen Tonnen geringer waren. Deutschland hat also jedes Jahr durchschnittlich 16 Millionen Tonnen weniger emittiert als im Jahr davor; unter anderem auch durch Sondereffekte wie den Rückbau der Schwerindustrie der ehemaligen DDR oder die Corona-Pandemie.

Um das Klimaziel 2030 zu erreichen, muss die Jahresemission im Jahr 2030 gegenüber 2022 um 308 Millionen Tonnen reduziert werden. Deutschland muss also bis 2030

jedes Jahr durchschnittlich 39 Millionen Tonnen CO₂ weniger ausstoßen, was einer notwendigen Beschleunigung der Reduktion um das 2,5-Fache entspricht.

Das zeigt: Die bisherige Geschwindigkeit, ein „Weiter so“, wird nicht ausreichen und es gilt jede Chance und jeden Hebel zu nutzen. Und dazu zählt auch die Digitalisierung.

Ziel und Gegenstand der Studie: die differenzierte Bezifferung des Beitrags digitaler Technologien zum Klimaziel 2030.

Die Quantifizierung berücksichtigt drei wichtige Faktoren:

Erstens, die Digitalisierungsgeschwindigkeit, d.h. in welchem Ausmaß digitale Technologien durch Unternehmen, öffentliche Institutionen und Privatpersonen bis 2030 umgesetzt werden. Es wird zwischen den Geschwindigkeiten „Standard“ und „beschleunigt“ unterschieden.^c

Zweitens, die Frage, wie sich Einflussfaktoren wie z.B. der

Stromemissionsfaktor, der Bruttostromverbrauch und die Elektrifizierung der Sektoren entwickeln.

Dazu wurden pro Sektor konkrete Einflussfaktoren identifiziert und CO₂-Projektionen entwickelt.^d

Drittens, der CO₂-Ausstoß digitaler Technologien, der bei Herstellung und Nutzung der digitalen Technologien – direkt oder indirekt – verursacht wird.^e

Ergebnis: Das Einsparpotenzial digitaler Technologien ist „netto-positiv“.

Digitale Technologien können wesentlich dazu beitragen, Deutschlands Klimaziele im Jahr 2030 zu erreichen. Die Untersuchung zeigt: Digitale Technologien können – je nach Szenario – netto 43 bis 80 Millionen Tonnen CO₂ einsparen. Das sind 14 bis 26 Prozent des genannten Minderungsziels in Höhe von 308 Millionen Tonnen CO₂. Diese Klimaeffekte ergeben sich wohl gemerkt nach Abzug des CO₂-Fußabdrucks der digitalen Technologien.

Zusammenfassung und Fazit (2/2)



Die Berechnungen zeigen: Im Jahr 2030 wird die Nutzung der beschriebenen digitalen Technologien ~2–4 Millionen Tonnen CO₂ verursachen, je nach Digitalisierungsgeschwindigkeit. Wird der CO₂-Ausstoß für die Herstellung und Entsorgung der digitalen Technologien hinzugerechnet, steigt der Fußabdruck auf ~6–11 Millionen Tonnen.^a

Das Einsparpotenzial digitaler Technologien ist also deutlich größer als der erzeugte CO₂-Ausstoß. Der sogenannte Enablement-Faktor liegt zwischen 6 und 9. Der Enablement-Faktor misst das Verhältnis zwischen den CO₂-Einsparungen und dem CO₂-Fußabdruck digitaler Technologien.^b

Entscheidender Hebel: die Digitalisierungsgeschwindigkeit.

Eine beschleunigte Digitalisierung ist in allen betrachteten Szenarien effektiver, d.h. geht mit deutlich höheren CO₂-Einsparungen einher. Beispiel mittleres Projektionsszenario: Bei beschleunigter Digitalisierung steigen die Einsparungen von 50 auf 73 MT CO₂, also um 47 Prozent.^c

Die Digitalisierung im Energie-, Gebäude- und Industriesektor ermöglicht die größten Beiträge für das nationale Klimaziel.

Die Sektoren Energie und Gebäude können ~9–10 Prozent zum Klimaziel 2030 beitragen; der Sektor Industrie bis zu 5 Prozent.^d

Die Digitalisierung im Energie-, Gebäude- und Landwirtschaftssektor ermöglicht die höchsten Beiträge innerhalb der Sektoren.

Wie oben beschrieben, tragen die digitalen Technologien zur Erreichung des nationalen Klimaziels 2030 bei. Gleichzeitig tragen sie zur Erreichung der Sektorziele bei bzw. leisten einen Dekarbonisierungsbeitrag relativ zu den jeweiligen Sektoremissionen.

Das höchste relative Einsparpotenzial hat der Energiesektor: Hier liegt das Reduktionspotenzial bei ~16 Prozent der projizierten Emissionen im Energiesektor. Im Gebäude- und im Landwirtschaftssektor liegt der relative Beitrag bei ~12–13 Prozent.^e

Sowohl in relativer als auch in absoluter Hinsicht weist der Verkehrssektor ein geringeres Einsparpotenzial auf.

Teilweise über 50 Prozentpunkte zusätzliche Marktdurchdringung zwischen 2023 und 2030.

Die Studienergebnisse zeigen einen signifikanten Anstieg der Marktdurchdringung bei digitalen Lösungen für die intelligente Erzeugung erneuerbarer Energien sowie Smart Grids – mit Steigerungen von 56 bzw. 40 Prozentpunkten zwischen 2023 und 2030.^f

Fazit

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die Digitalisierung ein wesentlicher Treiber für den Klimaschutz ist und einen bedeutenden Beitrag zur Erreichung der deutschen Klimaziele bis 2030 leisten kann. Dies unterstreicht die Dringlichkeit, sowohl im privaten als auch im öffentlichen Sektor Digitalisierungsprozesse zu intensivieren. Es ist daher entscheidend, dass die Politik die notwendigen Rahmenbedingungen schafft, um die Digitalisierung als zentrales Instrument im Kampf gegen den Klimawandel zu fördern und selbst zu nutzen.

2

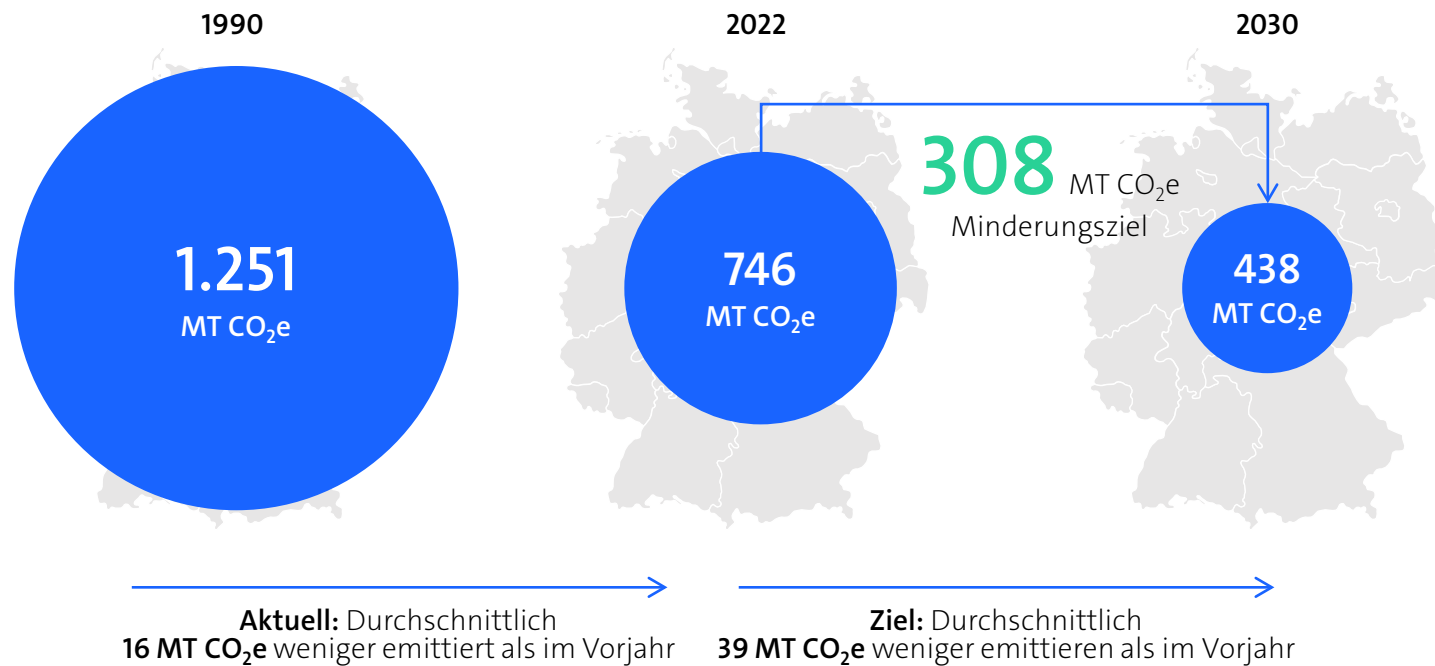
Ergebnisübersicht

1. Das aktuelle CO₂e-Minderungsziel für 2030
2. Beitrag digitaler Technologien zum Klimaziel 2030 – insgesamt
3. Beitrag digitaler Technologien zum Klimaziel 2030 – entlang von CO₂e-Projektionen
4. Beitrag digitaler Technologien zum Klimaziel 2030 – Sektoren
5. Absolute CO₂e-Einsparpotenziale
6. Relativer Beitrag innerhalb der Sektoren
7. Marktdurchdringung der digitalen Technologien



Ambitioniertes Klimaziel für Deutschland: Die jährlichen CO₂e-Emissionen müssen bis 2030 um 308 MT sinken

Aktuelles CO₂e-Minderungsziel in Deutschland für 2030



Die Reduktionsgeschwindigkeit muss um den Faktor 2,5 erhöht werden, damit das Klimaziel 2030 erreicht werden kann.

Die Bundesregierung hat 2021 mit der Novellierung des Klimaschutzgesetzes von 2019 das Klimaziel gesetzt, bis 2030 65% weniger Treibhausgase im Vergleich zu 1990 auszustoßen, was einer Reduktion auf 438 Mio. MT CO₂-Äquivalente (CO₂e^a) entspricht.¹ Bis 2045 soll CO₂e-Neutralität erreicht werden.^{2,3} Neben dem Gesamtminderungsziel^b, gibt es auch Ziele und erforderliche Maßnahmen pro Wirtschaftssektor.^{3,4,c}

Rückblick – In den letzten 32 Jahren (1990–2022) hat Deutschland seine Emissionen um 40,4% reduziert², während das BIP in diesem Zeitraum um ca. 197% gewachsen ist.^{1,5,6,d}

Minderungsziel – Um das Klimaziel 2030 zu erreichen, muss die Jahresemission in 2030, gegenüber 2022, um 308 MT CO₂e reduziert werden.^b

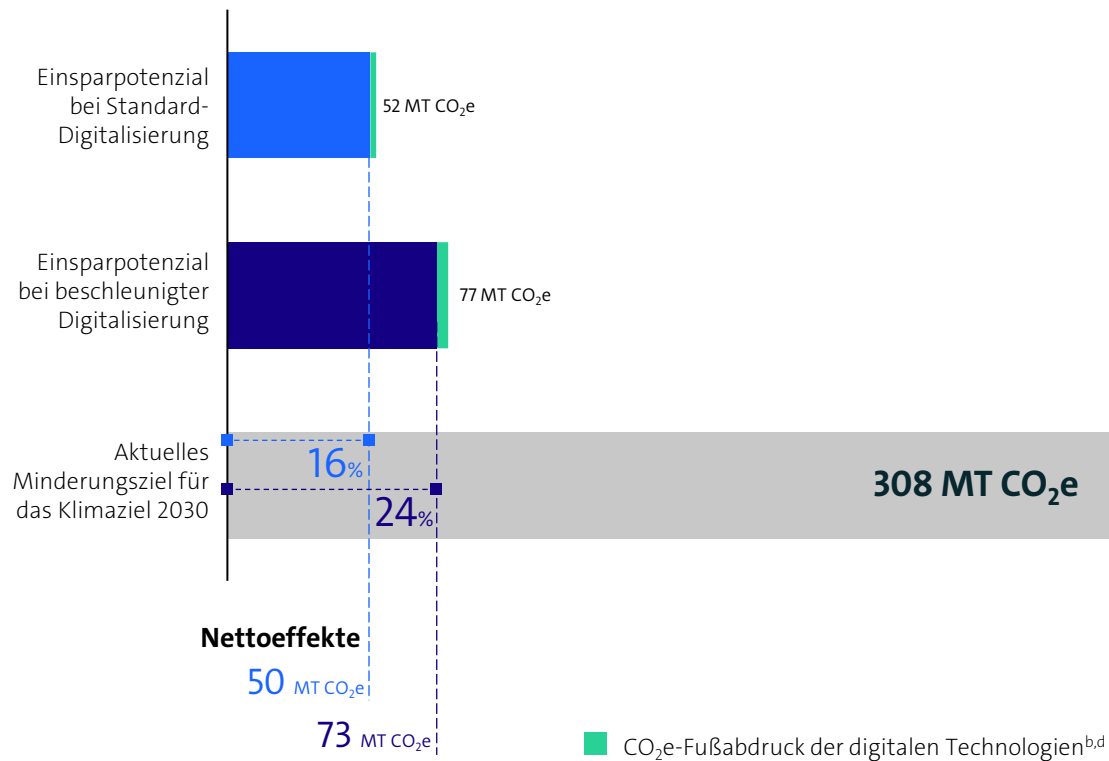
Ziel der Studie – Mit dieser Studie soll konkret das Potenzial digitaler Technologien für den Klimaschutz benannt und so das Erreichen des Klimaziels 2030 unterstützt werden.

Anmerkungen: a) CO₂e = Kohlenstoffdioxidäquivalente (Die Treibhausgase werden entsprechend ihrer klimaschädlichen Wirkung in die Berechnungsgröße CO₂e »übersetzt«); b) Auch Treibhausgasminderungsziele genannt; c) Das Klimaschutzgesetz befindet sich derzeit in Überarbeitung. Das Gesamtminderungsziel soll durch geplante Anpassungen der sektorspezifischen Ziele gestärkt werden; d) Grundlage des berechneten Wirtschaftswachstums sind die Werte zwischen 1991 und 2022; Quellen: 1) UBA (2023j); 2) Deutscher Bundestag (2023a); 3) Bundesregierung (2023); 4) BMJ & BfJ (2019); 5) DESTATIS (2023b); 6) DESTATIS (2023a).

Digitalisierung als wichtiger Hebel: Digitale Technologien können 24% zum Erreichen des deutschen Klimaziels 2030 beitragen

CO₂e-Einsparpotenzial und Beitrag zum Klimaziel (gesamt)

[Alle Zahlen in MT CO₂e bei mittlerer CO₂e-Projektion^a]



Gegenläufige CO₂e-Effekte: In dieser Studie werden zwei gegenläufige CO₂e-Klimaeffekte der Digitalisierung untersucht: Das CO₂e-Einsparpotenzial, das mit digitalen Technologien im Jahr 2030 erzielt werden kann und die Emissionen, die im Jahr 2030 durch den CO₂e-Fußabdruck der digitalen Technologien verursacht werden.

CO₂e-Einsparpotenzial: Unterschieden wird zwischen zwei Digitalisierungsgeschwindigkeiten:^b Bei der Standard-Digitalisierung können digitale Technologien ca. 51,5 MT CO₂e zum aktuellen Minderungsziel (308 MT CO₂e) des 2030-Klimaziels beitragen; bei einer beschleunigten Digitalisierung ca. 76,5 MT.^b

CO₂e-Fußabdruck der digitalen Technologien:^c Jede der betrachteten digitalen Technologien erzeugt eine spezifische Menge an CO₂e als ihren Fußabdruck. Die Berechnung zeigt: In 2030 wird die Nutzung^d der zugrundeliegenden IT-Technologie, je nach Digitalisierungsgeschwindigkeit und CO₂e-Projektion 0,8–6,0 MT CO₂e verursachen. In der Grafik

dargestellt ist die mittlere CO₂e-Projektion mit 2,1–3,8 MT CO₂e.^e

CO₂e-Nettoeffekt: Das Einsparpotenzial für 2030, abzüglich des Fußabdrucks, beträgt 49,5 bis 72,7 MT CO₂e (16–24%) – bei Standard- bzw. beschleunigter Digitalisierung.

Rebound-Effekte: Der Beitrag zum Erreichen des Klimaziels kann durch sogenannte Rebound-Effekte gemindert werden.^f

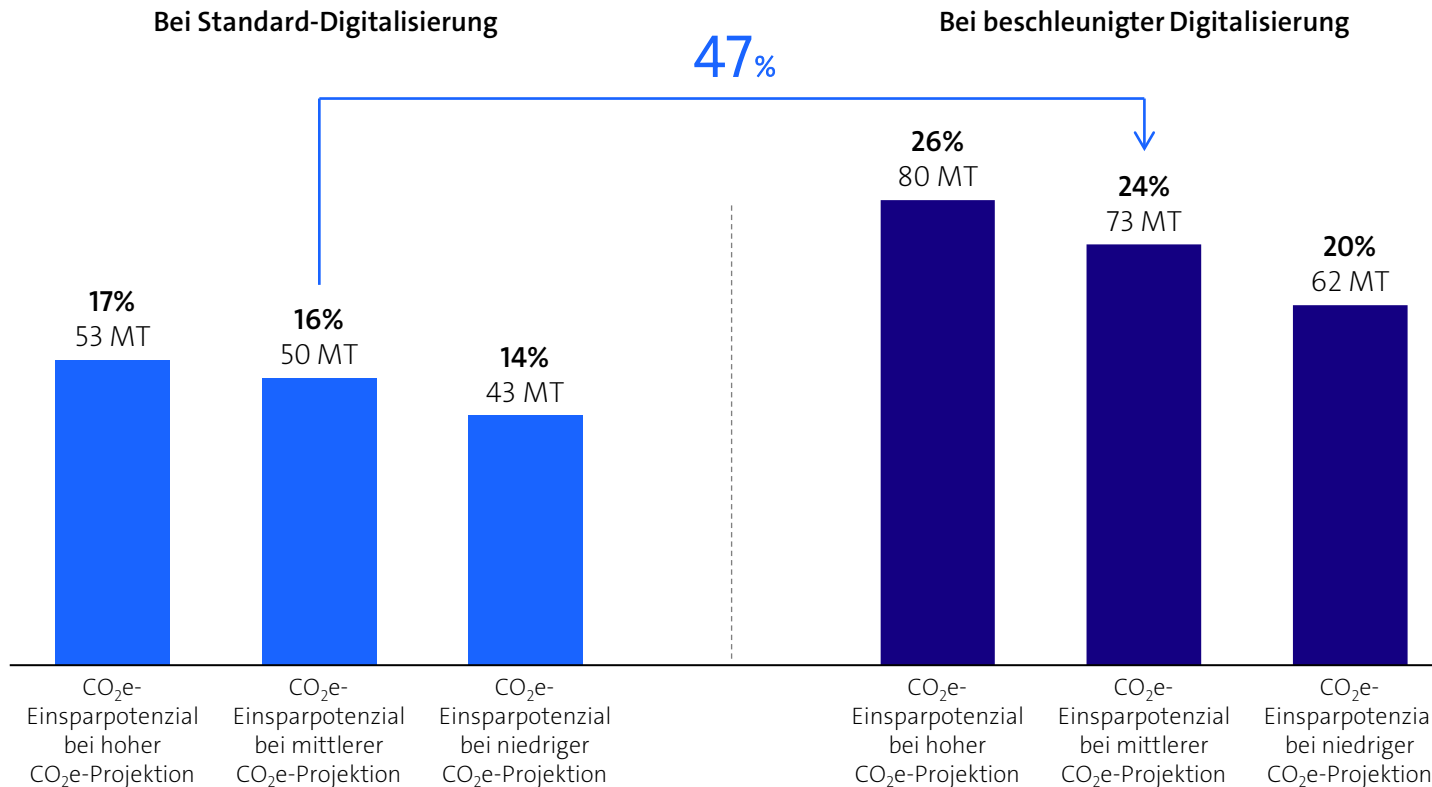
Katalysator-Wirkung: Neben den in dieser Studie beschriebenen Anwendungsfällen haben digitale Technologien zusätzlich das Potenzial, die Maßnahmen^g zur Verringerung der CO₂e-Emissionen im Rahmen des Klimaschutzprogramms der deutschen Regierung wirksam zu unterstützen und zu beschleunigen. Dies kann z.B. durch den Einsatz von Softwarelösungen und digitalen Plattformen erreicht werden, die dazu beitragen, diese Klimaschutzmaßnahmen schneller und effektiver umzusetzen.^h

Anmerkungen: a) Die Untersuchung differenziert die Einsparpotenziale und den Fußabdruck nach drei CO₂e-Projektionen. Siehe [Kapitel 3](#) und [Kapitel 5](#). Hier dargestellt ist die mittlere CO₂e-Projektion; b) Differenziert anhand unterschiedlicher Marktdurchdringungsraten ([siehe Seite 17](#)); c) Siehe [Kapitel 5](#); d) Berücksichtigt werden hier nicht die Emissionen aus Herstellung und End-of-Life der digitalen Technologien; e) [Siehe S. 87](#); f) Rebound-Effekte bezeichnen einen Mehrverbrauch nach Effizienzsteigerungen, der dazu führt, dass erwartete Einsparungen teilweise aufgehoben werden ([siehe Kapitel 6](#)); g) Politiken und Maßnahmen (PaMs) der Bundesregierung – primär nicht-digitaler Art; h) Die quantitativen Effekte wurden nicht modelliert.

Digitalisierungsgeschwindigkeit als entscheidender Hebel: Eine beschleunigte Digitalisierung ist über 47% effektiver

CO₂e-Einsparpotenzial und Beitrag zum Klimaziel

[Beitrag zum Klimaziel in Prozent^a, absolutes netto CO₂e-Einsparpotenzial in MT CO₂e]



Digitalisierungsgeschwindigkeiten

In der Studie wurden zwei Digitalisierungsgeschwindigkeiten analysiert, um deren Auswirkungen auf das Erreichen der Klimaziele zu bewerten.

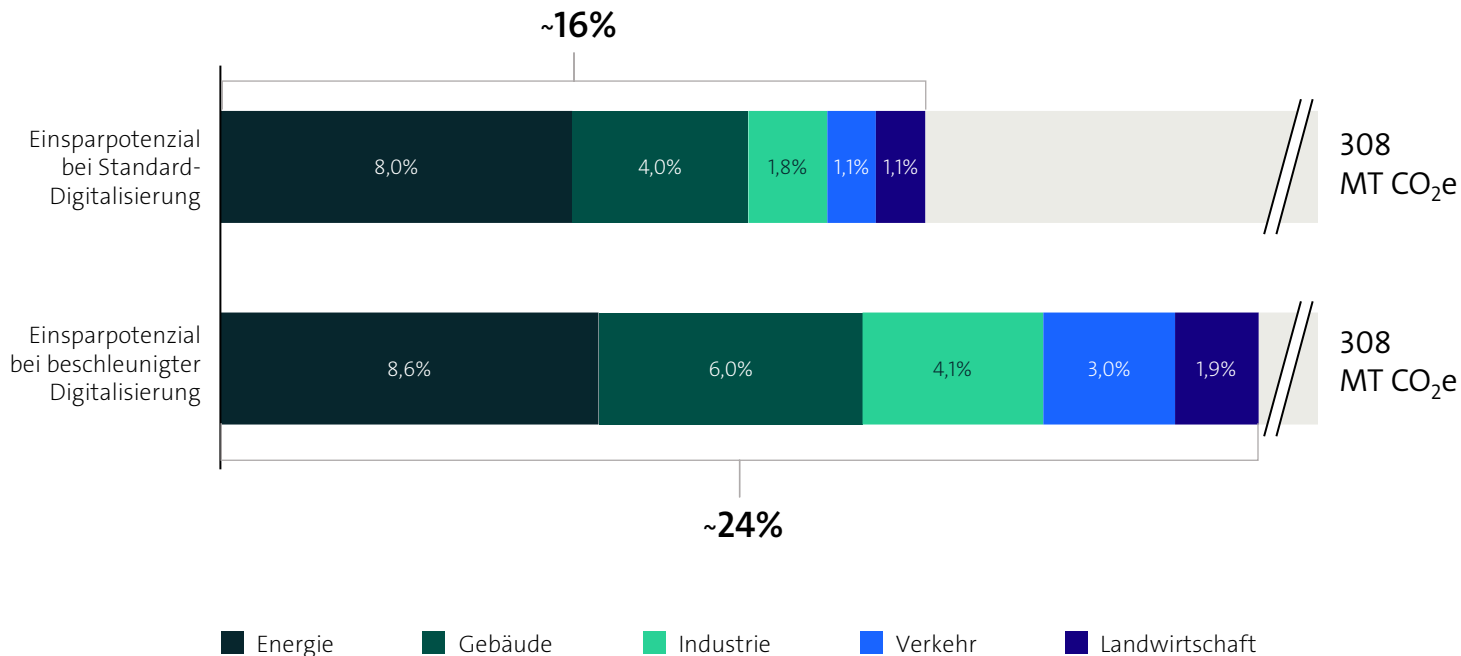
Für die Standard-Digitalisierung wird bis 2030 eine steigende Marktdurchdringung digitaler Technologien in Deutschland erwartet, wobei Unternehmen, öffentliche Institutionen und Privatpersonen branchenübliche Standardlösungen nutzen. Bei beschleunigter Digitalisierung könnte diese Durchdringung schneller erfolgen, getrieben durch fortschrittliche Methoden und Maßnahmen, inspiriert von führenden Unternehmen, Ländern und ambitionierteren Prognosen.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass eine beschleunigte Digitalisierung in allen betrachteten CO₂e-Projektionen effektiver ist, d.h. mit deutlich höheren CO₂e-Einsparungen einhergeht. Beispiel mittlere CO₂e-Projektion: Bei beschleunigter Digitalisierung steigen die Einsparungen von 50 auf 73 MT CO₂e, also um 47%.

Digitalisierung in den Sektoren Energie, Gebäude und Industrie hat den größten Beitrag zum deutschen Klimaziel 2030

Beitrag zum Erreichen des Klimaziels je Sektor

[Netto Effekte bei mittlerer CO₂e-Projektion^a, alle Zahlen in Prozent]



Beitrag je Sektor und CO₂e-Projektion

Das größte Potenzial weisen die Sektoren Energie, Gebäude und Industrie auf.

Die Sektoren Energie und Gebäude können bis zu ~9-10% zum Klimaziel beitragen; der Sektor Industrie bis zu ~5% (siehe Tabelle unten).

Die Beiträge unterscheiden sich je nach CO₂e-Projektion und Digitalisierungsgeschwindigkeit (siehe Tabelle).^a

Beitrag zum Erreichen des Klimaziels 2030 je CO₂e-Projektion und Digitalisierungsgeschwindigkeit^{a,b}

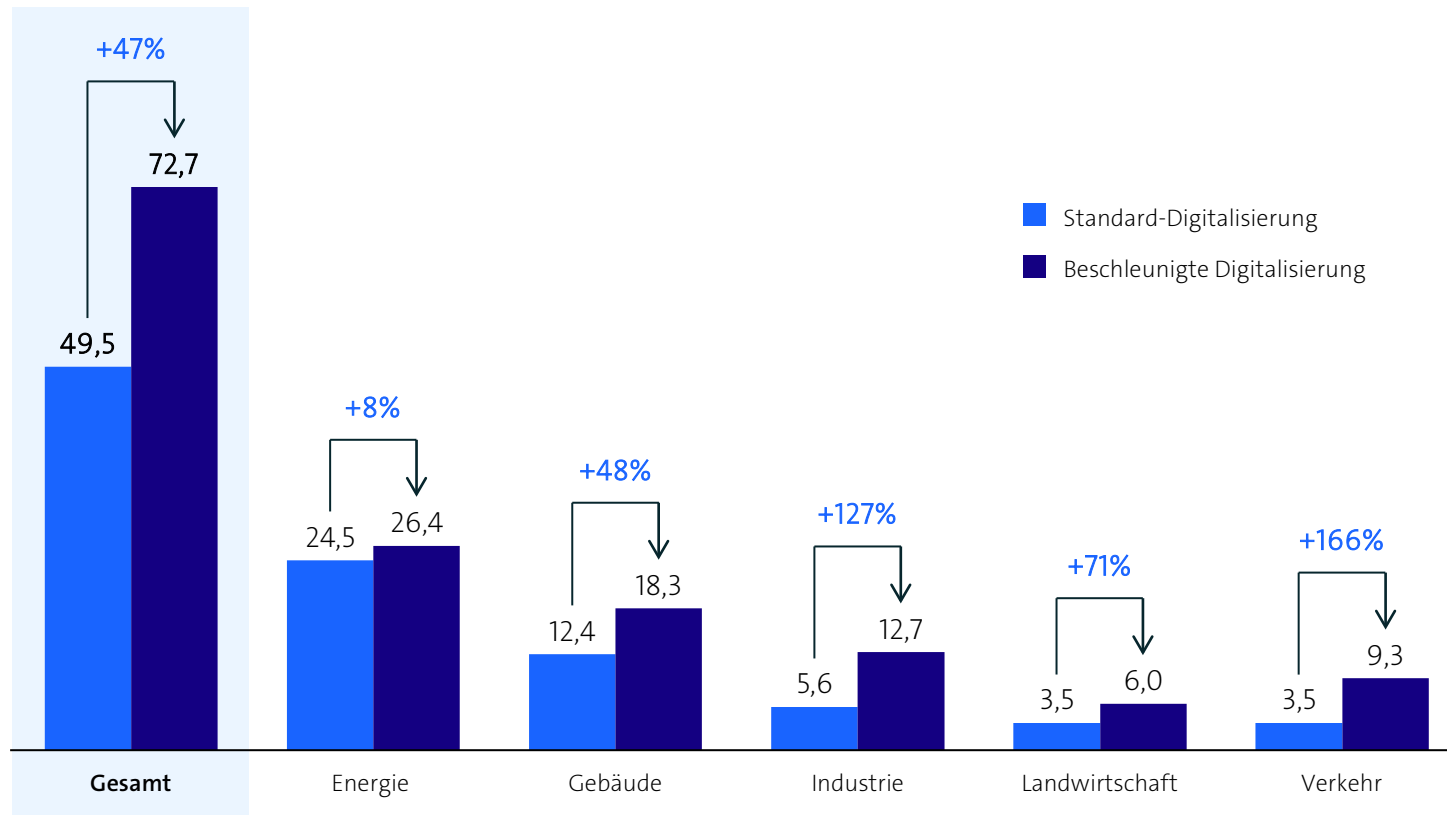
Sektor	CO ₂ e-Projektion: Hoch	CO ₂ e-Projektion: Mittel	CO ₂ e-Projektion: Niedrig
Energie ^c	6,2–6,7%	8,0–8,6%	8,1–8,7%
Gebäude	6,4–9,4%	4,0–6,0%	2,3–3,4%
Industrie	2,1–4,8%	1,8–4,1%	1,5–3,4%
Verkehr	1,1–3,0%	1,1–3,0%	1,1–2,9%
Landwirtschaft	1,3–2,2%	1,1–1,9%	1,0–1,7%
Gesamt	17,1–26,1%	16,1–23,6%	14,0–20,2%

Anmerkungen: a) Die Studie differenziert die Einsparpotenziale und den Fußabdruck der digitalen Technologien nach drei CO₂e-Projektionen (siehe Kapitel 3 und Kapitel 5). Die konkreten sektorspezifischen CO₂e-Projektionen finden sich in Kapitel 4. Abweichungen in den Summen können aus Rundungen resultieren; b) Dargestellt sind die Werte der Standard-Digitalisierung und der beschleunigten Digitalisierung (von-bis %); c) Die betrachteten Wirkungshebel entfalten ihr CO₂e-Einsparpotenzial primär bei erfolgreicher Energiewende, also mit sinkender CO₂e-Projektion.

Digitale Technologien können insgesamt 50 bis 73 MT CO₂e im Jahr 2030 reduzieren – abhängig von der Digitalisierungsgeschwindigkeit

CO₂e-Einsparpotenzial (gesamt und je Sektor)

[Netto Effekte bei mittlerer CO₂e-Projektion^a, in MT CO₂e]



Einsparpotenzial je Sektor und CO₂e-Projektion

Digitalisierung kann bei mittlerer CO₂e-Projektion bis zu 72,7 MT CO₂e reduzieren. Bei einer beschleunigten Digitalisierung ist der Beitrag im Sektor Verkehr mit einem Anstieg von 3,5 auf 9,3 MT CO₂e besonders hoch (+166%). Ähnlich verhält es sich im Industriesektor, wo die beschleunigte Digitalisierung mehr als das Doppelte an Einsparpotenzial bietet (+127%). In den folgenden Sektorkapiteln finden sich weitere Details zu den einzelnen Anwendungsfällen.

Einsparpotenzial 2030 je CO₂e-Projektion^{b,c} und Digitalisierungsgeschwindigkeit (in MT CO₂e)

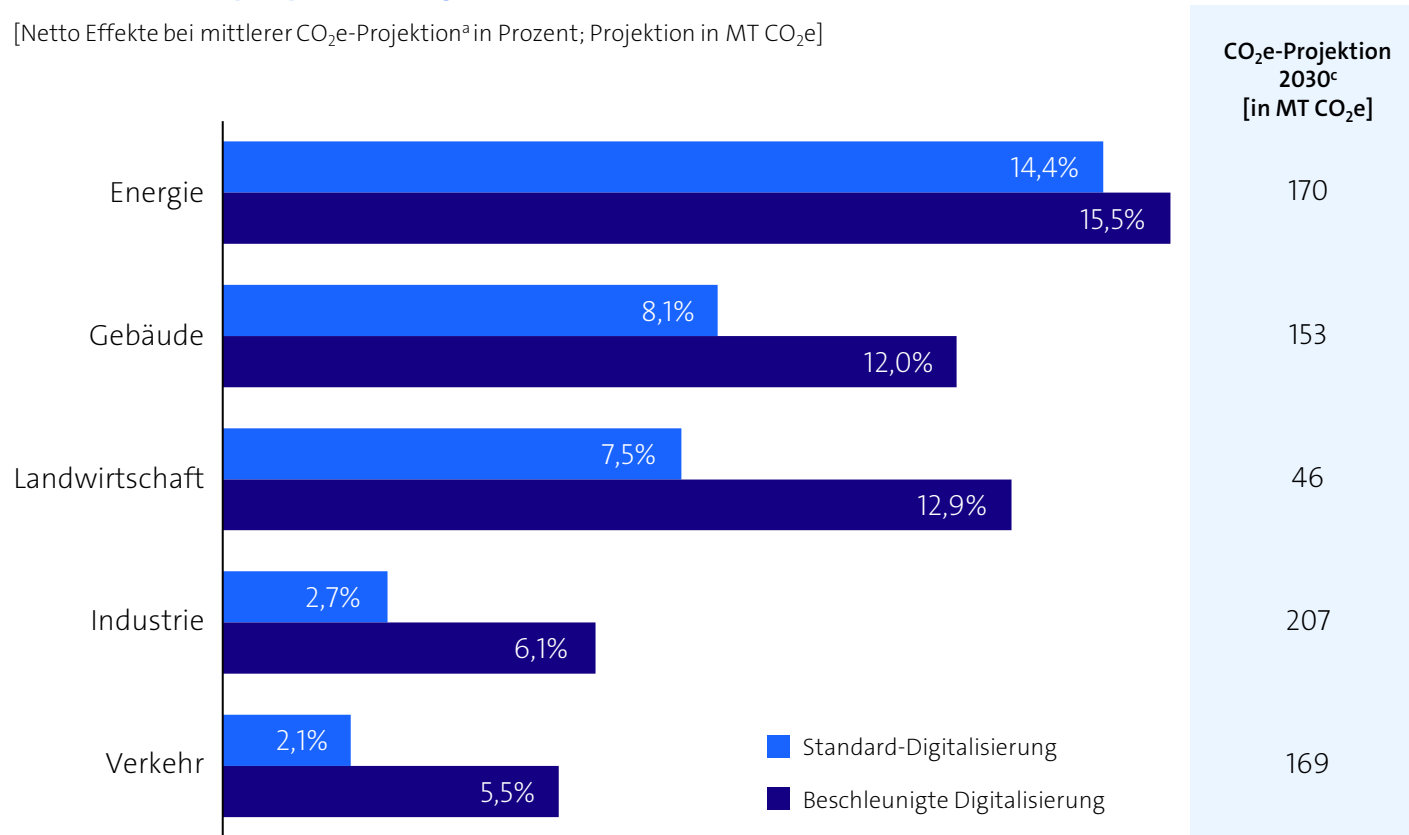
Sektor	CO ₂ e-Projektion: Hoch	CO ₂ e-Projektion: Mittel	CO ₂ e-Projektion: Niedrig
Energie ^d	19,1–20,5	24,5–26,4	25,0–26,9
Gebäude	19,7–29,1	12,4–18,3	7,1–10,4
Industrie	6,5–14,9	5,6–12,7	4,6–10,5
Verkehr	3,9–6,6	3,5–6,0	3,1–5,3
Landwirtschaft	3,5–9,1	3,5–9,3	3,4–9,1
Gesamt	52,6–80,3	49,5–72,7	43,2–62,2

Anmerkungen: a) Die Studie differenziert die Einsparpotenziale und den Fußabdruck nach drei CO₂e-Projektionen. Siehe Kapitel 3 und Kapitel 5 für weitere Details. Abweichungen in den Summen können aus Rundungen resultieren; b) Dargestellt sind die Werte der Standard-Digitalisierung und der beschleunigten Digitalisierung; c) Siehe Sektorkapitel für mehr Details; d) Die betrachteten Wirkungshebel entfalten ihr CO₂e-Einsparpotenzial primär bei erfolgreicher Energiewende, also mit sinkender CO₂e-Projektion.

Größtes Einsparpotenzial in den Sektoren Energie, Gebäude und Landwirtschaft im Hinblick auf die erwarteten Sektoremissionen

Relatives Einsparpotenzial je Sektor

[Netto Effekte bei mittlerer CO₂e-Projektion^a in Prozent; Projektion in MT CO₂e]



Relatives Einsparpotenzial je CO₂e-Projektion

Der relative Beitrag beschreibt, welcher Anteil der für das Jahr 2030 projizierten Emissionen in einem bestimmten Sektor durch die Anwendung digitaler Technologien potenziell gesenkt werden kann. Für den Energiesektor wird das höchste relative Einsparpotenzial prognostiziert: 14,4% bei der Standard-Digitalisierung, mit Anstieg auf 15,5% bei beschleunigter Digitalisierung. Verhältnismäßig niedrig ist das relative Einsparpotenzial im Sektor Verkehr.

Relativer Beitrag je CO₂e-Projektion für 2030 und Digitalisierungsgeschwindigkeit^{a,b}

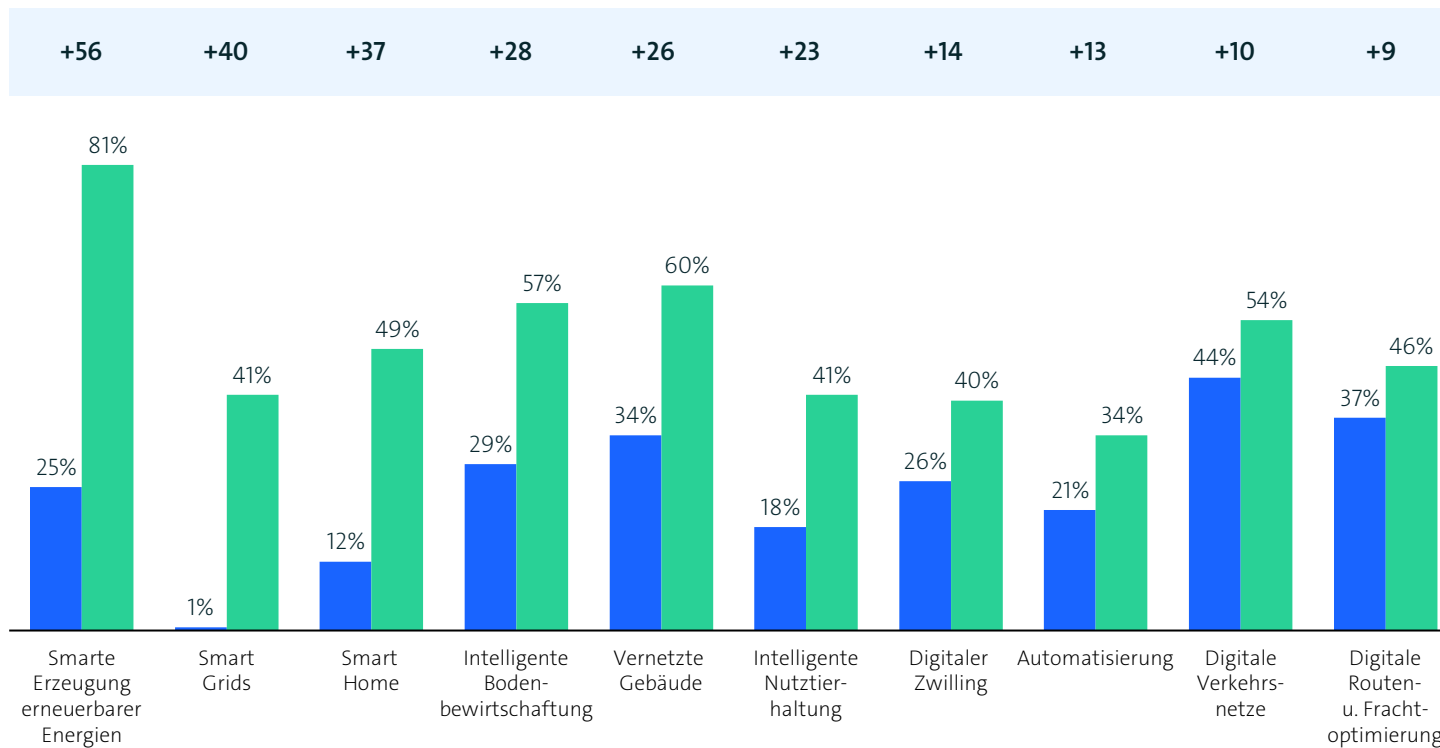
Sektor	CO ₂ e-Projektion: Hoch	CO ₂ e-Projektion: Mittel	CO ₂ e-Projektion: Niedrig
Energie ^d	6,8–7,4%	14,4–15,5%	41,0–44,1%
Gebäude	9,0–13,3%	8,1–12,0%	7,1–10,4%
Landwirtschaft	7,5–12,9%	7,5–12,9%	7,6–13,1%
Industrie	2,6–5,9%	2,7–6,1%	2,9–6,6%
Verkehr	2,0–5,2%	2,1–5,5%	2,1–5,7%

Anmerkungen: a) Die Studie differenziert die Einsparpotenziale und den Fußabdruck nach drei CO₂e-Projektionen sowie zwei Digitalisierungsgeschwindigkeiten. Siehe Kapitel 3 und Kapitel 5 für weitere Details; b) Dargestellt sind die Werte der Standard-Digitalisierung und der beschleunigten Digitalisierung (von–bis %); c) Entsprechen nicht den CO₂e-Projektionen des Umweltbundesamtes im Projektionsbericht 2023, sondern denen, die durch den Einsatz der untersuchten digitalen Technologien in 2030 adressiert werden (siehe jeweilige Sektorkapitel); d) Die betrachteten Wirkungshebel entfalten ihr CO₂e-Einsparpotenzial primär bei erfolgreicher Energiewende, also mit sinkender CO₂e-Projektion.

Zunehmende Verbreitung von digitalen Technologien zur smarten Erzeugung erneuerbarer Energien, für Smart Grids und für Smart Home bis 2030

Marktdurchdringung der digitalen Technologien^a (in 2023 und 2030)

[Balken in Prozent; Anstiege in Prozentpunkten]



Beschreibung

Die Marktdurchdringung gibt an, in welchem Ausmaß ein konkreter Anwendungsfall digitaler Technologien (z.B. Simulationen durch digitale Zwillinge) durch Unternehmen, öffentliche Institutionen oder Privatpersonen umgesetzt wird.^b

Die Studienergebnisse zeigen einen signifikanten Anstieg der Marktdurchdringung in den Bereichen smarte Erzeugung erneuerbarer Energien und Smart Grids, mit Steigerungen von 56 bzw. 40 Prozentpunkten. Auch Smart Home erfährt eine starke Verbreitung, bei einer Ausgangslage von 12% in 2023 und einer projizierten Marktdurchdringung von 49% für 2030.

Im Gegensatz dazu wird im Verkehrssektor nur ein moderater Anstieg digitaler Technologien erwartet, da hier die Marktdurchdringung digitaler Lösungen, z.B. Telematiksysteme für die digitale Routen- und Frachtoptimierung in der Logistik, bereits heute eine vergleichsweise hohe Marktdurchdringung aufweisen.

- Marktdurchdringung in 2023
- Marktdurchdringung in 2030 (bei Standard-Digitalisierung^a)

Anmerkungen: a) Die Studie differenziert zwischen zwei Digitalisierungsgeschwindigkeiten. Dargestellt sind die Marktdurchdringungen der Standard-Digitalisierung. Die erwarteten Marktdurchdringungen bei der beschleunigten Digitalisierung sind höher (siehe [Sektorkapitel](#)); b) In der Studie wird zwischen Anwendungsfällen und digitalen Technologien differenziert. Anwendungsfälle stellen konkrete Umsetzungen von Unternehmen, öffentlichen Institutionen oder Privatpersonen dar, wo in der Regel mehrere digitale Technologien in Kombination zur Anwendung kommen.

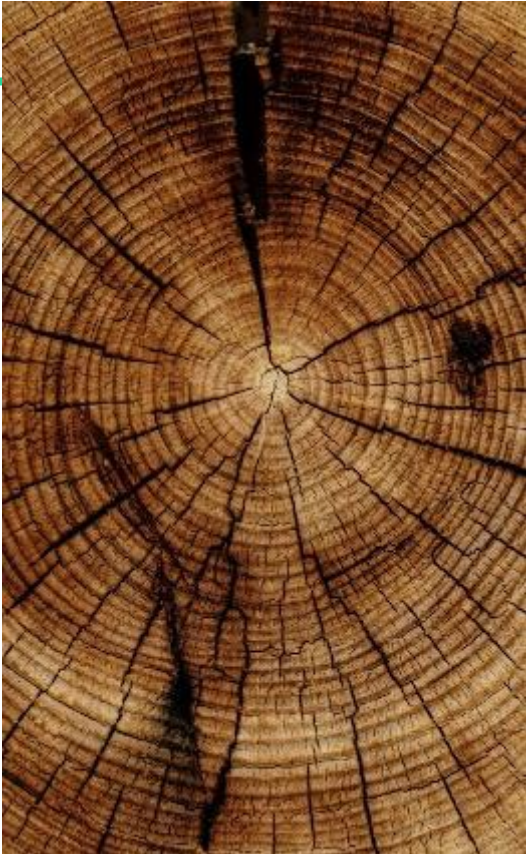
3

Zielstellung und Methodik

1. Über die Studie
2. Sektorenauswahl
3. Sektorenüberschneidungen
4. Digitalisierungsgeschwindigkeiten
5. Berechnungslogik der CO₂e-Einsparpotenziale
6. CO₂e-Projektionen und Einflussfaktoren



Diese Studie untersucht den potenziellen Beitrag digitaler Technologien zum Erreichen des deutschen Klimaziels 2030



Ziel und Absicht der Studie

Die vorliegende Studie zielt darauf ab, die Rolle digitaler Technologien bei der Erreichung der deutschen Klimaziele für das Jahr 2030 zu beleuchten. Im Blickfeld steht die Frage, inwieweit unternehmerische und staatliche Investitionen in die digitale Transformation zur Reduzierung von CO₂e-Emissionen in Deutschland beitragen können. Ziel ist es, ein besseres Verständnis für das CO₂e-Einsparpotenzial der Digitalisierung zu entwickeln, um so eine makroökonomische Einschätzung dieses Potenzials vorzubereiten. Dies soll eine fundierte Diskussionsbasis für die Verknüpfung der Themen Klimaschutz und Digitalisierung in Deutschland bieten.

Umfang der Studie

Die Studie konzentriert sich auf die Analyse der theoretisch möglichen CO₂e-Einsparungen im Jahr 2030 durch den Einsatz digitaler Technologien in fünf Sektoren, entsprechend des nationalen Sektorzuschnitts des deutschen Klimaschutzgesetzes.¹ Es wurden elf

Anwendungsfälle und 17 Wirkungshebel in diesen Sektoren untersucht. Bei der Berechnung des Einsparpotenzials wurde der CO₂e-Fußabdruck der digitalen Technologien mit untersucht. Die Studie befasst sich nicht mit den Voraussetzungen für die Realisierung und Aufrechterhaltung des identifizierten Einsparpotenzials oder mit dem Umgang von Rebound-Effekten^a.

Ansatz und Methodik der Studie

Die Studie stützt sich auf Sekundärliteratur fachlich anerkannter Quellen. Es wurden über 210 Publikationen aus aktueller wissenschaftlicher Literatur, Fachliteratur und branchenbezogenen Publikationen herangezogen. Die Berechnung des CO₂e-Einsparpotenzials je Anwendungsfall basiert auf der Analyse von drei Faktoren:^b

1. Die Projektion der adressierten CO₂e-Emissionen im Jahr 2030
2. Das spezifische CO₂e-Reduktionspotenzial je digitaler Technologie
3. Die Marktdurchdringung der jeweiligen digitalen Technologie bis 2030

CO₂e-Projektionen und Digitalisierungsgeschwindigkeiten

Die o.g. Projektionen der CO₂e-Emissionen werden durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Aus diesem Grund wurden in der Studie unterschiedliche CO₂e-Projektionen für jeden Wirtschaftssektor entwickelt, um ein detailliertes Bild der potenziellen Entwicklungen für jeden Sektor zu erhalten.^b

Darüber hinaus unterliegt die Marktdurchdringung neuer digitaler Technologien ebenfalls verschiedenen Einflussfaktoren. Diese lassen sich auf ökonomische, politische und technologische Faktoren zurückführen. Um diesen Aspekt zu berücksichtigen, wurden in der Studie zwei unterschiedliche Geschwindigkeiten der Digitalisierung berücksichtigt.^b

Anmerkungen: a) Rebound-Effekte bezeichnen einen Mehrverbrauch nach Effizienzsteigerungen, der dazu führt, dass erwartete Einsparungen teilweise aufgehoben werden (siehe [Kapitel 6](#)); b) Weitere Details auf den Folgeseiten und in den [Sektorkapiteln](#).
Quelle: 1) [BMJ & BfJ \(2019\)](#).

Die Studie konzentriert sich auf die fünf Wirtschaftssektoren, die zusammen mehr als 99% der gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland ausmachen

Die betrachteten Sektoren



Emittieren über
99%
der gesamten
CO₂e-Emissionen
in Deutschland¹

Auswahl der Sektoren

Die Studie untersucht fünf Sektoren, die zusammen über 99% der gesamten Treibhausgasemissionen Deutschlands im Jahr 2022 ausmachen.¹ Grundlage hierfür ist der nationale Sektorzuschnitt des deutschen Klimaschutzgesetzes.² Der Sektor Abfallwirtschaft und sonstiges wurde aufgrund des niedrigen Emissionsbeitrages nicht berücksichtigt.

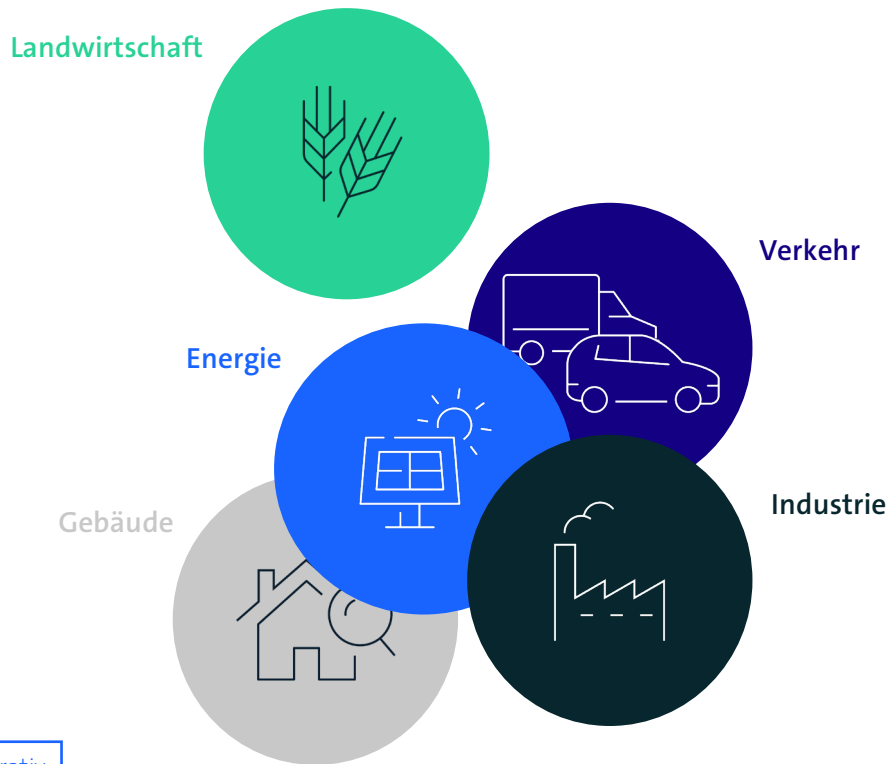
Beitrag der einzelnen Sektoren an den gesamten CO₂e-Emissionen Deutschlands in 2022¹

Sektor	Absoluter Beitrag [MT CO ₂ e]	Prozentualer Beitrag [%]
Energie	255,9	34,3%
Industrie	164,2	22,0%
Verkehr	147,9	19,8%
Gebäude	111,7	15,0%
Landwirtschaft	61,7	8,3%
Abfallwirtschaft und sonstiges	4,3	0,6%
Gesamt	745,7	100%

Anmerkung: a) Im Folgenden wird „Energiewirtschaft“ mit „Energie“ abgekürzt.
Quellen: 1) UBA (2023j); 2) BMJ & BfJ (2019).

In der Studie wurden die sektorübergreifenden CO₂e-Emissionsüberschneidungen durch digitale Technologien mit berücksichtigt

Überschneidungen der adressierbaren Emissionsprojektionen



Umgang mit Überschneidungen und Abgrenzung der Projektionen

Die Emissionen, welche durch die digitalen Technologien adressierbar sind, erstrecken sich teilweise über mehrere Sektoren hinweg und unterscheiden sich somit von der Sektorenaufteilung des Bundes-Klimaschutzgesetzes¹. Solche Überschneidungen der adressierten Emissionsprojektionen wurden in der Studie berücksichtigt und links illustrativ dargestellt.

Die in der Studie berechneten CO₂e-Einsparpotenziale basieren auf den durch digitale Lösungen adressierbaren Emissionen. Um zu zeigen, dass sich diese Einsparungen teilweise über verschiedene Sektoren erstrecken können, wird dies im Folgenden am Beispiel der Smart Home Lösungen in Wohngebäuden illustriert: Zusätzlich zur automatischen Regelung der Raumtemperatur ermöglichen Smart Home Anwendungen auch eine Optimierung strombasierter Verbrauchsgeräte. Während

die CO₂e-Emissionen, die durch Raumwärme entstehen, gemäß dem Bundes-Klimaschutzgesetz und Quellprinzip^a im Gebäudesektor erfasst werden, erfolgt die Bilanzierung der Stromemissionen hauptsächlich im Energiesektor. In diesem Kontext erstrecken sich die durch Smart Home Lösungen beeinflussbaren Emissionen demnach über zwei unterschiedliche Sektoren.

In dieser Studie wird das Verursacherprinzip^a genutzt und die oben genannten Stromemissionen im Gebäudesektor bilanziert. Daher decken sich die in der Studie entwickelten CO₂e-Projektionen, die sich auf die durch die Digitalisierung adressierbaren Emissionen beziehen, nicht mit den Emissionsprognosen der einzelnen Sektoren, wie sie im Projektionsbericht 2023² des Umweltbundesamts festgelegt sind.

Anmerkung: a) Das UBA bilanziert nach dem Quellprinzip und betrachtet demnach nur die Emissionen aus Verbrennung in privaten Haushalten und im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD). Da die untersuchten digitalen Technologien ebenfalls Einfluss auf den Stromverbrauch nehmen, haben sich Bitkom und Accenture in der Untersuchung auf das Verursacherprinzip gestützt und demnach auch die Emissionen des Stroms im Gebäudesektor bilanziert.; Quellen: 1) [BMJ & BfJ \(2019\)](#); 2) [UBA \(2023\)](#).

Die Berechnung des CO₂e-Einsparpotenzials und des CO₂e-Fußabdrucks digitaler Technologien erfolgen entlang von zwei Digitalisierungsgeschwindigkeiten

Zwei Digitalisierungsgeschwindigkeiten

In den Berechnungen dieser Studie wird nach folgenden zwei Digitalisierungsgeschwindigkeiten differenziert: Standard und beschleunigt. Die unterschiedlichen Geschwindigkeiten werden anhand der für 2030 erwarteten Marktdurchdringung digitaler Technologien konkretisiert.

Standard-Digitalisierung: Bis 2030 entwickelt sich die Verbreitung bzw. Marktdurchdringung digitaler Technologien in Deutschland im prognostizierten Tempo bzw. so wie bisher. Unternehmen, öffentliche Institutionen oder Privatpersonen implementieren hierbei Standardlösungen und -maßnahmen, die sich an gängigen Praktiken der Branche orientieren. Als Anhaltspunkt dienen hier die Prognosen für die Marktdurchdringung des jeweiligen Wirkungshebels in Deutschland.

Beschleunigte Digitalisierung: In diesem Fall nimmt die Marktdurchdringung digitaler Technologien in Deutschland bis 2030 ein rascheres Tempo an. Unternehmen, öffentliche Institutionen oder Privatpersonen nutzen hier fortschrittliche Methoden und Maßnahmen, die über die o.g. Standards hinausgehen und somit eine schnellere Skalierung ermöglichen.

Als Anhaltspunkt dienen hier (a) führende Länder, (b) führende Unternehmen, (c) zeitlich vorgezogene Prognosen für die Marktdurchdringung des jeweiligen Wirkungshebels in Deutschland oder (d) ambitioniertere Prognosen.

Ziel des Vergleiches: Ziel dieser Gegenüberstellung ist es, ein tieferes Verständnis darüber zu gewinnen, wie hoch das zusätzliche CO₂e-Einsparpotenzial in Deutschland ausfallen könnte, wenn noch ambitionierter in die digitale Transformation investiert werden würde.

Beispiel »Digitale Zwillinge in der Industrie«

Marktdurchdringung 2023:

Im Jahr 2023 nutzen etwa 26% der Industrieunternehmen digitale Zwillinge in Deutschland.

Standard-Digitalisierung:

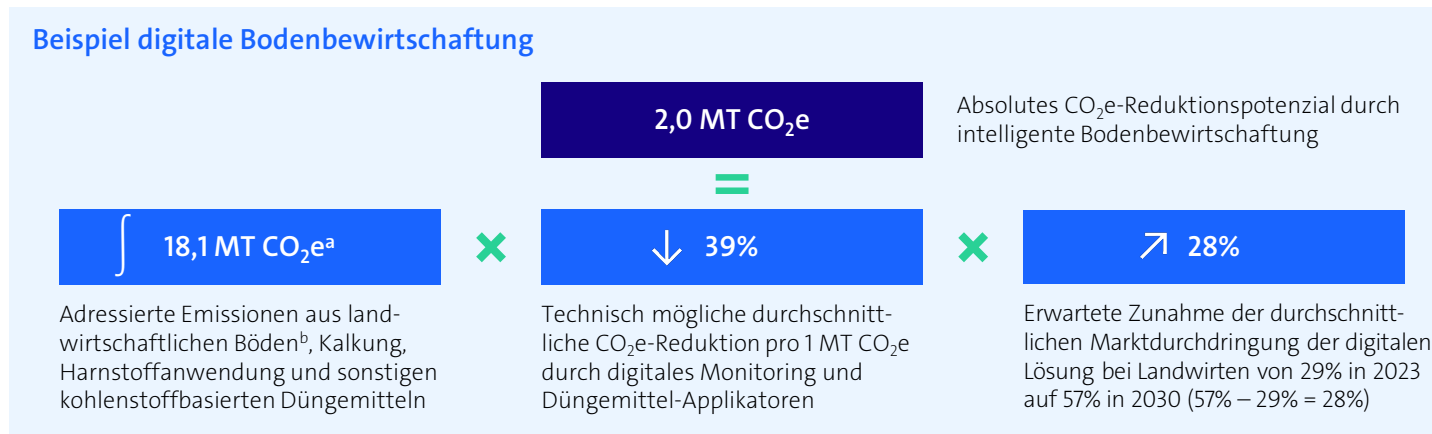
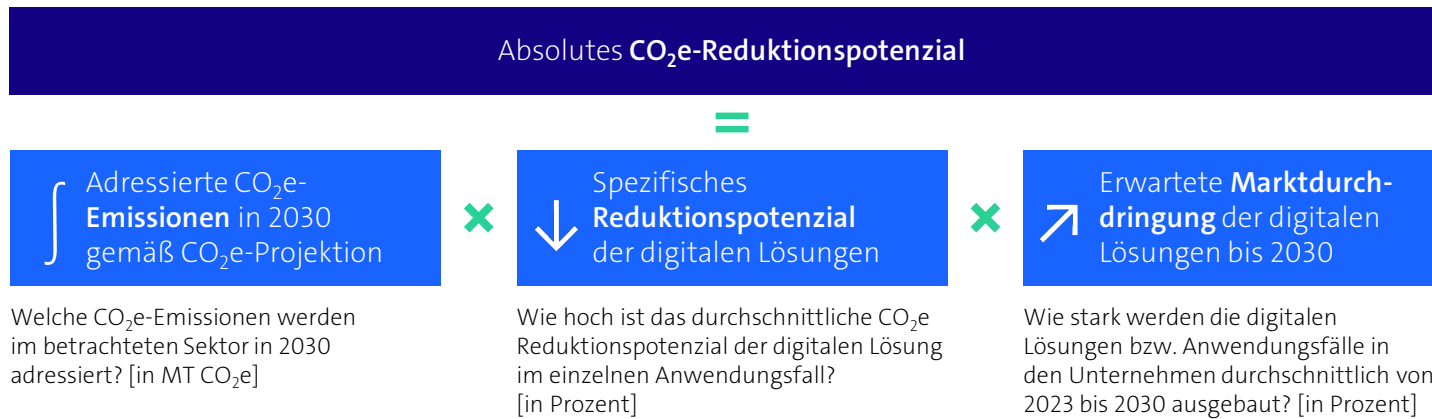
Geht man davon aus, dass sich die Marktdurchdringung weiter so entwickelt wie in den letzten Jahren, würden im Jahr 2030 etwa 40% der Industrieunternehmen digitale Zwillinge einsetzen.

Beschleunigte Digitalisierung:

Wenn Deutschland sich an vergleichbaren, in der Digitalisierung führenden Ländern orientiert, könnte eine Marktdurchdringung von digitalen Zwillingen in der Industrie von 55% im Jahr 2030 erreicht werden.^a

Das CO₂e-Einsparpotenzial für 2030 ermittelt sich aus der CO₂e-Projektion, der Marktdurchdringung sowie dem Reduktionspotenzial der jeweiligen Technologie

Berechnungslogik des Einsparpotenzials pro Anwendungsfall



Berechnungsfaktoren

Die Berechnung des CO₂e-Einsparpotenzials basiert auf der Analyse der folgenden drei Faktoren.

CO₂e-Emissionen gemäß CO₂e-Projektion:

Die CO₂e-Emissionen, die im Jahr 2030 ausgestoßen werden und durch den Einsatz digitaler Technologien adressiert werden.

Reduktionspotenzial:

Der durchschnittliche Anteil an CO₂e-Emissionen, der durch den Einsatz der spezifischen digitalen Technologie durchschnittlich je Einheit reduziert werden kann.

Marktdurchdringung:

Die erwartete zusätzliche Marktdurchdringung des konkreten Anwendungsfalls digitaler Technologien in Unternehmen, öffentlichen Institutionen oder bei Privatpersonen zwischen 2023 und 2030 – differenziert nach zwei Digitalisierungsgeschwindigkeiten.^c

Die Faktoren, die auf die CO₂e-Projektionen für 2030 einwirken, sind von mehreren Einflussfaktoren geprägt.

→ Siehe nächste Seite

Anmerkungen: a) Mittlere CO₂e-Projektion (siehe S. 65); b) Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden resultieren aus der Freisetzung von CO₂e durch die Anwendung von Harnstoff und Kalkung. Zusätzlich entstehen sie durch die mikrobielle Umsetzung von Stickstoffverbindungen, darunter auch mineralische Dünger, was zu Lachgasemissionen führt; c) Für weitere Informationen siehe Seite 12 und Seite 17.

Mehrere Einflussfaktoren wirken auf die Emissionsentwicklung – wir haben diese in dieser Studie berücksichtigt

Das Ziel der Bundesregierung ist es, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 65% gegenüber 1990 zu reduzieren.¹ Dies treibt sie primär mit gesetzlichen Maßnahmen zum Ausbau klimafreundlicher Energien sowie Energieeffizienz- und Energieeinsparmaßnahmen voran. Ein Ziel ist es, den Anteil erneuerbarer Energien am gesamten Bruttostromverbrauch bis 2030 auf über 80% zu steigern. Zusätzlich sollen Maßnahmen zur Energieeffizienz und zum Energiesparen zu einer signifikanten Reduktion des End- und Primärenergieverbrauchs führen.¹

Des Weiteren werden Maßnahmen ergriffen, um Treibhausgasemissionen zu verringern, die nicht direkt mit dem Energieverbrauch in Verbindung stehen, wie beispielsweise die Förderung von ökologischer Landwirtschaft.²

Trotz dieser teilweise gesetzlich festgeschriebenen Maßnahmen ist eine genaue Prognose der CO₂e-Emissionen in Deutschland mit Unsicherheiten verbunden, da sie einer Vielzahl von Einflussfaktoren unterliegt.^{1,2}

So basieren Treibhausgasminderungsansätze vor allem auf gesellschaftlichem und wirtschaftlichem Wandel, veränderten Investitionsmustern sowie individuellem nachhaltigem (Konsum)Verhalten. Weitere Variablen sind planerische und regulatorische Fortschritte wie etwa klimafreundliche Stadtplanung oder Senkung des Energiebedarfs durch Sanierungen.³

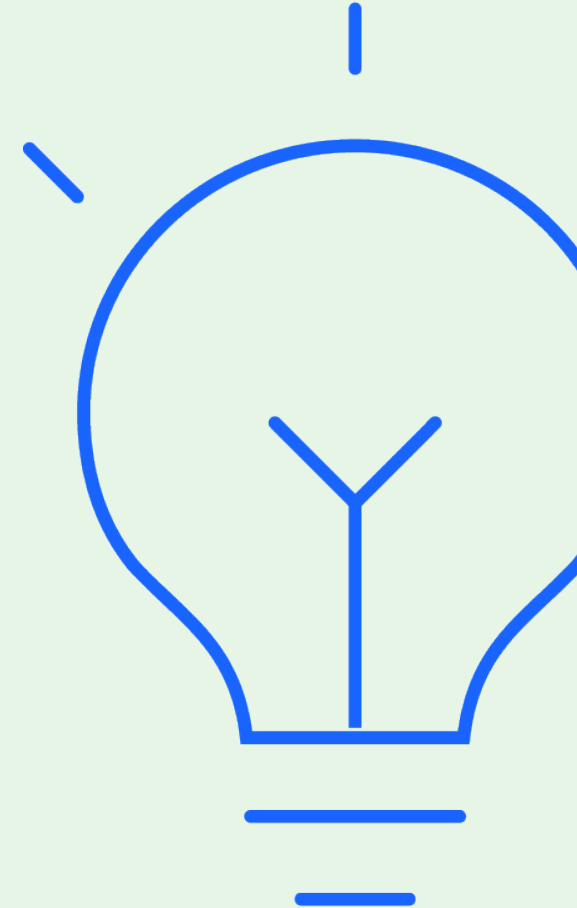
Laut Expertenrat für Klimafragen gibt es gerade mit Blick auf den Anstieg erneuerbarer Energieträger eine Bandbreite möglicher Entwicklungen: Neben dem Ausbau der Solar- und Windenergie inklusive der hierfür erforderlichen Netzinfrastruktur ist die Entwicklung der Stromnachfrage entscheidend, welche wiederum stark vom Grad der direkten und indirekten Elektrifizierung durch die Sektorenkopplung abhängt.⁴ Gerade im Verkehrssektor ist die Elektrifizierung sowie der Anteil von konventionellen und E-Pkws sowie E-Lkws im Bestand und in der Fahrleistung

ein großer Faktor hinsichtlich der Emissionsentwicklungen.

Außerdem ist zu berücksichtigen, dass auch die Gesamtmenge des Stromverbrauchs (die auch mit der Entwicklung der inländischen und ausländischen Strompreise verbunden ist) direkten Einfluss auf die Höhe der CO₂e-Emissionen hat.⁴

Darüber hinaus bestehen weitere sektorspezifische Variablen:^a So hängt die Emissionsentwicklung in der Landwirtschaft wesentlich von dem Wachstum des Ökolandbaus⁵ sowie dem Rückgang der Rinder- und Schweineviehzucht ab.²

Zur strukturierten Berücksichtigung dieser Einflussfaktoren in der Analyse wurden pro Sektor konkrete Einflussfaktoren identifiziert und entsprechende CO₂e-Projektionen entwickelt.^a



Zur Berücksichtigung von zentralen Einflussfaktoren und Entwicklungspfaden wurden pro Sektor drei CO₂e-Projektionen entwickelt



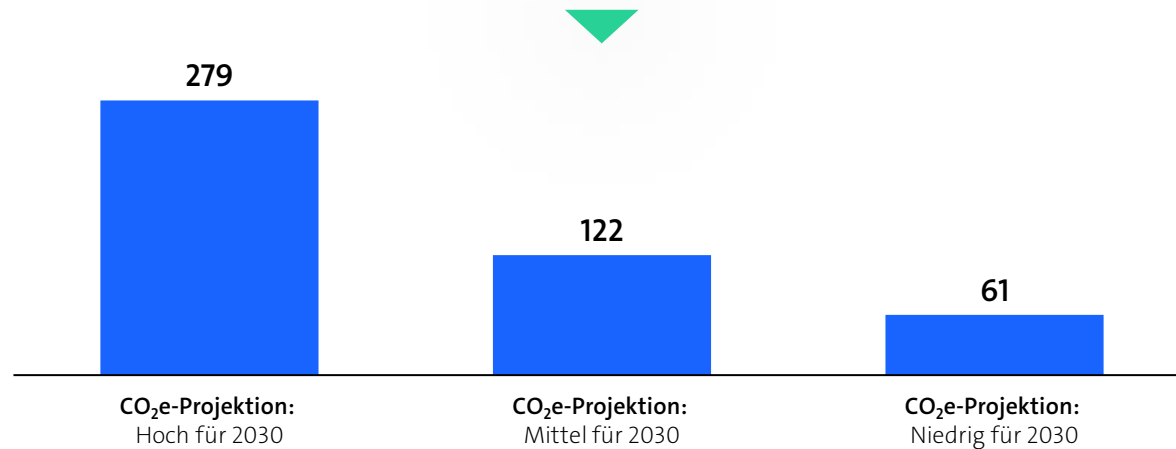
Am Beispiel Energie

Einflussfaktoren^a

Einflussfaktor	Zugrundeliegende Entwicklungsgrößen
Stromemissionsfaktor	Ausbaugeschwindigkeit Solar, Wind, Netzinfrastruktur, Stromspeicher, u.w.
Bruttostromverbrauch	Elektrifizierung der Sektoren, v.a. im Verkehrssektor, Strompreise, Investitionen, u.w.

CO₂e-Projektionen für 2030

[MT CO₂e]



illustrativ

Beschreibung der CO₂e-Projektionen für die erwarteten CO₂e-Emissionen in 2030

CO₂e-Projektion: Hoch für 2030

Die hohe CO₂e-Projektion für 2030 beruht auf Trends, die auf historischen Entwicklungsparametern fußen. Diese Projektion impliziert, dass die beobachteten Trends der vergleichsweise geringen Emissionsreduktion sich bis 2030 mit derselben Rate fortsetzen.

CO₂e-Projektion: Mittel für 2030

Die mittlere CO₂e-Projektion für 2030 beruht auf der Annahme, dass sich die Einflussfaktoren günstig entwickeln und zu niedrigeren Emissionen führen. Die Erwartungen an diese Faktoren sind positiv und es wird davon ausgegangen, dass sich die gewünschten Annahmen von hoch in Richtung der niedrigen CO₂e-Projektion bewegen.

CO₂e-Projektion: Niedrig für 2030

Die niedrige CO₂e-Projektion basiert auf den Annahmen des Umweltbundesamts gemäß dem deutschen Projektionsbericht 2023.¹ Hierbei wird von einer erfolgreichen Umsetzung der Maßnahmen² ausgegangen, welche die Treibhausgasemissionen in Deutschland signifikant reduzieren.

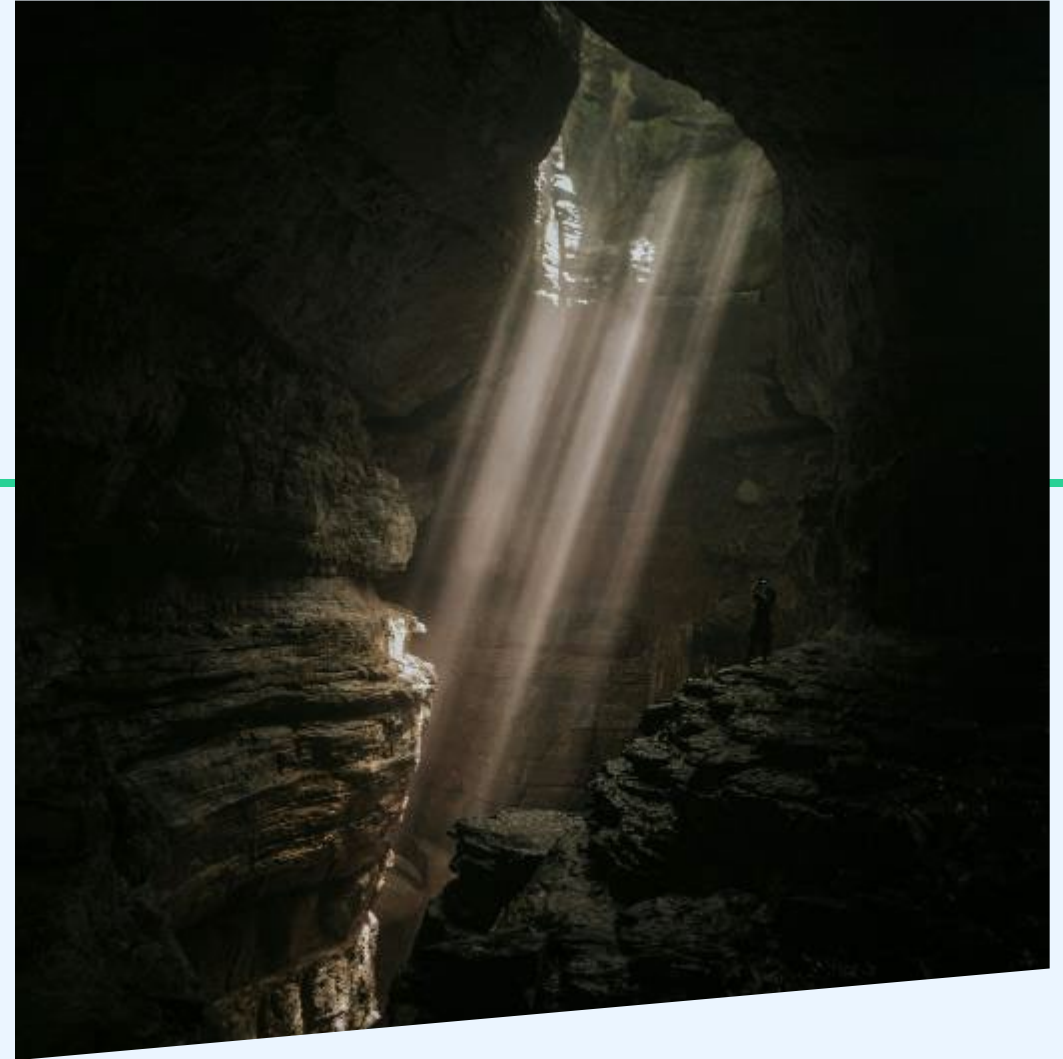
Anmerkung: a) Spezifische Einflussfaktoren, Unsicherheiten und CO₂e-Projektionen finden sich in den [Sektorkapiteln](#).

Quellen: 1) [UBA \(2023j\)](#); 2) Bereits implementierte und beschlossene Politiken und Maßnahmen (PaMs) der Bundesregierung des Mit-Maßnahmen-Szenarios (MMS) gemäß [UBA \(2023j\)](#).

4

Einsparpotenzial digitaler Technologien

1. Energie
2. Gebäude
3. Industrie
4. Landwirtschaft
5. Verkehr





Die folgenden Kapitelpage haben eine einheitliche Struktur und beinhalten eine Sektorübersicht sowie Informationen zu den einzelnen Anwendungsfällen

Sektorübersicht

Sektorzusammenfassung

Zusammenfassung Energie
Im Energiesektor können digitale Technologien bis zu 8,7% zur Erreichung Klimaziele 2030 beitragen

Der Energiesektor
 Der Energiesektor umfasst Erzeugung, Verteilung, Speicherung und Nutzung von Elektrizität und Wärme. Er ist einer der größten Wirtschaftssektoren in Deutschland und trägt maßgeblich zur Erreichung der Klimaziele bei.

Beitrag zur Erreichung der Klimaziele 2030
 Der Energiesektor trägt mit einem Anteil von 14,4–15,5% zur Erreichung der Klimaziele bei. Durch den Einsatz digitaler Technologien kann dieser Beitrag auf bis zu 24,5–26,4% gesteigert werden. Ein weiterer Beitrag von bis zu 8,7% kann durch Digitalisierung im Energiesektor erreicht werden.

CO₂e-Projektionen^a

Energie - CO₂e-Projektionen
Die möglichen Entwicklungen in der Bruttostromerzeugung wurden in den Projektionen dargestellt

Definition und Erklärungen im Energiesektor
 Die CO₂e-Projektionen zeigen die Bruttostromerzeugung in TWh pro Jahr. Die Erzeugung wird in konventionelle Erzeugung (Kern, Kohle, Gas, Braunkohle) und erneuerbare Erzeugung (Wind, Solar, Wasserkraft) unterteilt.

CO₂e-Projektionen
 Die CO₂e-Projektionen zeigen die Bruttostromerzeugung in TWh pro Jahr. Die Erzeugung wird in konventionelle Erzeugung (Kern, Kohle, Gas, Braunkohle) und erneuerbare Erzeugung (Wind, Solar, Wasserkraft) unterteilt.

CO₂e-Reduktionspotenziale

Energie - CO₂e-Reduktionspotenziale
Bis zu 26,9 MT CO₂e lassen sich durch Smart Grids und die smarte Erzeugung erneuerbarer Energien im Energiesektor in 2030 einsparen

CO₂e-Reduktionspotenziale im Jahr 2030 bei der Bruttostromerzeugung

Erklärungen
 Die CO₂e-Reduktionspotenziale zeigen die möglichen Reduktionspotenziale im Energiesektor in 2030. Die Reduktionspotenziale sind in absolute Reduktionspotenziale (in TWh) und relative Reduktionspotenziale (in %) unterteilt.

Maßnahme	Absolute Reduktionspotenziale (TWh)	Relative Reduktionspotenziale (%)
Smart Grids	14,1	14,1
Erneuerbare Energien	9,8	9,8
Digitalisierung	7,1	7,1
Effizienzmaßnahmen	5,1	5,1
Smart Buildings	4,4	4,4
Smart Factories	2,9	2,9
Gesamt	26,9	26,9

Sektorübersicht

- Sektorzusammenfassung
- CO₂e-Projektionen
 - Quantifizierung der drei CO₂e-Projektionen
 - Beschreibung und Herleitung der CO₂e-Projektionen
- CO₂e-Reduktionspotenziale
 - Quantifizierte Reduktionspotenziale des Sektors – differenziert nach CO₂e-Projektion und Digitalisierungsgeschwindigkeit
 - Kurze Erläuterung der Erkenntnisse

Drei Schwerpunkte je Anwendungsfall

Einführung

Energie - Smart Grids
Durch den Einsatz digitaler Technologien ermöglichen Smart Grids den Betrieb und die Optimierung des Stromnetzes

Smart Grids
 Smart Grids sind intelligente Stromnetze, die durch den Einsatz digitaler Technologien den Betrieb und die Optimierung des Stromnetzes ermöglichen.

Wichtige digitale Techniken
 Smart Meters und intelligente Zähler sind die wichtigsten digitalen Techniken im Smart Grid. Sie ermöglichen die Messung und Übertragung von Verbrauchsdaten in Echtzeit.

CO₂e-Reduktionspotenziale

Energie - Smart Grids
Durch Smart Grids können 2030 Einsparpotenziale von bis zu 18,6 MT werden

CO₂e-Reduktionspotenziale im Jahr 2030 durch Smart Grids

Maßnahme	Absolute Reduktionspotenziale (TWh)	Relative Reduktionspotenziale (%)
Smart Grids	18,6	18,6
Erneuerbare Energien	14,1	14,1
Digitalisierung	7,1	7,1
Effizienzmaßnahmen	5,1	5,1
Smart Buildings	4,4	4,4
Smart Factories	2,9	2,9
Gesamt	18,6	18,6

Fallstudie/Good Practice

Energie - Smart Grids
Zwischen 2017 und 2020 haben fünf Modellregionen in Deutschland die Anwendung von Smart Grids erprobt und konnten dadurch Netzverluste reduzieren

Qualitativer Nutzen
 Die CO₂e-Reduktionspotenziale zeigen die möglichen Reduktionspotenziale im Energiesektor in 2030. Die Reduktionspotenziale sind in absolute Reduktionspotenziale (in TWh) und relative Reduktionspotenziale (in %) unterteilt.

Maßnahme	Absolute Reduktionspotenziale (TWh)	Relative Reduktionspotenziale (%)
Smart Grids	18,6	18,6
Erneuerbare Energien	14,1	14,1
Digitalisierung	7,1	7,1
Effizienzmaßnahmen	5,1	5,1
Smart Buildings	4,4	4,4
Smart Factories	2,9	2,9
Gesamt	18,6	18,6

4.1

Energie

Im Energiesektor können digitale Technologien bis zu 8,7% zur Erreichung des Klimaziels 2030 beitragen

Der Energiesektor

Der Energiesektor umfasst Emissionen, die bei der Bereitstellung von Energieträgern zur Nutzung in anderen Sektoren entstehen. Dazu gehören die öffentliche Strom- und Fernwärmeversorgung, die über 80% der hier bilanzierten Emissionen im Sektor ausmachen. Insgesamt macht der Energiesektor 34,4% der Gesamtemissionen in Deutschland aus.

14,4–15,5%
= 24,5–26,4
MT CO₂e

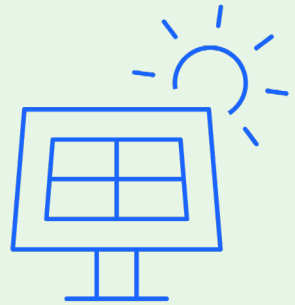
können bei mittlerer CO₂e-Projektion durch digitale Technologien im Energiesektor reduziert werden – abhängig von der Digitalisierungsgeschwindigkeit in Deutschland. Je nach CO₂e-Projektion liegt die Einsparung bei bis zu 26,9 MT.

Bis zu **8,7%**

der Klimalücke in Höhe von 308 MT CO₂e lassen sich durch digitale Technologien im Energiesektor schließen.

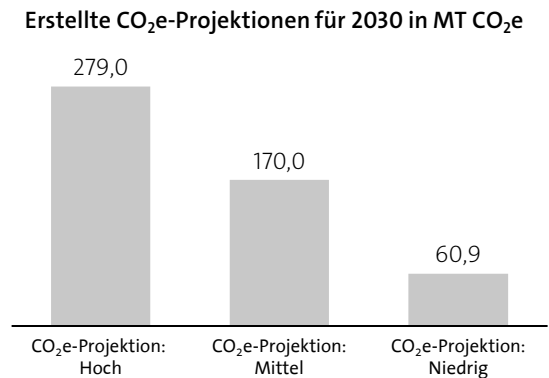
Kernerkenntnisse

1. Mehr Strom aus erneuerbaren Energien, gesteigert durch digitale Technologien, spielt eine zentrale Rolle für CO₂e-Einsparpotenziale und Emissionsreduktion.
2. Smart Grids und smarte Erzeugung erneuerbarer Energien (EE) ermöglichen je nach Digitalisierungsgeschwindigkeit 14,4–15,5% Emissionsreduktion in der Bruttostromerzeugung und -verteilung.^a
3. Die ermittelten Prognosen zeigen: Smart Grids und smarte Erzeugung EE^b werden zwischen 2023 und 2030 zusätzliche 40–61 Prozentpunkte Marktdurchdringung erfahren.^c



CO₂e-Projektionen und Einflussfaktoren

Um das Reduktionspotenzial digitaler Technologien im Energiesektor im Jahr 2030 zu bewerten, wurden aufgrund variabler Einflussfaktoren drei verschiedene CO₂e-Emissionsprojektionen erstellt. Die Emissionsfaktoren werden stark durch die Ausbaugeschwindigkeit erneuerbarer Energien wie Solar- und Windkraft, sowie die Entwicklung der Netzinfrastruktur und Stromspeicher beeinflusst. Zusätzlich hat der Energieverbrauch, beeinflusst durch Industrieelektrifizierung, Strompreisschwankungen, Konsumverhaltensänderungen und Unternehmensinvestitionen, einen bedeutenden Einfluss auf die Emissionswerte.



Die möglichen Entwicklungen in der Bruttostromerzeugung wurden in drei CO₂e-Projektionen dargestellt



Definition und Einflussfaktoren im Energiesektor

Der Sektor Energiewirtschaft umfasst gemäß dem Bundes-Klimaschutzgesetz alle Emissionen, die bei der Bereitstellung von Energieträgern zur Nutzung in anderen Sektoren entstehen. Dazu gehören die öffentliche Strom- und Fernwärmeversorgung, die über 80% der hier bilanzierten Emissionen ausmachen. Zusätzlich werden Emissionen aus Raffinerien, der Herstellung von festen Brennstoffen wie Koks und weiteren Anlagen, Verdichterstationen im Erdgastransportnetz sowie flüchtige Emissionen, die bei der Nutzung von Brennstoffen entstehen, berücksichtigt.^{1,2}

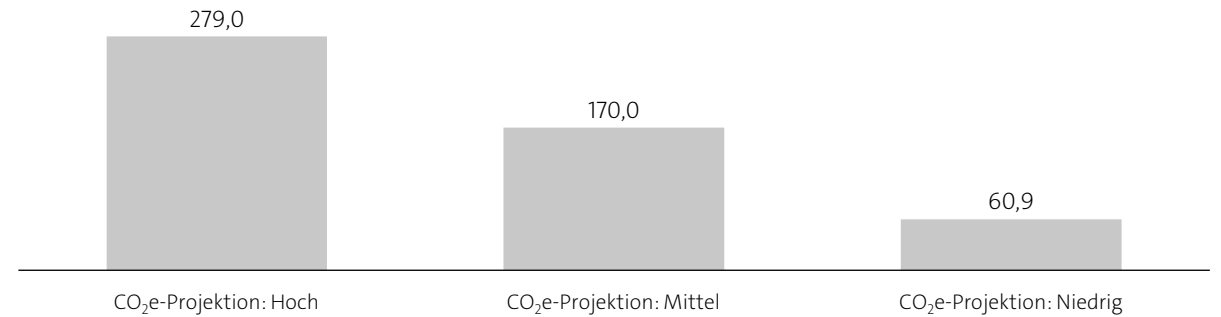
Einflussfaktoren bei der CO₂e-Projektion im Energiesektor

Zur Ermittlung des CO₂e-Reduktionspotenzials digitaler Technologien im Energiesektor für das Jahr 2030 ist eine entsprechende CO₂e-Projektion für 2030 erforderlich.^a Um mögliche Entwicklungsverläufe abzudecken und ein breiteres Verständnis der potenziellen Auswirkungen zu gewährleisten, wurden drei unterschiedliche CO₂e-Projektionen erstellt. Diese CO₂e-Projektionen werden hauptsächlich durch die folgenden variablen Einflussfaktoren determiniert:

- **Stromemissionsfaktor:** Zunächst beeinflusst die Ausbaugeschwindigkeit erneuerbarer Energien, wie Solar- und Windkraft, sowie die Entwicklung der Netzinfrastruktur und Stromspeicher maßgeblich die Emissionsfaktoren. Ein schnellerer Ausbau führt zu niedrigeren Emissionen, dieser ist jedoch von politischen Entscheidungen, technologischen Fortschritten und ökonomischen Faktoren abhängig.
- **Energieverbrauch:** Ebenso spielt der Energieverbrauch eine entscheidende Rolle. Die Elektrifizierung innerhalb der Industrie, schwankende Strompreise, Änderungen im Konsumverhalten und Investitionen der Unternehmen können den Energiebedarf und damit die Emissionen stark beeinflussen.

CO₂e-Projektionen

[in MT CO₂e]



In allen drei CO₂e-Projektionen wurde ein Bruttostromverbrauch von 660,6 TWh für 2030 angenommen, basierend auf dem Projektionsbericht 2023 des Umweltbundesamts.¹ Um einen unterschiedlich hohen Ausbau der erneuerbaren Energien im Strommix darzustellen, wurden für die CO₂e-Projektionen jeweils abweichende Stromemissionsfaktoren angewandt.^b

CO₂e-Projektion hoch – Diese CO₂e-Projektion basiert auf einem Stromemissionsfaktor von 422,37 g/kWh^c. Dieser basiert auf der Annahme, dass sich der Stromemissionsfaktor in dem Tempo verbessert, wie es in den letzten fünf Jahren der Fall war.^a

CO₂e-Projektion mittel – Für diese CO₂e-Projektion wurde der Stromemissionsfaktor von 257,29 g/kWh gewählt (Mittelwert der Emissionsfaktoren der hohen und niedrigen CO₂e-Projektionen), um einen moderaten Ausbau klimafreundlicher Energieträger zu simulieren.

CO₂e-Projektion niedrig – Diese CO₂e-Projektion berücksichtigt als Stromemissionsfaktor 92,20 g/kWh, basierend auf dem Projektionsbericht 2023 für Deutschland im MMS in 2030 und einem 85% Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch.^{1,d}

Anmerkungen: a) Siehe Seite 18 zur Berechnungslogik; b) Accenture Berechnung; Details zu Quellen und Berechnungen sind im Anhang zu finden; c) Gemeint sind immer g CO₂e/kWh;

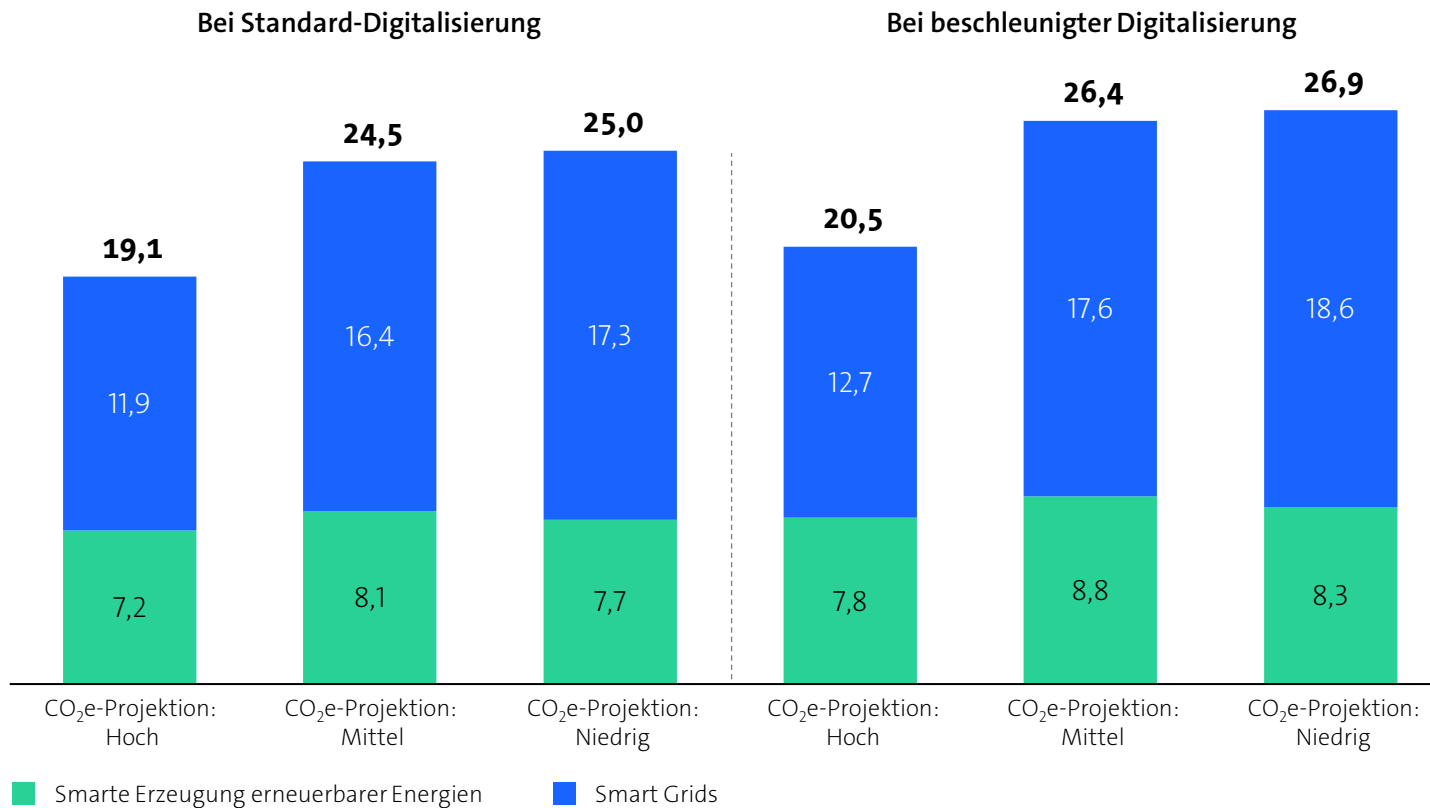
d) Es werden die Treibhausgasemissionen in Deutschland des Mit-Maßnahmen-Szenarios (MMS) des UBA-Projektionsberichtes herangezogen.

Quellen: 1) UBA (2023j); 2) BMJ & BfJ (2019).

Bis zu 26,9 MT CO₂e lassen sich durch Smart Grids und die smarte Erzeugung erneuerbarer Energien im Energiesektor in 2030 einsparen

CO₂e-Einsparpotenziale im Jahr 2030 bei der Bruttostromerzeugung

[in MT CO₂e]



Erkenntnisse

Die CO₂e-Einsparpotenziale durch digitale Technologien wurden anhand nachstehender zwei Anwendungsfälle berechnet. Die CO₂e-Einsparungen resultieren dabei primär aus der effizienteren Erzeugung und Nutzung erneuerbarer Energien, die wiederum den Anteil von Strom aus Kohle und Gas reduzieren.^a Der Großteil der Einsparungen stammt aus dem Anwendungsfall Smart Grids.

Smart Grids

Smart Grids, hauptsächlich durch Lastverschiebung und -flexibilität^b, ermöglichen in 2030 eine Emissionsreduktion von bis zu 9,6% (=16,4 MT CO₂e) bei Standard-Digitalisierung und 10,4% (=17,6 MT CO₂e) bei beschleunigter Digitalisierung, basierend auf der mittleren CO₂e-Projektion der Bruttostromerzeugung (=170,0 MT CO₂e).

Smarte Erzeugung erneuerbarer Energien

Effizienzsteigerungen in Wind- und Solarparks ermöglichen in 2030 eine Emissionsreduktion von bis zu 4,8% (=8,1 MT CO₂e) bei Standard-Digitalisierung und 5,2% (=8,8 MT CO₂e) bei beschleunigter Digitalisierung, basierend auf der mittleren CO₂e-Projektion der Bruttostromerzeugung (=170,0 MT CO₂e).

Anmerkungen: Abweichungen in den Summen können aus Rundungen resultieren; a) Die genannten Anwendungsfälle adressieren die Erzeugung und Nutzung erneuerbarer Energien. Im Unterschied zu den anderen Sektoren erhöhen sich die CO₂e-Einsparungen hier mit einem wachsenden Anteil erneuerbarer Energien in der CO₂e-Projektion, also bei niedriger CO₂e-Projektion. Das bedeutet: Die Emissionseinsparungen der betrachteten Anwendungsfälle sind umso größer, je erfolgreicher die Energiewende verläuft; b) Beschreibt die Anpassung des Stromverbrauches an das Angebot erneuerbarer Energien.

4.1.1

Energie

Smart Grids

Durch den Einsatz digitaler Technologien ermöglichen Smart Grids den intelligenten Betrieb und die Optimierung des Stromnetzes



Smart Grids

Smart Grids sind intelligente Stromnetze, die traditionelle Energieinfrastrukturen mit digitaler Technologie und automatisierter Steuerung kombinieren. Sie ermöglichen eine effizientere Stromübertragung und -verteilung.

Durch Sensoren, Smart Meter und Echtzeit-Datenverarbeitung gleichen sie dynamisch Angebot und Nachfrage nach Energie aus und optimieren die Energieversorgung.

Sie integrieren erneuerbare Energiequellen und erhöhen die Resilienz bei Störungen, was zu stabileren und nachhaltigeren Netzen führt.

Endverbraucherinnen und Endverbraucher können ihren Energieverbrauch aktiv steuern und optimieren, was bewusstere Energieentscheidungen und potenzielle Kosteneinsparungen ermöglicht.

Smart Grids bilden eine zentrale Komponente für eine umweltfreundliche und resiliente Energiezukunft.

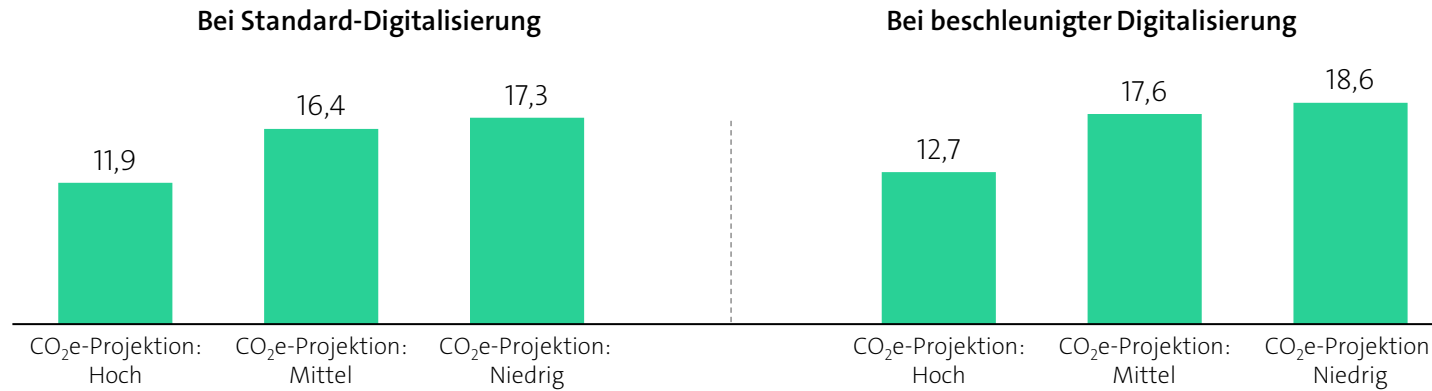
Wichtigste digitale Technologien

- **Smart Meter und Advanced Metering Infrastructure (AMI):** Smart Meter erfassen den Energieverbrauch in Echtzeit und ermöglichen eine dynamische Tarifgestaltung sowie effiziente Energieverwendung. AMI ist ein integriertes System aus intelligenten Zählern, Datenmanagementsystemen und Kommunikationsnetzwerken, das eine Zwei-Wege-Kommunikation zwischen Versorgungsunternehmen und Kunden ermöglicht.
- **Phasor Measurement Units (PMUs):** PMUs liefern präzise Echtzeitdaten zur Stromqualität und Netzstabilität, was für eine verbesserte Überwachung und Steuerung des Stromnetzes unerlässlich ist.
- **Demand Response (DR):** DR-Programme ermöglichen es Verbraucherinnen und Verbrauchern, einen Beitrag zum Betrieb des Stromnetzes zu leisten, indem sie durch finanzielle Anreize ihren Stromverbrauch in Spitzenzeiten reduzieren (Lastensenkung) oder verlagern (Lastenverschiebung).
- **Künstliche Intelligenz (KI) und Maschinelles Lernen (ML):** Diese Technologien sind wesentlich für die Optimierung und Steuerung von Smart Grid Systemen. Sie ermöglichen es, große Mengen an Netzdaten zu analysieren, um Muster zu erkennen, Prognosen zu erstellen und automatisierte Entscheidungen für die Netzoptimierung und Störungsbehebung zu treffen.

Durch Smart Grids können 2030 Einsparpotenziale von bis zu 18,6 MT CO₂e realisiert werden

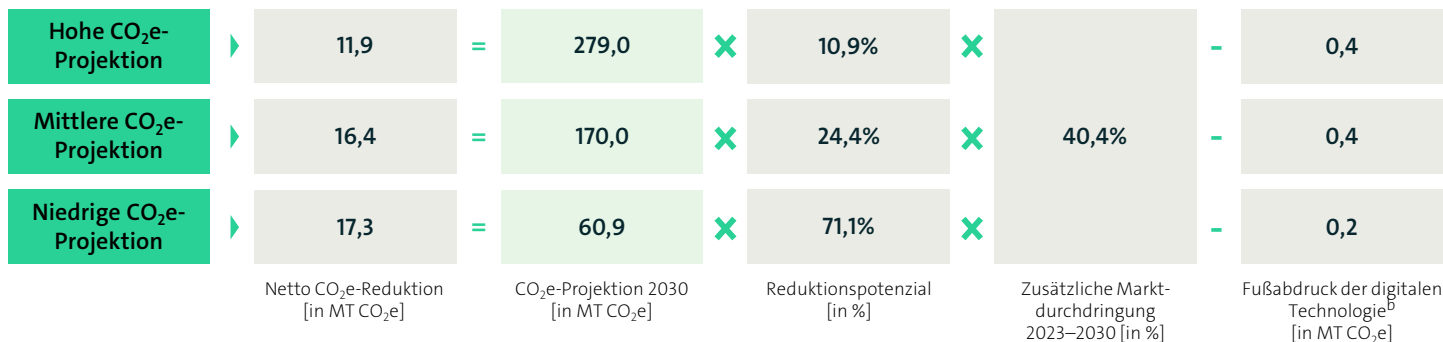
CO₂e-Einsparpotenziale im Jahr 2030 durch Smart Grids

[in MT CO₂e]



Berechnung der Netto CO₂e-Reduktion am Beispiel der Standard-Digitalisierung

[in MT CO₂e]^a



Qualitativer Nutzen

Smart Grids spielen durch intelligente Laststeuerung eine wesentliche Rolle bei der Reduktion der CO₂e-Emissionen im Energiesektor.

Eine Lastensenkung glättet Verbrauchsspitzen und verringert so die Notwendigkeit, fossile Spitzenlastkraftwerke einzusetzen, die gewöhnlich einen höheren CO₂e-Ausstoß verursachen.

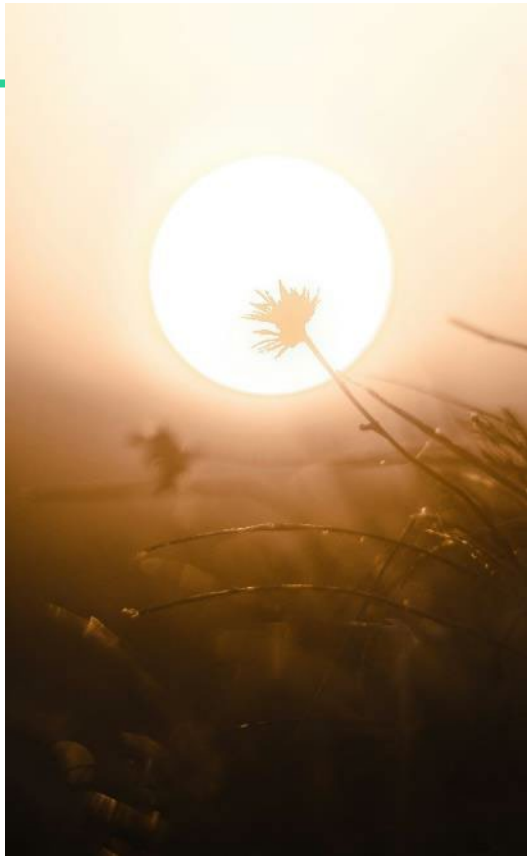
Die Lastenverschiebung, das heißt die Anpassung des Energieverbrauchs an Zeiten mit hohem Angebot an erneuerbaren Energien, fördert die Nutzung erneuerbarer Energien und mindert die Abhängigkeit von emissionsintensiven Quellen.

Eine gezielte Lastenerhöhung, wie das intelligente Laden von Elektrofahrzeugen, hilft, temporäre Überschüsse erneuerbarer Energien zu nutzen und steigert dadurch die Gesamteffizienz des Systems. Diese koordinierten Maßnahmen reduzieren den CO₂e-Fußabdruck des Energiesektors erheblich und tragen so zum Klimaschutz bei.^{1,2}

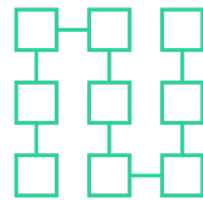
Anmerkungen: a) Zur besseren Lesbarkeit wurden gerundete Werte verwendet; b) CO₂e-Emissionen, die aus der Nutzung digitaler Technologien entstehen.

Quellen: 1) BMWK (2022b); 2) BMWK (2023a).

Zwischen 2017 und 2020 haben fünf Modellregionen in Deutschland die Anwendung von Smart Grids erprobt und konnten dadurch Netzverluste reduzieren



Fallstudie: Smart Grids^a



20–30%

Reduktion der Netzverluste durch intelligente Netzsteuerung^{1,2}

Ausgangslage

Das Förderprogramm SINTEG (Schaufenster intelligente Energie – digitale Agenda für die Energiewende) wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz unterstützt. Mit einer Förderung von über 200 Millionen Euro zielte das Programm darauf ab, skalierbare Musterlösungen zu entwickeln. Diese Lösungen sollten eine Energieversorgung ermöglichen, die trotz hoher Anteile fluktuierender Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie funktioniert. Ziel war es, dass die Energieversorgung gleichzeitig sicher, wirtschaftlich und umweltverträglich ist. Hierbei waren etwa 300 Projektpartnerinnen und Projektpartner in fünf Modellregionen involviert, die Pilotprojekte durchführten. Unter anderem wurde die intelligente Steuerung des Netzes erprobt.

Digitale Technologien

Im Rahmen von SINTEG wurden unter anderem Pilotprojekte zu intelligenten Ortsnetzen umgesetzt. Als Ortsnetz bezeichnet man das Niederspannungsnetz, das die lokalen Verteilnetze umfasst, die letztlich den Strom ins Haus liefern. Die wichtigsten Merkmale eines solchen Pilotprojektes waren:

- a) Installation von intelligenter Schalt- und Messtechnik sowie Algorithmen für die automatisierte Steuerung von Ortsnetzstationen.
- b) Einbau einer Kontrolleinheit in der Umspannanlage zur selbständigen Überwachung, Schaltung und Steuerung des Netzbereiches.

Reduktionspotenzial

Durch kontinuierliche Überwachung und datengestützte Vorhersage des Netzzustandes konnten Netzverluste um etwa 20–30% reduziert werden. Zudem ließen sich 30–40% der Netzausfallzeiten verringern und die Einspeisekapazität für dezentral erzeugten Strom aus erneuerbaren Energiequellen um ca. 17% steigern.

4.1.2

Energie

Smarte Erzeugung erneuerbarer Energien

Durch den Einsatz digitaler Technologien können Wind- und Solaranlagen genauer und in Echtzeit gesteuert sowie vorausschauender betrieben werden



Smarte Erzeugung erneuerbarer Energien

Die smarte Erzeugung erneuerbarer Energien nutzt digitale Technologien und Methoden, um die Effizienz und Zuverlässigkeit bei der Energiegewinnung aus erneuerbaren Quellen zu maximieren.

Eine zentrale Rolle spielt dabei die prädiktive Wartung (Predictive Maintenance), die durch die Analyse von Betriebsdaten den Wartungsbedarf vorhersagt, Ausfallzeiten minimiert und die Lebensdauer von Anlagen wie Windturbinen und Solaranlagen verlängert.

Smarte Steuerungssysteme optimieren den Energieertrag von Windkraftanlagen durch laufende Analyse von Windgeschwindigkeit und -richtung. Die Systeme passen den Anströmwinkel der Rotorblätter und die Ausrichtung der Anlage zum Wind in Echtzeit an, um einen maximalen Energieertrag zu erreichen.

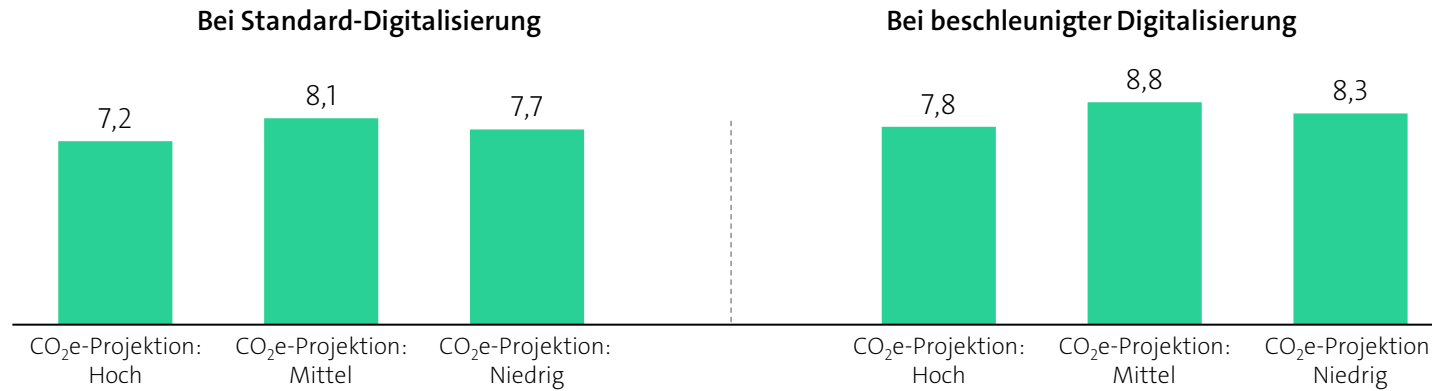
Wichtigste digitale Technologien

- **Intelligente Steuerungssysteme:** Diese Systeme spielen eine Schlüsselrolle in der Maximierung der Energieausbeute. Sie ermöglichen eine präzise und automatische Ausrichtung von Solarpanelen sowie die optimale Positionierung der Rotorblätter bei Windkraftanlagen. Diese technologische Feinabstimmung ist entscheidend, um die Energieeffizienz und die Gesamtleistung der Anlagen zu verbessern.
- **Internet der Dinge (IoT):** IoT-Technologien sind von zentraler Bedeutung für die intelligente Energieerzeugung. Durch den Einsatz von Sensoren und Aktoren, die kontinuierlich Daten sammeln und kommunizieren, unterstützt IoT die prädiktive Wartung und ermöglicht die Feinjustierung von Steuerungssystemen.
- **Künstliche Intelligenz (KI) und Maschinelles Lernen (ML):** KI und ML sind entscheidend für die Analyse der gesammelten Betriebsdaten. Sie ermöglichen eine intelligenteren und vorausschauenden Steuerung der Anlagen. Durch die Auswertung der Daten können potenzielle Probleme und Wartungsbedarfe frühzeitig erkannt werden, was zur Effizienzsteigerung und Langlebigkeit der Anlagen beiträgt.

Durch smarte Erzeugung erneuerbarer Energien können 2030 Einsparpotenziale von bis zu 8,8 MT CO₂e realisiert werden

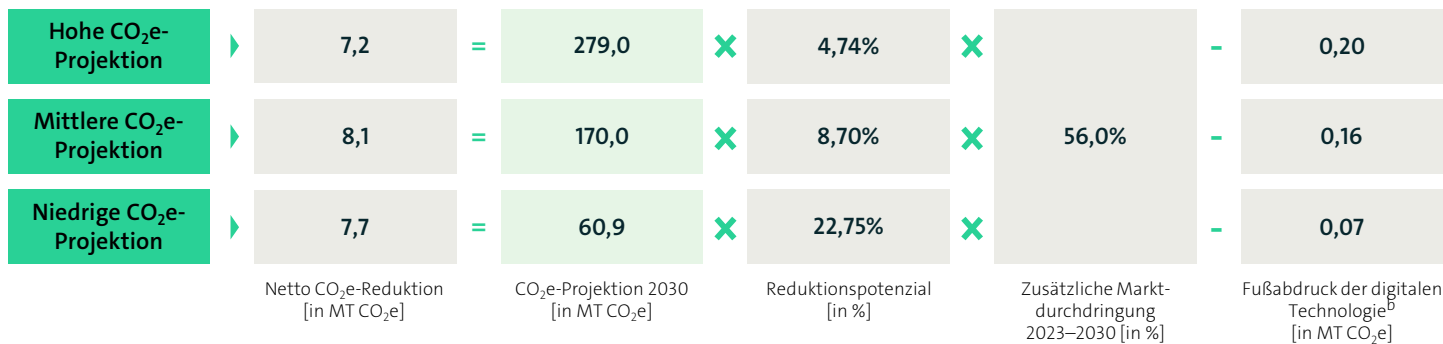
CO₂e-Einsparpotenziale im Jahr 2030 durch die smarte Erzeugung erneuerbarer Energien

[in MT CO₂e]



Berechnung der Netto CO₂e-Reduktion am Beispiel der Standard-Digitalisierung

[in MT CO₂e]^a



Qualitativer Nutzen

Die smarte Erzeugung erneuerbarer Energien erhöht durch zwei verschiedene Wirkungsmechanismen den Energieertrag von Wind- und Solarparks.

Bei Windkraftanlagen ermöglichen fortschrittliche Simulationen und Echtzeitdaten eine kontinuierliche Anpassung der Rotorblätter und der Anlagenausrichtung zum Wind. Dies maximiert den Energieertrag des Windparks. Ebenso profitieren Solaranlagen von einer optimierten Modulausrichtung, die sich anhand realer Sonnenstände und Wetterbedingungen wie Bewölkung automatisch justiert.

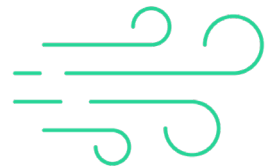
Prädiktive Wartung erlaubt die frühzeitige Erkennung von Ineffizienzen in Komponenten wie Getrieben oder Schaltkreisen. Beispielsweise kann durch das frühzeitige Erkennen eines abnutzungsbedingten Fehlers in einem Rotorblatt einer Windkraftanlage rechtzeitig reagiert werden, bevor es zu ernsthaften Leistungseinbußen oder Ausfällen kommt.^{1,2,3}

Anmerkungen: a) Zur besseren Lesbarkeit wurden gerundete Werte verwendet; b) CO₂e-Emissionen, die aus der Nutzung digitaler Technologien entstehen.
 Quellen: 1) Wind Europe (2021); 2) Betti et al. (2019); 3) Ingram (2020).

Die Anwendung von Echtzeitdaten, Analytik und maschinellem Lernen erhöhte den jährlichen Energieertrag eines Windparks um 2,5%



Fallstudie: Smarte Erzeugung erneuerbarer Energien^a



2,5%

Steigerung des jährlichen Energieertrags eines Windparks¹

Ausgangslage

Um die Energieeffizienz von Windparks zu steigern, stellt die datenbasierte Analyse zur Aufdeckung und Behebung verborgener Energieverluste eine effektive Strategie dar. Die Firma WindESCo hat sich dieser Aufgabe angenommen und eine Optimierungsstrategie für einen Windpark mit 145 MW Leistung entwickelt und umgesetzt.

Digitale Technologien

Die zugrundeliegende Technologie kombiniert Echtzeitdaten der Windkraftanlagen mit fortschrittlicher Analytik, proprietären Algorithmen und Expertenwissen, um mittels maschinellen Lernens die Leistung zu analysieren und zu optimieren. Dies ermöglicht die Identifikation und Korrektur von Ineffizienzen, was die Gesamteffizienz des Windparks steigert. Zusätzlich kommen KI-Algorithmen zur Optimierung der Anstellwinkel der Rotorblätter sowie der Ausrichtung der Anlagen zum Wind zum Einsatz.

Reduktionspotenzial

Durch die Implementierung der Technologie konnte eine Steigerung der Energieproduktion um 2,5% erreicht werden, was in dem besprochenen Fall zu jährlichen Mehrerträgen von 390.000 Euro führte. Die gezielten Korrekturen, insbesondere die Anpassungen der Stellung der Rotorblätter, haben zu einer Ertragssteigerung von 2.725 Euro pro MW pro Jahr beigetragen, was das finanzielle Potenzial der Technologie unterstreicht.

4.2

Gebäude

Im Gebäudesektor können digitale Technologien bis zu 9,4% zur Erreichung des Klimaziels 2030 beitragen

Der Gebäudesektor

Der Gebäudesektor umfasst die Emissionen, die bei der Nutzung von Gebäuden entstehen. Dazu zählen Raumwärme, Klimakälte sowie Beleuchtung in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden. Mehr als 50% der Gesamtemissionen entfallen dabei auf die Raumwärme bei Wohngebäuden. Etwa 27% macht die Raumwärme in Nichtwohngebäuden aus, weitere 18% entfallen auf deren Beleuchtung und Klimakälte.

Kernerkenntnisse

1. Die Elektrifizierung und Sanierung des Gebäudesektors, gesteigert durch digitale Technologien, spielt eine zentrale Rolle für die Emissionsreduktion.
2. Smart Home und vernetzte Gebäude ermöglichen je nach Digitalisierungsgeschwindigkeit 8,1–12,0% Emissionsreduktion im Gebäudesektor.^a
3. Die ermittelten Prognosen zeigen: Smart Home Technologien werden zwischen 2023 und 2030 zusätzliche 37–53 Prozentpunkte Marktdurchdringung erfahren.^b



8,1–12,0%

= 12,4–18,3
MT CO₂e

Bis zu **9,4%**

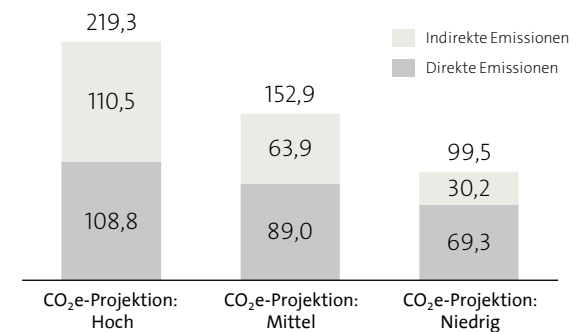
können bei mittlerer CO₂e-Projektion durch digitale Technologien im Gebäudesektor reduziert werden – abhängig von der Digitalisierungsgeschwindigkeit in Deutschland. Je nach CO₂e-Projektion liegt die Einsparung bei bis zu 29,1 MT.

der Klimalücke in Höhe von 308 MT lassen sich durch digitale Technologien im Gebäudesektor schließen.

CO₂e-Projektionen und Einflussfaktoren

Um das Reduktionspotenzial digitaler Technologien im Gebäudesektor in 2030 zu bewerten, wurden aufgrund variabler Einflussfaktoren drei verschiedene CO₂e-Emissionsprojektionen erstellt. Diese werden maßgeblich durch den Endenergieverbrauch, abhängig von den Energie- und Strompreisen sowie dem Konsumverhalten, beeinflusst. Die Aufteilung der Verbräuche auf die verschiedenen Energieträger, wie z.B. Erdgas oder Biomasse, spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Durch eine steigende Nutzung von Strom bzw. Wärmepumpen, hat auch der Emissionsfaktor des Stroms, bzw. der Anteil und die Ausbaugeschwindigkeit der erneuerbaren Energien, einen entscheidenden Einfluss.

Erstellte CO₂e-Projektionen für 2030 in MT CO₂e



Die möglichen Entwicklungen des Energieverbrauchs, der Anteile der Energieträger und des Stromemissionsfaktors wurden in drei CO₂e-Projektionen dargestellt



Definition und Einflussfaktoren im Gebäudesektor

Der Sektor Gebäude umfasst gemäß dem Bundes-Klimaschutzgesetz direkte Emissionen privater Haushalte und im Bereich GHD^a. Dazu zählen Brennstoffe wie Gas oder Heizöl, die für Raumwärme und Warmwasser genutzt werden. Im Gegensatz zu der UBA-Bilanzierung laut Quellprinzip¹, beruft sich diese Studie im Bereich Gebäude auf das Verursacherprinzip.² Die untersuchten digitalen Technologien beeinflussen auch den Stromverbrauch, weshalb hier sowohl Emissionen der Raumwärme (z.B. durch Kohle oder Erdgas) als auch die Stromemissionen von Raumwärme, beispielsweise durch Wärmepumpen, sowie Beleuchtung und Klimakälte inkludiert werden.

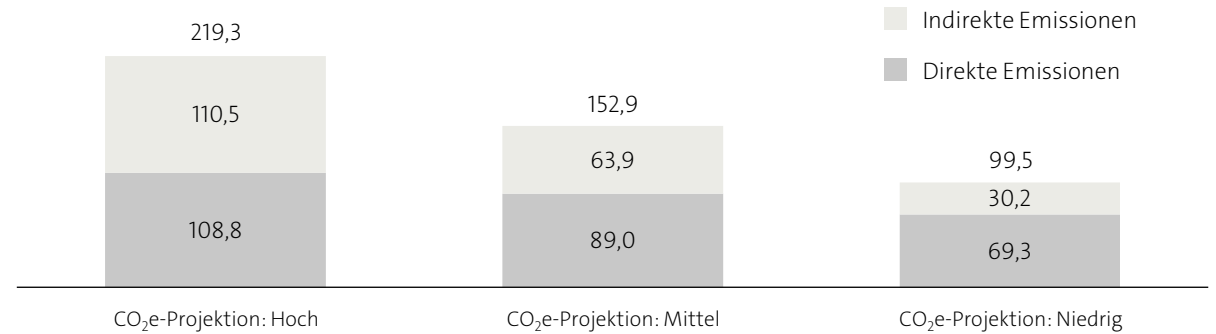
Einflussfaktoren bei der CO₂e-Projektion im Gebäudesektor

Zur Ermittlung des CO₂e-Reduktionspotenzials digitaler Technologien im Gebäudesektor für das Jahr 2030 ist eine entsprechende CO₂e-Projektion erforderlich.^b Um mögliche Entwicklungsverläufe zu berücksichtigen, wurden drei unterschiedliche CO₂e-Projektionen erstellt. Diese CO₂e-Projektionen werden primär durch folgende drei Einflussfaktoren determiniert:

- **Energieverbrauch:** Der Endenergieverbrauch wird unter anderem von Energie- bzw. Strompreisen, sowie Änderungen im Konsumverhalten beeinflusst.¹
- **Energieträger:** Die Aufteilung des Endenergieverbrauchs auf die verschiedenen Energieträger, wie z.B. Erdgas, Kohle, Biomasse, konventioneller Strom oder Wärmepumpen, beeinflusst ebenfalls die Emissionen, denn fossile Energieträger haben höhere Emissionsfaktoren als z.B. Wind- und Solarkraft.
- **Stromemissionsfaktor:** Zunächst beeinflusst die Ausbaugeschwindigkeit erneuerbarer Energien, sowie der Rückbau fossiler Energien maßgeblich den Emissionsfaktor des Stroms. Ein schnellerer Ausbau führt zu niedrigeren Emissionen, dieser ist jedoch von politischen Entscheidungen, technologischen Fortschritten und ökonomischen Faktoren abhängig.^c

CO₂e-Projektionen

[in MT CO₂e]



In allen drei CO₂e-Projektionen finden sowohl direkte als auch indirekte Emissionen des Gebäudesektors Berücksichtigung. Direkte Emissionen stammen unmittelbar aus der Verbrennung von Rohstoffen in privaten Haushalten und im Bereich GHD^a, während indirekte Emissionen z.B. durch die Nutzung von Wärmenetzen oder den Verbrauch von Strom verursacht werden.^{1,d}

CO₂e-Projektion hoch – Diese Projektion basiert auf den historisch konstanten Verbräuchen seit 2014 und der prozentualen Aufteilung der Energieträger aus 2020¹ unter der Prämisse, dass die Anteile der Raumwärme weitgehend konstant sind.³ Außerdem wurden Primärenergiefaktoren^{4,5,6} und ein angepasster Stromemissionsfaktor (422,37 g/kWh) verwendet.^{1,7,c}

CO₂e-Projektion mittel – Für diese Projektion wurde der Endenergieverbrauch, die Energieträger und der Stromemissionsfaktor aus der hohen CO₂e-Projektion und der niedrigen Projektion laut UBA gemittelt.^{1,3,c}

CO₂e-Projektion niedrig – Diese Projektion berücksichtigt für die Kalkulation die vom UBA prognostizierten Endenergieverbräuche der jeweiligen Energieträger und den Stromemissionsfaktor (92,20 g/kWh)¹ für 2030.^c

Anmerkungen: a) Gewerbe, Handel und Dienstleistungen; b) Siehe [Seite 18](#) zur Berechnungslogik; c) Detailliertere Informationen sind in dem [Kapitel des Energiesektors](#) zu finden;

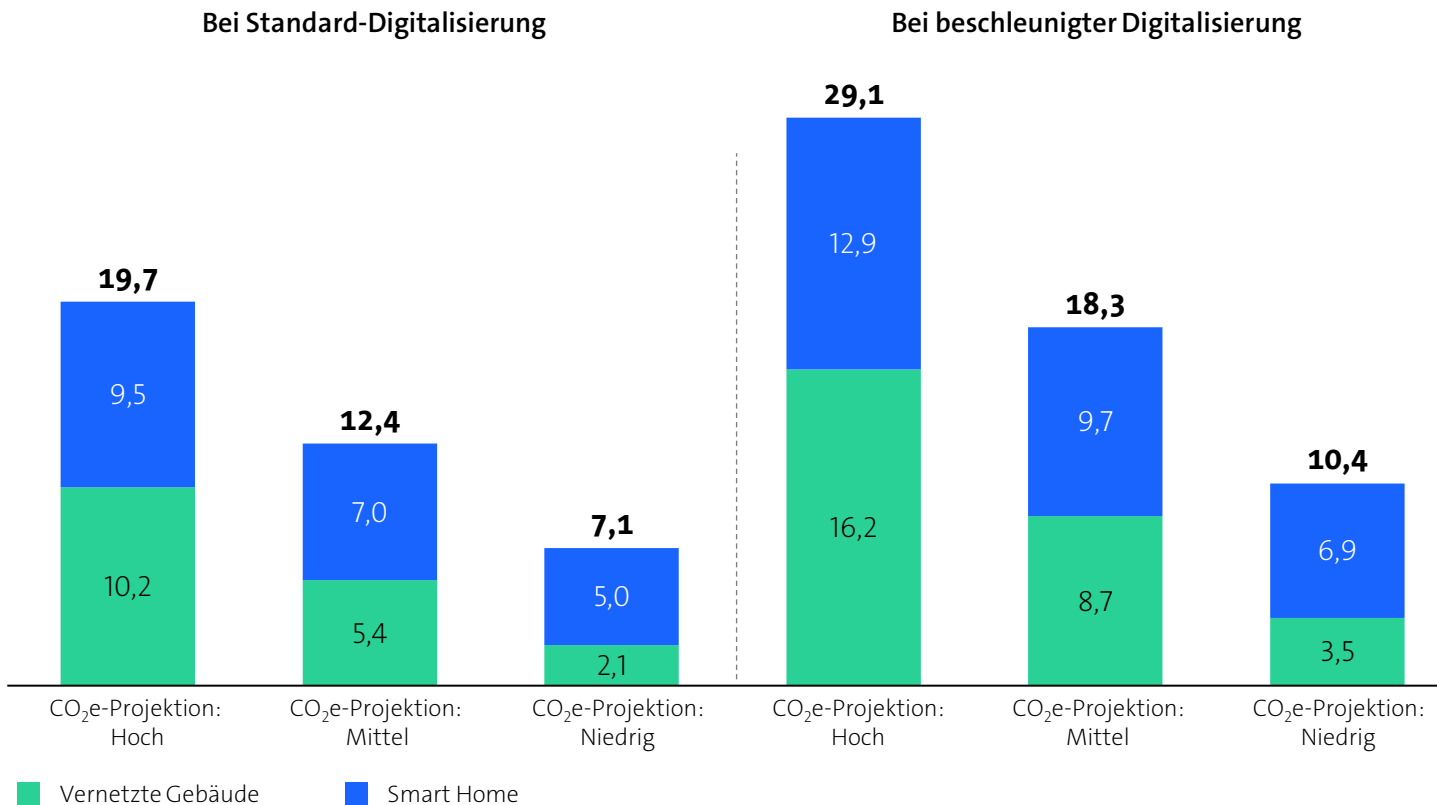
d) Accenture Berechnung: Details zu Quellen und Berechnungen sind im [Anhang](#) zu finden.

Quellen: 1) [UBA \(2023i\)](#); 2) [Architekturblatt \(2021\)](#); 3) [Dena \(2022\)](#); 4) [BDEW \(2022\)](#); 5) [UBA \(2023d\)](#); 6) [DBFZ \(2023\)](#); 7) [UBA \(2023f\)](#).

Bis zu 29,1 MT CO₂e lassen sich durch Smart Home und vernetzte Gebäude im Gebäudesektor in 2030 einsparen

CO₂e-Einsparpotenziale im Jahr 2030 im Gebäudesektor

[in MT CO₂e]



Erkenntnisse

Die CO₂e-Einsparpotenziale durch digitale Technologien wurden anhand nachstehender zwei Anwendungsfälle berechnet. Die CO₂e-Einsparungen resultieren dabei primär aus relativen Einsparungen im Energieverbrauch. Der Großteil der Einsparungen stammt aus dem Anwendungsfall vernetzte Gebäude.

Smart Home

Smart Home, hauptsächlich durch Gebäudemanagement und -automatisierung, ermöglichen in 2030 eine Emissionsreduktion von bis zu 8,3% (=7,0 MT CO₂e) bei Standard-Digitalisierung und 11,5% (=9,7 MT CO₂e) bei beschleunigter Digitalisierung, basierend auf der mittleren CO₂e-Projektion (=83,8 MT CO₂e).

Vernetzte Gebäude

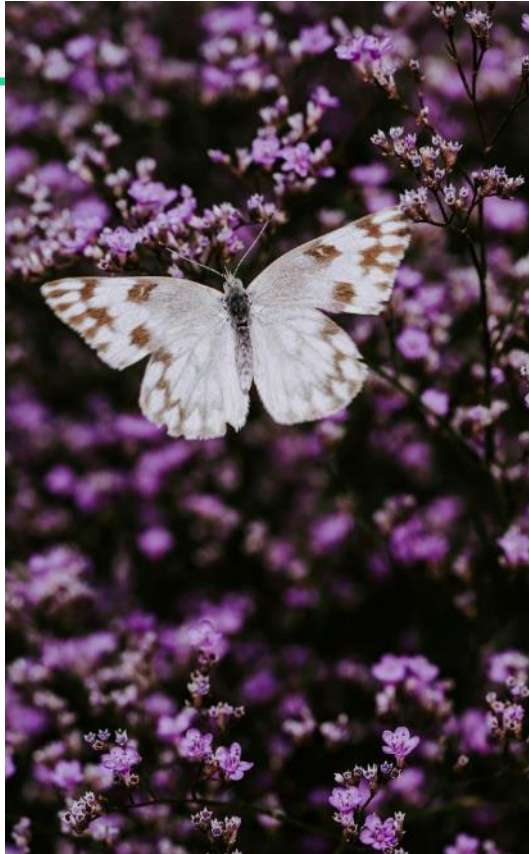
Vernetzte Gebäude, hauptsächlich durch Gebäudemanagement und -automatisierung, ermöglichen in 2030 eine Emissionsreduktion von bis zu 7,8% (=5,4 MT CO₂e) bei Standard-Digitalisierung und 12,6% (=8,7 MT CO₂e) bei beschleunigter Digitalisierung, basierend auf der mittleren CO₂e-Projektion (=69,1 MT CO₂e).

4.2.1

Gebäude

Smart Home

Durch digitale Smart Home Technologien können Nutzer kleinteilige Gebäudesysteme detaillierter und in Echtzeit steuern, integrieren und optimieren



Smart Home

Unter einem Smart Home versteht man ein Konzept in Wohngebäuden, bei dem Geräte wie Thermostate oder Sensoren mit Steuerungssystemen verbunden sind. Diese Vernetzung erlaubt es, den Energieverbrauch digital zu erfassen und mittels Automatisierung effizient zu regeln.

In Smart Home werden zwei Hauptansatzpunkte mit verschiedenen Anwendungen berücksichtigt:

1. Gebäude- und Energiemanagement: Hier werden neben den Möglichkeiten von intelligenten Thermostaten und Beleuchtungssystemen auch die Potenziale von automatisierten Heizsystemen untersucht.
2. Gebäudeautomationssysteme: Diese Automatisierung umfasst die Steuerung, Regelung, Überwachung und Optimierung der Gebäudefunktionen, wie beispielsweise die Stromversorgung, und adressiert damit umfassend die Effizienz der Wohngebäude.

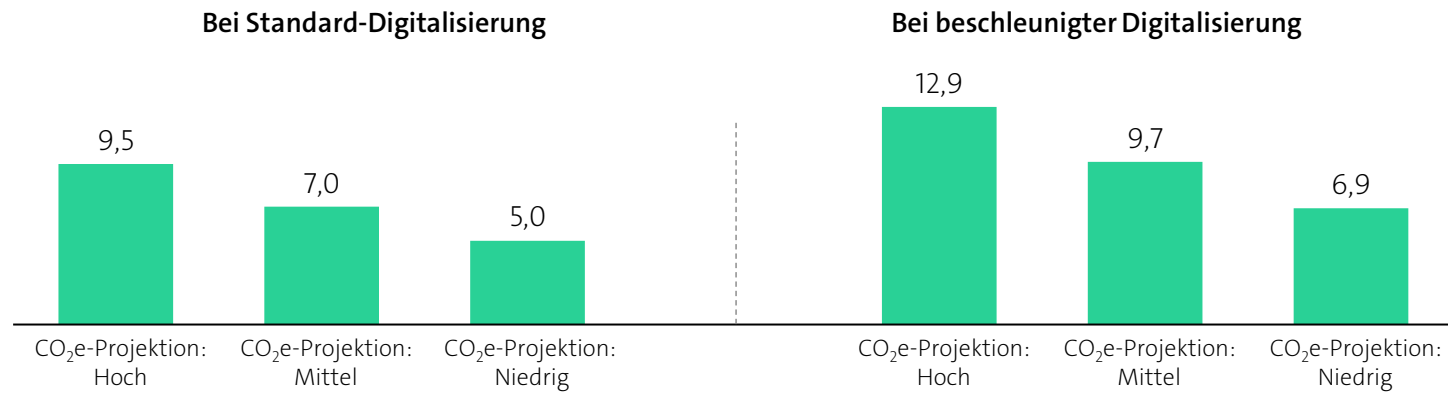
Diese Kombination zielt darauf ab, die Effizienz der Wohngebäude durch intelligente Technologien und Automatisierung zu erhöhen und somit die Umweltauswirkungen zu reduzieren.¹⁻¹⁰

Wichtigste digitale Technologien

- **Smarte Thermostate:** Sie erfassen den Energieverbrauch der Heizungsgeräte und ermöglichen eine Steuerung der Verbräuche, z.B. mithilfe von mobilen Apps. Dadurch kann die Energieeffizienz optimiert werden.¹
- **Intelligente Beleuchtung:** Mithilfe von smarten LEDs, Sensoren und Bewegungsmeldern kann die Beleuchtung und die Helligkeit an das Verhalten der Bewohnerinnen und Bewohner angepasst werden, um so den Stromverbrauch zu reduzieren.^{2,3}
- **Gebäudeautomation:** Darunter versteht man die automatische Steuerung, Regelung und Überwachung von Gebäudefunktionen, wie Heizung, Lüftung und Beleuchtung. Durch die Vernetzung von Sensoren, Aktoren, Bedienelementen und anderen technischen Einheiten wird ein intelligentes und optimiertes Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten ermöglicht.⁴
- **Internet der Dinge (IoT):** IoT ermöglicht die Vernetzung von Maschinen und Geräten, um Echtzeitdaten der Gebäude zu sammeln und zu analysieren, z.B. durch Smart Home Hubs.⁵⁻⁷
- **Künstliche Intelligenz (KI) und Maschinelles Lernen (ML):** KI nutzt fortschrittliche Algorithmen und Maschinelles Lernen, um eine individuelle Steuerung der Gebäude zu ermöglichen, beispielsweise indem das Nutzerverhalten vorhergesagt wird.^{6,7}

Durch Smart Home können 2030 Einsparpotenziale von bis zu 12,9 MT CO₂e realisiert werden

CO₂e-Einsparpotenziale im Jahr 2030 durch Smart Home

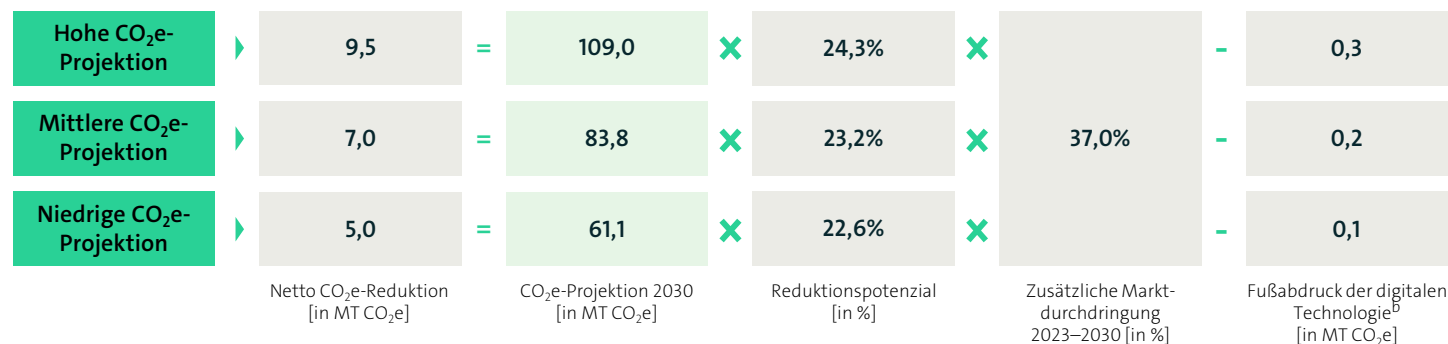
[in MT CO₂e]

Qualitativer Nutzen

Smart Home Anwendungen und digitale Technologien können dazu beitragen, den Energieverbrauch und die Kosten in Wohngebäuden zu senken. Durch die automatisierte Anpassung von Raumwärme, Beleuchtung und Strom werden die Verbräuche der Privathaushalte optimiert und tragen so dazu bei, dass Ressourcen effizienter genutzt und weniger CO₂e-Emissionen ausgestoßen werden.

Eine Heizung kann beispielsweise mithilfe von intelligenten Thermostaten und Sensoren die Temperatur an die Tagesabläufe der Bewohnerinnen und Bewohner anpassen und sich selbst regeln, unter anderem sobald ein Fenster geöffnet wird. Neben den möglichen Energieeinsparungen ermöglichen Smart Home auch eine Zeitersparnis, sowie mehr Komfort und Flexibilität für die Bewohnerinnen und Bewohner.

Berechnung der Netto CO₂e-Reduktion am Beispiel der Standard-Digitalisierung

[in MT CO₂e]^a

Anmerkungen: a) Zur besseren Lesbarkeit wurden gerundete Werte verwendet; b) Basiert auf den zwei Hebeln für Smart Home (1. Gebäude- und Energiemanagement, 2. Gebäudeautomation), welche unterschiedliche CO₂e-Projektionen, Reduktionspotenziale, Marktdurchdringungsraten und Fußabdrücke der Technologien aufweisen; c) CO₂e-Emissionen, die aus der Nutzung digitaler Technologien entstehen.

Durch den Einsatz von intelligenten Beleuchtungsanlagen konnte in einer Wohnsiedlung „Rütihof“ in Zürich der Energieverbrauch um 95% reduziert werden



Fallstudie: Smart Home^a



95%
Energiereduktion

Ausgangslage

Im Rahmen der „Lichtvereinbarung von Davos“ soll in der Schweiz der Stromverbrauch für Licht von 2017 bis 2025 halbiert werden.¹ Das Projekt „Sensolight“, welches gemeinsam von der Schweizer Licht Gesellschaft (SLG) und Unternehmen etabliert wurde, soll in sechs Fallstudien das Einsparpotenzial durch intelligente Beleuchtung demonstrieren und messtechnisch bestätigen.² Die Fallstudie der Wohnsiedlung "Rütihof" in Zürich ermöglichte dabei den Vergleich von intelligenten Beleuchtungsanlagen mit konventionellen Beleuchtungen und herkömmlicher Sensorik. Partnerunternehmen der Fallstudie sind die Unternehmen Nevalux AG und Steinel AG.^{3,4,5}

Digitale Technologien

In 17 Gebäuden mit 131 Wohneinheiten der Wohnsiedlung „Rütihof, Zürich“ wurden intelligente, vernetzte LED-Leuchten in den Gemeinschaftsbereichen der Gebäude installiert. Dazu wurden die Leuchten mit integrierten Sensoren mit Tageslicht- und Präsenzmeldern und intelligenten Lichtregelungen kombiniert, welche die herkömmlichen Beleuchtungsanlagen ersetzen.⁵

Reduktionspotenzial

Das Reduktionspotenzial wurde mit Hilfe von detaillierten Vergleichsmessungen der konventionellen und der intelligenten Beleuchtungssysteme durchgeführt. Insgesamt konnte durch die Implementierung intelligenter LED-Leuchten und Lichtregelungen in 17 Wohngebäuden eine Energieeinsparung von 95% erzielt werden.^{4,5} Die Gesamteinsparungen lassen sich zu circa 53% auf die effektive Beleuchtungssteuerung zurückführen und zu etwa 42% auf den Einsatz energieeffizienter LED-Leuchten. Für die insgesamt 17 Gebäude führt dies zu einer Gesamtersparnis von 26,7 MWh pro Jahr.⁵

Anmerkung: a) Der dargestellte Anwendungsfall wurde nicht für die Analyse genutzt.

Quellen: 1) FVB (2018); 2) Mazura (2023); 3) Energylight (2023a); 4) Energylight (2023b); 5) Energylight (2022).

4.2.2

Gebäude

Vernetzte Gebäude

Durch digitale Technologien können Gebäudesysteme vernetzt und gesamtsystemisch gesteuert und optimiert werden



Vernetzte Gebäude

Der Begriff „vernetzte Gebäude“ (auch Smart Building genannt) bezieht sich auf den Einsatz digitaler Technologien zur Kontrolle und Automatisierung von Funktionen in Nichtwohngebäuden, wie Bürogebäuden, insbesondere in Bereichen wie Beleuchtung, Heizung und Klimatisierung. Ziel ist es, die Effizienz dieser Gebäude zu verbessern.

Um das Potenzial vernetzter Gebäude zu evaluieren, werden zwei Hauptansätze mit verschiedenen Aspekten in Betracht gezogen:

1. Gebäude- und Energiemanagement: Dieser Ansatz berücksichtigt nicht nur die Möglichkeiten von Smart Metern und intelligenten Thermostaten sowie Beleuchtungssystemen, sondern auch die Vorteile einer automatisierten HLK (Heizung, Lüftung, Klimatechnik).
2. Gebäudeautomationssysteme: Diese Automatisierung beinhaltet die Steuerung, Regelung, Überwachung und Verbesserung der Gebäudefunktionen, wodurch die Effizienz von Nichtwohngebäuden ganzheitlich angegangen wird.

Diese Kombination ermöglicht, die Effizienz von Nichtwohngebäuden durch den Einsatz intelligenter Technologien und Automatisierung zu erhöhen und so die Umweltbelastung zu verringern.

Wichtigste digitale Technologien

- **Smarte Stromzähler und Thermostate:** Sie erfassen den Energieverbrauch der Heizungsgeräte in Nichtwohngebäuden und ermöglichen eine Steuerung der Verbräuche, z.B. mithilfe von mobilen Apps. Dadurch kann die Energieeffizienz optimiert werden.^{1,2,3}
- **Intelligente Beleuchtung:** Durch die automatisierte Steuerung von Helligkeit und der Dauer der Beleuchtung, basierend auf Bewegungs- bzw. Lichtsensoren in Verbindung mit Tageslicht- und Belegungsdaten, können die Stromverbräuche reduziert werden.^{4,5}
- **HLK^a-Steuerungssysteme:** Um den Energieverbrauch zu minimieren, werden computergestützte Systeme eingesetzt, welche die Temperatur und Luftfeuchtigkeit in Echtzeit überwachen und anpassen.⁶
- **Internet der Dinge (IoT):** IoT ermöglicht die Vernetzung von Maschinen und Geräten, um Echtzeitdaten der Gebäude zu sammeln und zu analysieren.^{7,8}
- **Künstliche Intelligenz (KI) und Maschinelles Lernen (ML):** KI nutzt fortschrittliche Algorithmen und Maschinelles Lernen, um das Gebäudemanagement zu automatisieren. So wird beispielsweise auf Basis von Anwesenheit, Wetterdaten und Raumfeuchte die Raumtemperatur und Beleuchtung entsprechend angepasst.⁹

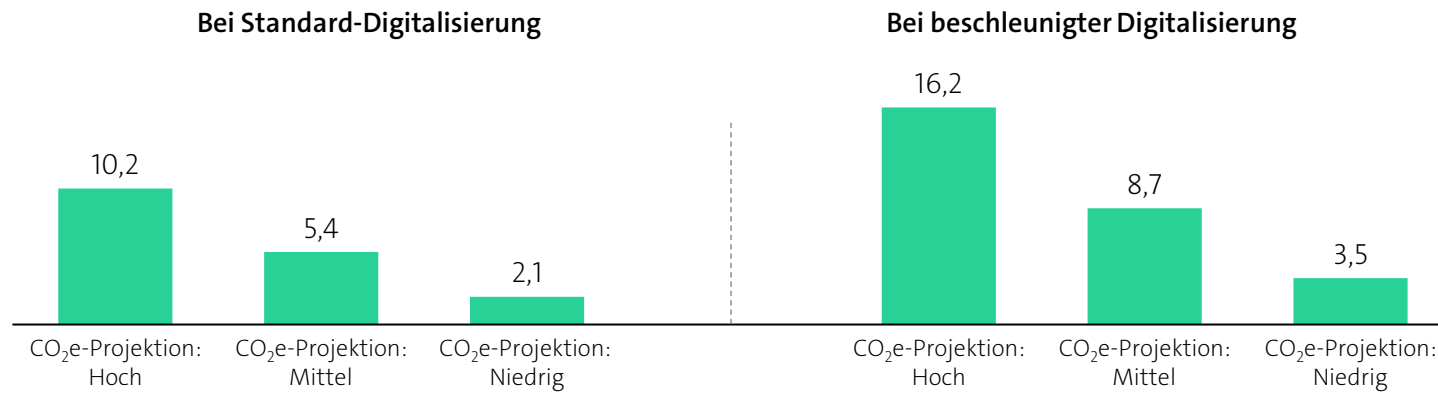
Anmerkung: a) Heizung, Lüftung, Klimatechnik.

Quellen: 1) Müller et al. (2020); 2) Bitkom (2021b); 3) IÖW (2023); 4) Aussat et al. (2022); 5) Energylight (2023a); 6) Franco et al. (2021); 7) Alaa et al. (2017); 8) ACEEE (2018); 9) Vilisto (2022).

Durch vernetzte Gebäude können 2030 Einsparpotenziale von bis zu 16,2 MT CO₂e realisiert werden

CO₂e-Einsparpotenziale im Jahr 2030 durch vernetzte Gebäude

[in MT CO₂e]



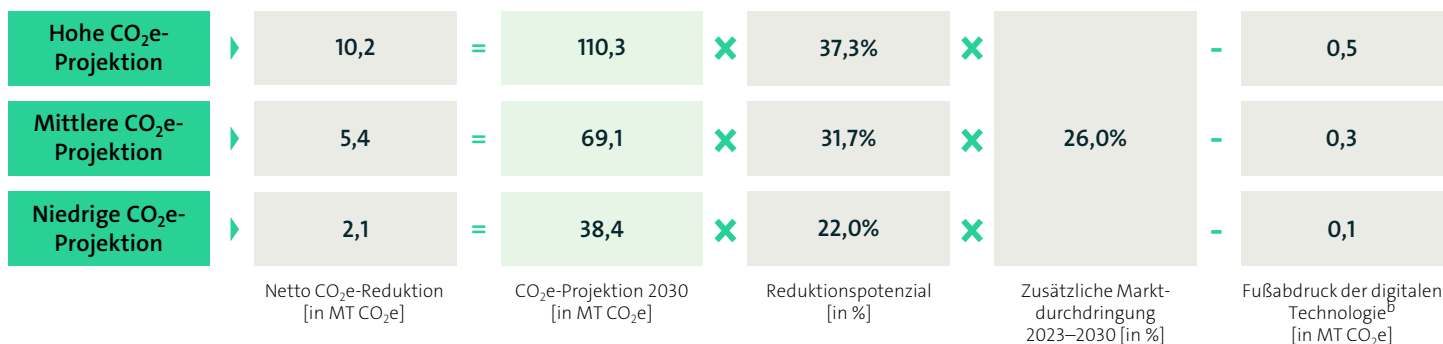
Qualitativer Nutzen

Die digitalen Technologien können einen Beitrag dazu leisten, den Energie- und Ressourcenverbrauch der Nichtwohngebäude zu reduzieren. Durch die automatisierte Anpassung von Raumwärme, Beleuchtung und Strom werden die Verbräuche optimiert und tragen so dazu bei, dass Ressourcen effizienter genutzt und weniger CO₂e-Emissionen ausgestoßen werden.¹⁻⁹

Beispielsweise können Systeme für Heizung, Lüftung, Klimatechnik mithilfe von Belegungsdaten und Künstlicher Intelligenz das Nutzungsverhalten vorhersagen und die Raumtemperatur entsprechend anpassen, sodass zusätzliche Energieeinsparungen realisiert werden können.¹⁰

Berechnung der Netto CO₂e-Reduktion am Beispiel der Standard-Digitalisierung

[in MT CO₂e]^a



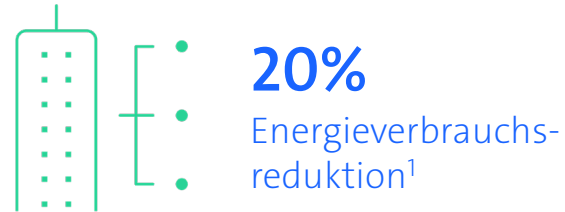
Anmerkungen: a) Zur besseren Lesbarkeit wurden gerundete Werte verwendet; b) Basiert auf den zwei Hebeln für vernetzte Gebäude (1. Gebäude- und Energiemanagement; 2. Gebäudeautomation), welche unterschiedliche CO₂e-Projektionen, Reduktionspotenziale, Marktdurchdringungsraten und Fußabdrücke der Technologien aufweisen; c) CO₂e-Emissionen, die aus der Nutzung digitaler Technologien entstehen.

Quellen: 1) Müller et al. (2020); 2) Bitkom (2021b); 3) IÖW (2023); 4) Aussat et al. (2022); 5) Energylight (2023a); 6) Franco et al. (2021); 7) Alaa et al. (2017); 8) ACEEE (2018); 9) Vilisto (2022); 10) ABB (2022).

Im Sydney Opera House führte die Implementierung eines Gebäudemanagementsystems mit intelligenten Sensoren zu einer Energieeinsparung von 20%



Fallstudie: Vernetzte Gebäude^a



Ausgangslage

Im Rahmen der UN-Nachhaltigkeitsziele hat sich das Sydney Opera House dazu verpflichtet bis 2023 ein klimapositives Gebäude zu werden.² Auf Basis ihres „Environmental Action Plan (2020–23)“ hatte sich das Opernhaus konkrete Ziele für das Jahr 2023 gesetzt, unter anderem in Bezug auf Energie, Wasser und Abfall.³ Um diese Ziele zu erreichen, hat das Sydney Opera House gemeinsam mit dem multinationalen Technologiekonzern Honeywell ein umfassendes Gebäudemanagementsystem implementiert.

Digitale Technologien

Das Konzept setzte auf ein ganzheitliches Gebäudemanagement. Die verwendete Softwareplattform bietet einen besseren Überblick über den Energieverbrauch und die CO₂e-Emissionen (Scope 1 und 2)^b – bis auf Anlagen- beziehungsweise Geräteebene.⁴ Intelligente Sensoren erfassen dabei unter anderem Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Raumluftqualität.¹ Insgesamt wurden mehr als 20 Teilsysteme integriert, um die Sicherheit sowie den Verbrauch des Gebäudes zu optimieren.³ Zusätzlich ermöglicht auch der Einsatz von Künstlicher Intelligenz eine intelligente und datengesteuerte Entscheidungsfindung, um Ineffizienzen aufzudecken und Kosten sowie Risiken zu minimieren.⁵

Reduktionspotenzial

Dank der Implementierung eines ganzheitlichen Systems konnte das Sydney Opera House mit Hilfe von Honeywells digitalen Technologien den Energieverbrauch um 20% und den Wasserverbrauch um 30% reduzieren.^{1,5} Durch diese und weitere Maßnahmen konnten insgesamt 26% der CO₂e-Emissionen eingespart werden.²

Anmerkungen: a) Der dargestellte Anwendungsfall wurde nicht für die Analyse genutzt; b) Das Greenhouse Gas Protocol definiert Scope 1 als direkte Emissionen aus unternehmenseigenen Ressourcen (z.B. Kraftstoffe bzw. Heizquellen). Scope 2 umfasst indirekte Emissionen aus extern bezogener Energie.⁶

Quellen: 1) [GBCA \(2023\)](#); 2) [Sydney Opera House \(2023\)](#); 3) [Sydney Opera House \(2019\)](#); 4) [Rossi \(2023\)](#); 5) [Honeywell \(2019\)](#); 6) [WRI & WBCSD \(2004\)](#).

4.3

Industrie

Im Industriesektor können digitale Technologien bis zu 4,8% zur Erreichung des Klimaziels 2030 beitragen

Der Industriesektor

Der Industriesektor umfasst energetische Emissionen aus industriellen Wärmeerzeugern, Prozessfeuerungen, Industriekraftwerken und der Bauwirtschaft. In dieser Studie beinhaltet der Sektor zusätzlich prozessbedingten Emissionen, etwa aus der Stahl- und Zementherstellung sowie Emissionen aus der Produktverwendung wie fluoridierte Treibhausgase.

2,7–6,1%

= 5,6–12,7
MT CO₂e

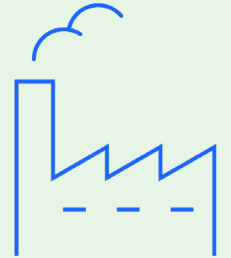
können bei mittlerer CO₂e-Projektion durch digitale Technologien im Industriesektor reduziert werden – abhängig von der Digitalisierungsgeschwindigkeit in Deutschland. Je nach CO₂e-Projektion liegt die Einsparung bei bis zu 14,9 MT.

Bis zu 4,8%

der Klimalücke in Höhe von 308 MT CO₂e lassen sich durch digitale Technologien im Industriesektor schließen.

Kernerkenntnisse

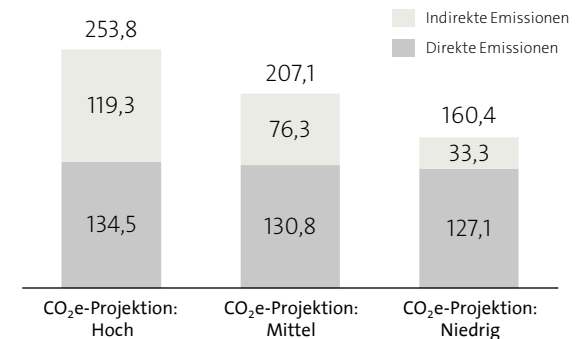
1. Automatisierung und digitale Zwillinge durch digitale Technologien spielen eine wichtige Rolle für die Emissionsreduktion im Industriesektor.
2. Bei beschleunigter Digitalisierung erhöhen sich die CO₂e Einsparungen um 127% auf 12,7 MT CO₂e, verglichen mit der Standard-Digitalisierungsgeschwindigkeit.^a
3. Bereits heute nutzen 26% der Industrieunternehmen digitale Zwillinge konkret für die Dekarbonisierung.



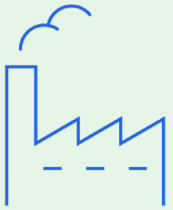
CO₂e-Projektionen und Einflussfaktoren

Um das Reduktionspotenzial digitaler Technologien in der Industrie in 2030 zu bewerten, wurden aufgrund variabler Einflussfaktoren drei verschiedene CO₂e-Emissionsprojektionen erstellt. Die Emissionsfaktoren werden stark durch die Ausbaugeschwindigkeit erneuerbarer Energien wie Solar- und Windkraft sowie die Entwicklung des Energieverbrauchs in der Industrie beeinflusst. Dies wird beeinflusst durch Industrieelektrifizierung, Strompreisschwankungen, Konsumverhaltensänderungen und Unternehmensinvestitionen.

Erstellte CO₂e-Projektionen für 2030 in MT CO₂e



Die möglichen Entwicklungen des Stromemissionsfaktors und des Energieverbrauchs wurden in drei CO₂e-Projektionen dargestellt



Definition und Einflussfaktoren in der Industrie

Der Sektor Industrie umfasst gemäß dem Bundes-Klimaschutzgesetz energetische Emissionen aus industriellen Wärmeerzeugern, Prozessfeuerungen, Industriekraftwerken und der Bauwirtschaft. Dies schließt verschiedene Anlagen in der Glas-, Zement-, Metall- und Chemiebranche ein. Darüber hinaus werden im Rahmen dieser Studie die prozessbedingten Emissionen betrachtet, die beispielsweise bei der Produktion von Stahl und Zement entstehen.¹

Einflussfaktoren bei der CO₂e-Projektion in der Industrie

Zur Ermittlung des CO₂e-Reduktionspotenzials digitaler Technologien in der Industrie für das Jahr 2030 ist eine entsprechende CO₂e-Projektion für 2030 erforderlich.^a Um mögliche Entwicklungsverläufe abzudecken und ein breiteres Verständnis der potenziellen Auswirkungen zu gewährleisten, wurden drei unterschiedliche CO₂e-Projektionen erstellt. Diese CO₂e-Projektionen werden hauptsächlich durch die folgenden variablen Einflussfaktoren determiniert:

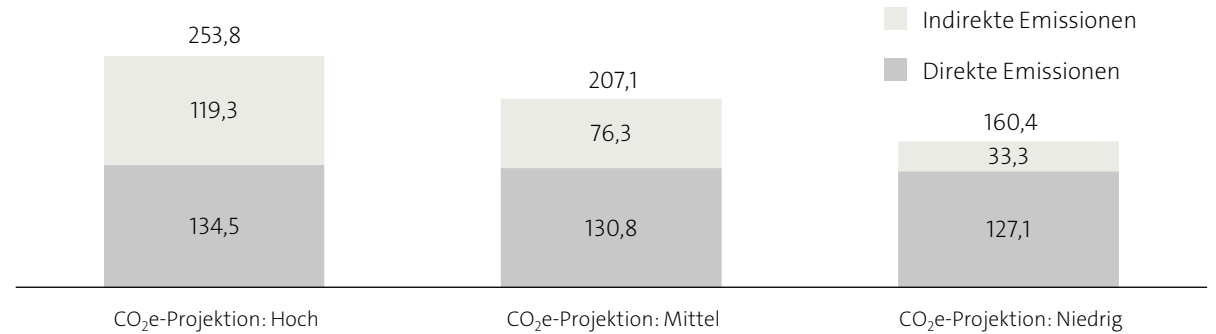
- **Stromemissionsfaktor:** Die Geschwindigkeit, mit der erneuerbare Energien wie Solar- und Windkraft sowie Netzinfrastruktur und Stromspeicher ausgebaut werden, beeinflusst maßgeblich die Elektrifizierung in der Industrie und somit den Emissionsfaktor. Schnellerer Ausbau resultiert in geringeren Emissionen, ist jedoch abhängig von politischen, technologischen und ökonomischen Faktoren.
- **Energieverbrauch:** Der Energieverbrauch ist ein wichtiger Faktor. Faktoren wie die zunehmende Elektrifizierung in der Industrie, variable Strompreise, Veränderungen im Verbraucherverhalten und unternehmerische Investitionen haben einen erheblichen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf und folglich auf die Höhe der Emissionen.

Anmerkungen: a) Siehe [Seite 18](#) zur Berechnungslogik; b) Accenture Berechnung: Details zu Quellen und Berechnungen sind im [Anhang](#) zu finden; c) Es werden die Treibhausgasemissionen in Deutschland des Mit-

Maßnahmen-Szenarios (MMS) des UBA-Projektionsberichtes herangezogen.
Quellen: 1) UBA (2023i); 2) BMJ & BfJ (2019).

CO₂e-Projektionen

[in MT CO₂e]



In allen drei CO₂e-Projektionen wurden sowohl direkte als auch indirekte Emissionen berücksichtigt. Direkte Emissionen stammen unmittelbar aus industriellen Prozessen, während indirekte Emissionen in vorgelagerten Prozessen aus dem Energieverbrauch resultieren.^b

CO₂e-Projektion hoch – Diese CO₂e-Projektion bedarf zur Bestimmung der indirekten Emissionen und des damit einhergehenden Emissionsfaktors eine Extrapolation des Trends der letzten fünf Jahre bis zum Jahr 2030. Dies ergab einen Emissionsfaktor von 422,37 g/kWh.

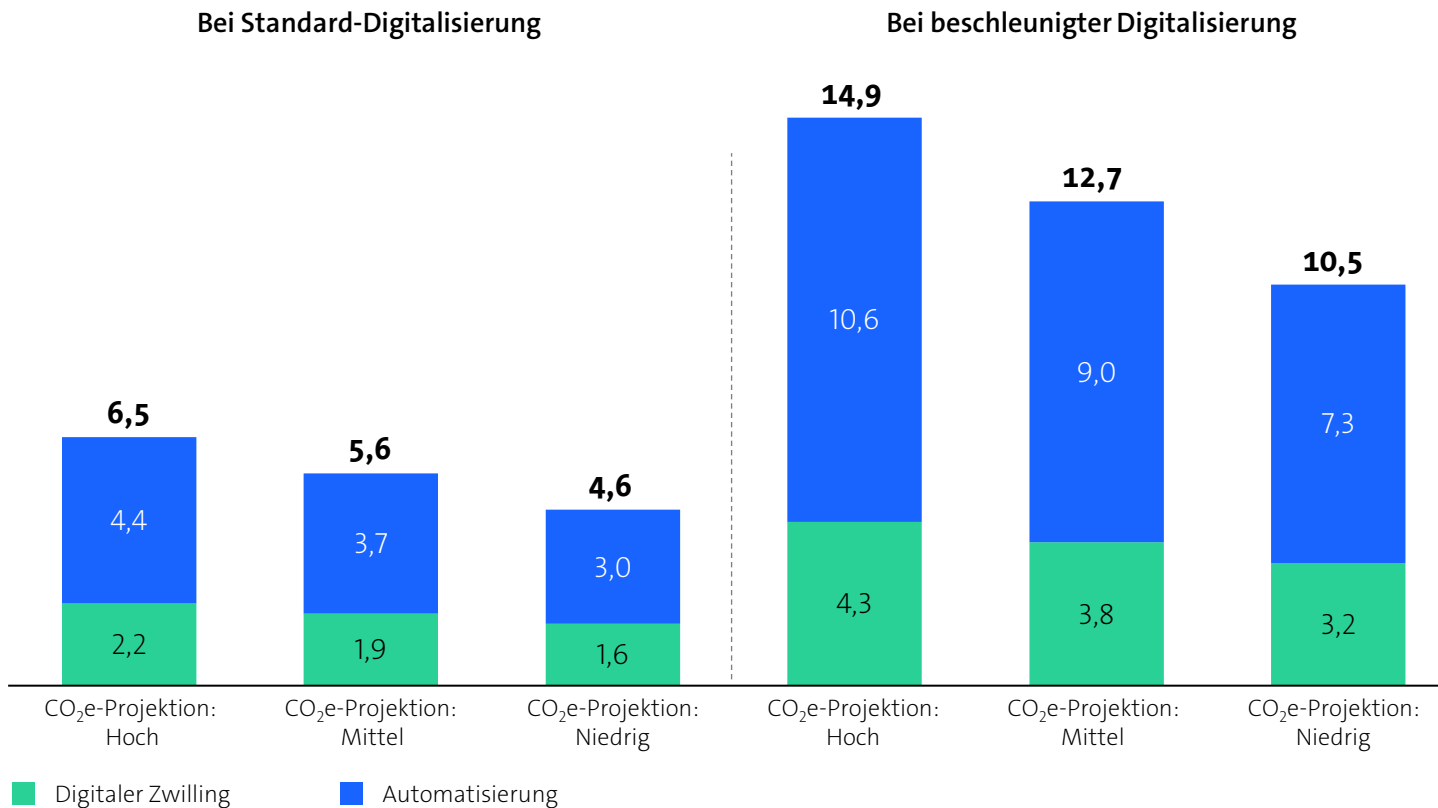
CO₂e-Projektion mittel – Für diese CO₂e-Projektion wurde die Emissionsprojektion als Mittelwert zwischen den Ergebnissen der hohen und niedrigen CO₂e-Projektionen berechnet, um einen ausgewogenen Ausblick auf die möglichen Emissionen im Jahr 2030 zu geben. Als Stromemissionsfaktor wurden 257,29 g/kWh genutzt.

CO₂e-Projektion niedrig – Diese CO₂e-Projektion basiert auf den direkten Emissionen der Industrie, welche dem UBA-Projektionsbericht 2023 entnommen wurden.^{1c} Indirekte Emissionen wurden anhand der prognostizierten Endenergieverbräuche von Strom, Fernwärme, Wasserstoff und Biomasse im Jahr 2030, sowie den entsprechenden prognostizierten spezifischen Emissionsfaktoren berechnet.

Bis zu 14,9 MT CO₂e lassen sich durch Automatisierung und digitale Zwillinge im Industriesektor in 2030 einsparen

CO₂e-Einsparpotenziale im Jahr 2030 in der Industrie

[in MT CO₂e]



Erkenntnisse

Die CO₂e-Einsparpotenziale durch digitale Technologien wurden anhand nachstehender zwei Anwendungsfälle berechnet. Die CO₂e-Einsparungen resultieren dabei primär aus Einsparungen im Energieverbrauch. Der Großteil der Einsparungen stammt aus dem Anwendungsfall Automatisierung.

Automatisierung

Automatisierung, hauptsächlich energieintensiver Maschinen und Anlagen, ermöglichen in 2030 eine Emissionsreduktion von bis zu 1,8% (=3,7 MT CO₂e) bei Standard-Digitalisierung und 4,3% (=9,0 MT CO₂e) bei beschleunigter Digitalisierung, basierend auf der mittleren CO₂e-Projektion (=207,1 MT CO₂e).

Digitale Zwillinge

Digitale Zwillinge, hauptsächlich durch Echtzeitsteuerung physischer Assets, ermöglichen in 2030 eine Emissionsreduktion von bis zu 0,9% (=1,9 MT CO₂e) bei Standard-Digitalisierung und 1,8% (=3,8 MT CO₂e) bei beschleunigter Digitalisierung, basierend auf der mittleren CO₂e-Projektion (=207,1 MT CO₂e).

4.3.1

Industrie

Automatisierung

Durch digitale Technologien kann die Automatisierung in der Industrie kleinteiliger und mittels Künstlicher Intelligenz kontinuierlicher erfolgen



Automatisierung

Automatisierung in der Industrie bezeichnet den Einsatz von Robotertechnik, Sensoren und fortschrittlichen digitalen Steuerungssystemen zur Verbesserung der Produktionsprozesse. Dies trägt zur Senkung von Kosten und Energieverbrauch bei.

Die moderne industrielle Automatisierung zeichnet sich durch die Integration von Datenerfassungssystemen und Industrie 4.0 Technologien aus. Diese ermöglichen es, den Betrieb auf Basis von Echtzeitdaten zu optimieren und eine vorausschauende Wartung zu implementieren. Dadurch können Ausfallzeiten minimiert und die Anlagenwartung effizienter gestaltet werden.

Zusätzlich fördert die Integration von Künstlicher Intelligenz und Maschinellem Lernen in die Automatisierungssysteme eine kontinuierliche Verbesserung der Prozesse durch adaptive Algorithmen, die auf sich verändernde Bedingungen und Anforderungen reagieren können.

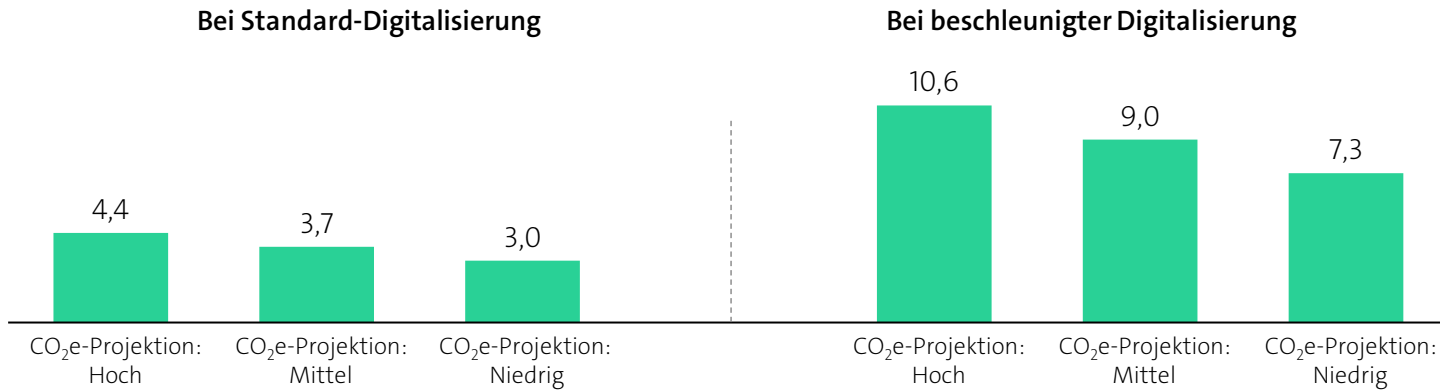
Wichtigste digitale Technologien

- **Internet der Dinge (IoT) und Maschine-zu-Maschine (M2M):** IoT und M2M ermöglichen die Vernetzung von Maschinen und Geräten, um Echtzeitdaten industrieller Prozesse zu sammeln, zu analysieren und den direkten Datenaustausch zwischen Geräten ohne menschliches Eingreifen zu erleichtern. Diese Technologien sind entscheidend für die Automatisierung und Effizienzsteigerung in der Industrie.
- **Cloud Computing:** Cloud Computing bietet skalierbare Datenverarbeitungsmöglichkeiten, um industrielle Anwendungen zu unterstützen, die auf der Analyse großer Datenmengen basieren.
- **Künstliche Intelligenz (KI) und Maschinelles Lernen (ML):** KI nutzt fortschrittliche Algorithmen und Maschinelles Lernen, um prädiktive Instandhaltung, Qualitätskontrolle, automatisierte Entscheidungsfindung und Prozessoptimierung in der Industrie zu ermöglichen.
- **Robotik:** Roboter und automatisierte Maschinen werden in der Industrie eingesetzt, um Aufgaben wie Montage, Verpackung oder Transport zu automatisieren.

Durch Automatisierung können 2030 Einsparpotenziale von bis zu 10,6 MT CO₂e realisiert werden

CO₂e-Einsparpotenziale im Jahr 2030 durch Automatisierung

[in MT CO₂e]



Qualitativer Nutzen

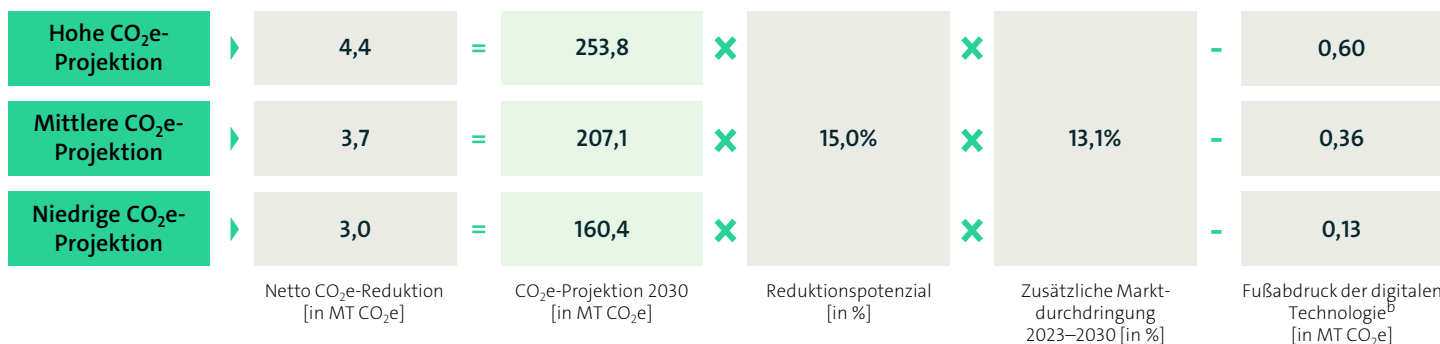
Die Automatisierung kann den Energieverbrauch und die CO₂e-Emissionen durch Optimierung von Prozessen und effizientere Ressourcennutzung senken. Automatisierte Systeme können beispielsweise den Energieverbrauch in Fabriken reduzieren, indem sie Maschinen nur bei Bedarf betreiben.

Zusätzlich zeichnen sich automatisierte Systeme durch hohe Präzision aus, was eine verbesserte Energieeffizienz durch die Durchführung von Prozessen mit weniger Verlusten und Fehlern ermöglicht.

Neben den Energieeinsparungen bietet die Automatisierung auch weitere Vorteile wie verbesserte Produktqualität, höhere Produktionsflexibilität, gesteigerte Ressourceneffizienz und erhöhte Arbeitssicherheit.¹⁻⁴

Berechnung der Netto CO₂e-Reduktion am Beispiel der Standard-Digitalisierung

[in MT CO₂e]^a



Anmerkungen: a) Zur besseren Lesbarkeit wurden gerundete Werte verwendet; b) CO₂e-Emissionen, die aus der Nutzung digitaler Technologien entstehen.

Quellen: 1) Schlund et al. (2023); 2) IDC (2022); 3) DESTATIS (2021); 4) Interroll (2020).

Durch den Einsatz von digitalen Automatisierungstechnologien im Rahmen einer Fabrikneugestaltung konnte der Energieverbrauch um 30% gesenkt werden



Fallstudie: Automatisierung^a



30%
Energieeinsparung¹

Ausgangslage

LG Electronics (LGE) stand vor bedeutenden Herausforderungen aufgrund eines um 70% gestiegenen Produktportfolios, zunehmenden Qualitätsanforderungen seitens der Kundinnen und Kunden und einem spürbaren Arbeitskräftemangel.

LGE entschied sich, den Herausforderungen mit einer umfassenden Neugestaltung und Modernisierung einer älteren Fabrik in Changwon, Südkorea, zu begegnen. Dies sollte die Effizienz steigern und den neuen Marktbedingungen gerecht werden.

Digitale Technologien

Im Rahmen dieser Fabrikneugestaltung implementierte LGE eine Reihe von fortschrittlichen digitalen Technologien. Diese umfassen den Einsatz flexibler Automatisierungstechnologien, die Einführung eines digitalen Performance Management Systems und den Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI). Die Maßnahmen zielten darauf ab, die Produktionsabläufe zu optimieren, die Arbeitsprozesse zu automatisieren und eine hohe Anpassungsfähigkeit an wechselnde Produktionsanforderungen zu gewährleisten.

Reduktionspotenzial

Automatisierungslösungen und weitere digitale Technologien reduzierten den Energieverbrauch um 30%. Darüber hinaus konnte eine Produktivitätssteigerung von 17% erreicht werden. Dies ging einher mit einer beachtlichen Reduktion des Lagerbestandes um 30% und einer Halbierung der Betriebsunterbrechungen, was die Effizienz und Zuverlässigkeit der Fabrik verbesserte.

4.3.2

Industrie

Digitaler Zwilling

Digitale Technologien erlauben es immer genauere digitale Zwillinge zu entwickeln, die in Echtzeit und intelligent gesteuert als auch optimiert werden können



Digitaler Zwilling

Digitale Zwillinge repräsentieren eine Technologie, die physische Objekte und Prozesse in einem virtuellen Raum abbildet und über den gesamten Produktionszyklus hinweg simuliert – angefangen beim Design, über die Entwicklung von Prototypen, bis zur tatsächlichen Produktion. Das primäre Ziel dieser Technologie ist die Reduzierung physischer Iterationen und die kontinuierliche Verbesserung von Prozessen.

Durch fortgeschrittene Simulationen durch digitale Zwillinge lassen sich nicht nur Produktqualität und Herstellungsverfahren optimieren, sondern auch Produktionsabläufe effizienter, schneller und gezielter anpassen. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Verbesserung von Energie- und Ressourceneffizienz gelegt. Zusätzlich ermöglichen digitale Zwillinge die Vorhersage von Wartungsbedarf und die frühzeitige Erkennung von potenziellen Produktionsproblemen.

In Verbindung mit Big-Data und Künstlicher Intelligenz können digitale Zwillinge zudem dynamische Analysen und Echtzeit-Feedback bieten, was zu einer weiteren Optimierung der Produktionsprozesse führt. Diese fortschrittliche Technologie spielt eine entscheidende Rolle in der Entwicklung nachhaltiger, effizienter und kosteneffektiver Produktionsmethoden in einer zunehmend digitalisierten Industrielandschaft.

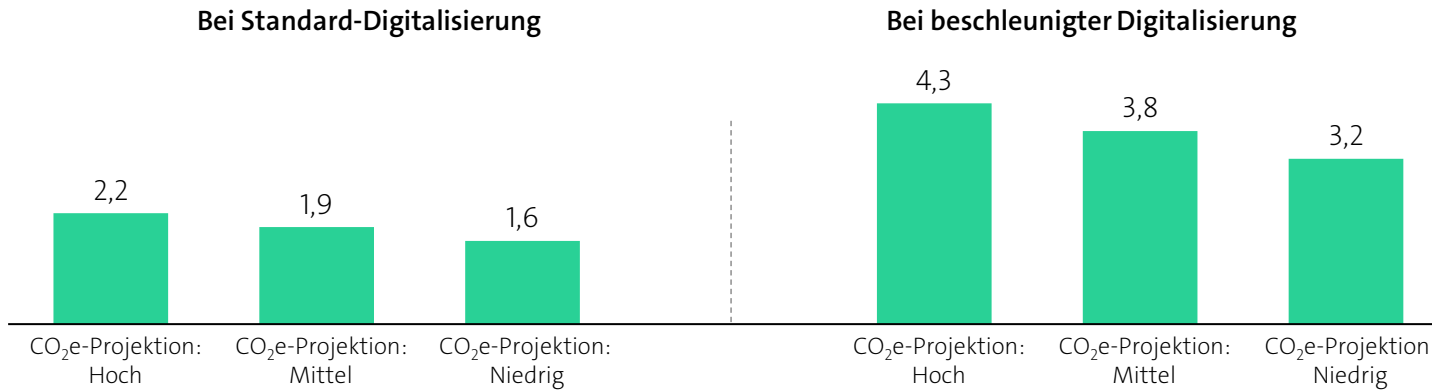
Wichtigste digitale Technologien

- **Internet der Dinge (IoT) und Maschine-zu-Maschine (M2M):** Das IoT verbindet Maschinen und Geräte mit digitalen Zwillingen, um Echtzeitdatenüberwachung und -steuerung zu ermöglichen. M2M-Kommunikation ist dabei ein zentraler Bestandteil, der den automatisierten Informationsaustausch zwischen den Geräten fördert. Insgesamt werden damit die Betriebseffizienz und die Wartungsprozesse optimiert.
- **Cloud Computing:** Große Datenmengen, die von industriellen IoT-Geräten gesammelt werden, werden in der Cloud gespeichert und analysiert, um die Leistung der physischen Assets, die von digitalen Zwillingen repräsentiert werden, zu optimieren.
- **Künstliche Intelligenz (KI) und Maschinelles Lernen (ML):** KI nutzt fortschrittliche Algorithmen und Maschinelles Lernen, um aus den von digitalen Zwillingen gesammelten Daten zu lernen, Vorhersagen zu treffen und die Entscheidungsfindung zu optimieren.
- **Augmented Reality (AR):** AR verbindet die digitale und die physische Welt, indem es Nutzerinnen und Nutzern ermöglicht, digitale Zwillinge in einer realen Umgebung zu visualisieren und damit zu interagieren.

Durch digitale Zwillinge können 2030 Einsparpotenziale von bis zu 4,3 MT CO₂e realisiert werden

CO₂e-Einsparpotenziale im Jahr 2030 durch digitale Zwillinge

[in MT CO₂e]



Qualitativer Nutzen

Durch den Einsatz von digitalen Zwillingen in der Industrie lässt sich der Energieverbrauch deutlich senken, da sie eine detaillierte Simulation und Analyse von Produktionsprozessen ermöglichen. Dadurch können ineffiziente Abläufe und Energieverschwendung identifiziert und optimiert werden.

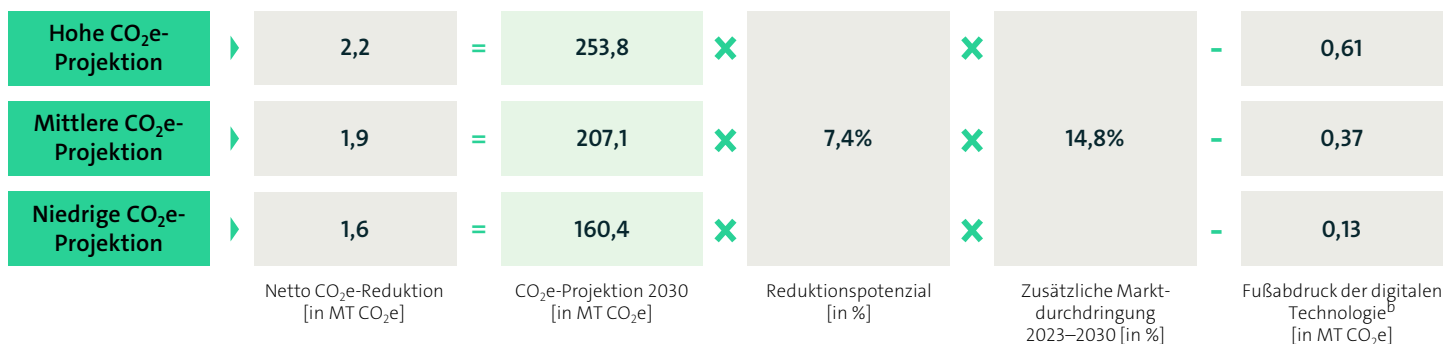
Digitale Zwillinge erlauben es, Experimente und Verbesserungen in der virtuellen Welt durchzuführen, bevor diese in der realen Welt implementiert werden, was zu einer Reduzierung von Testphasen und somit auch des Energieverbrauchs führt.

Durch präzise Vorhersagemodelle kann die Betriebszeit der Anlagen optimiert werden, was weniger Energieverschwendung bedeutet und zu einer direkten Reduzierung von CO₂e-Emissionen führt.

Zusätzlich zu den Umweltvorteilen führt die Nutzung von digitalen Zwillingen zu verbesserter Produktqualität, höherer Produktionsflexibilität, gesteigerter Anlagenverfügbarkeit und kürzeren Produktionsdurchlaufzeiten.¹⁻⁶

Berechnung der Netto CO₂e-Reduktion am Beispiel der Standard-Digitalisierung

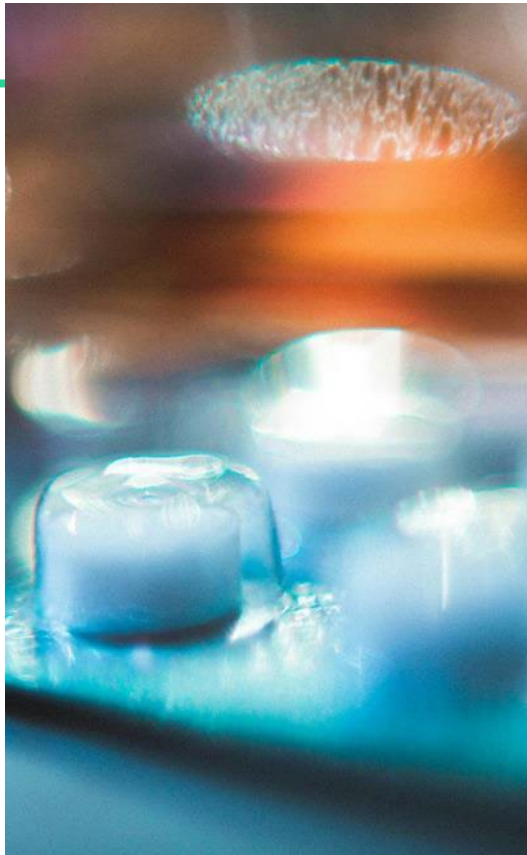
[in MT CO₂e]^a



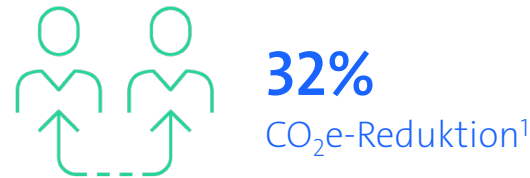
Anmerkungen: a) Zur besseren Lesbarkeit wurden gerundete Werte verwendet; b) CO₂e-Emissionen, die aus der Nutzung digitaler Technologien entstehen.

Quellen: 1) UBA (2023j); 2) UBA (2023e); 3) AEA (2022); 4) Barenji et al. (2020); 5) WEF (2023); 6) Altair Engineering Inc. (2022)

Ein globales Pharmaunternehmen konnte durch den Einsatz digitaler Zwillinge die CO₂e-Emissionen um 32% verringern



Fallstudie: Digitaler Zwilling^a



Ausgangslage

Janssen Sciences Cork, ein Pharmaunternehmen der Johnson & Johnson Familie, hat das Ziel, bis 2025 100% des Stroms aus erneuerbaren Quellen zu beziehen und bis 2030 in globalen Betrieben CO₂-neutral zu sein.

Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, setzt das Unternehmen unter anderem auf einen ganzheitlichen Transformationsprozess.

Digitale Technologien

Ein zentrales Element des Transformationsprozesses sind digitale Zwillinge. Janssen kann durch die Integration von Schlüsseltechnologien der vierten Industriellen Revolution, darunter Echtzeit-Freigabe und adaptive Prozesssteuerung, in Verbindung mit dem Konzept der digitalen Zwillinge, effektiv dynamische Betriebsablaufmodelle erstellen. Diese Modelle ermöglichen es, Prozesse in Echtzeit zu überwachen, zu analysieren und zu optimieren. Ergänzende Nachhaltigkeitsmaßnahmen wie eine Windturbine vor Ort, geschlossene Wassersysteme und weitere Abfallreduktionsinitiativen unterstützen diese technologischen Innovationen.

Reduktionspotenzial

Durch die Implementierung von digitalen Zwillingen konnte Janssen die CO₂e-Emissionen um 32% senken. Gleichzeitig wurden durch die Nutzung smarter Sensoren Materialabfälle um 43% reduziert.

4.4

Landwirtschaft

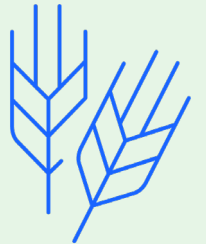
Im Landwirtschaftssektor können digitale Technologien bis zu 2,2% zur Erreichung des Klimaziels 2030 beitragen

Der Landwirtschaftssektor

Der Landwirtschaftssektor umfasst Emissionen aus der Bodenbewirtschaftung (36%) und der Nutztierhaltung (64%). Diese Emissionen entstehen durch Düngung, Kalkung und daraus folgenden Bodenprozessen sowie aus tierischen Verdauungsprozessen und Wirtschaftsdüngerlagerungen.

Kernerkenntnisse

1. In der Landwirtschaft ermöglichen digitale Technologien präzise und datenbasierte Eingriffe auf Grundlage von Daten zu verschiedenen Böden und den individuellen Bedürfnissen der Tiere. Dadurch kommt es zu Emissionsreduktionen.
2. Intelligente Bodenbewirtschaftungs- und Nutztierhaltungssysteme ermöglichen je nach Digitalisierungsgeschwindigkeit 7,5–12,9% Emissionsreduktion im Landwirtschaftssektor.^a
3. Intelligente Bodenbewirtschaftungssysteme weisen mit 39% ein vergleichsweise sehr hohes spezifisches CO₂e-Reduktionspotenzial auf.



7,5–12,9%

= 3,5–6,0
MT CO₂e

Bis zu **2,2%**

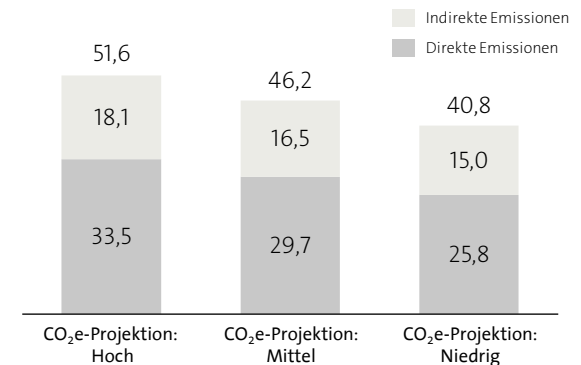
können bei mittlerer CO₂e-Projektion durch digitale Technologien in der Landwirtschaft reduziert werden – abhängig von der Digitalisierungsgeschwindigkeit in Deutschland. Je nach CO₂e-Projektion liegt die Einsparung bei bis zu 6,6 MT.

der Klimalücke in Höhe von 308 MT lassen sich durch digitale Technologien im Landwirtschaftssektor schließen.

CO₂e-Projektionen und Einflussfaktoren

Um das Reduktionspotenzial digitaler Technologien in der Landwirtschaft in 2030 zu bewerten, wurden aufgrund unterschiedlicher Emissionsquellen und Einflussfaktoren separate CO₂e-Emissionsprojektionen pro Subsektor erstellt. Für jeden Subsektor wurden drei CO₂e-Projektionen erstellt und anschließend summiert, um die CO₂e-Projektionen für den gesamten Sektor zu ermitteln. In der Bodenbewirtschaftung beeinflusst die zukünftige Verwendung von Stickstoff-Mineraldünger sowie die Geschwindigkeit des Ausbaus des Ökolandbaus die CO₂e-Projektionen. In der Nutztierhaltung trägt die Entwicklung des Nutztierbestandes maßgeblich zu den projizierten Emissionen im Jahr 2030 bei.

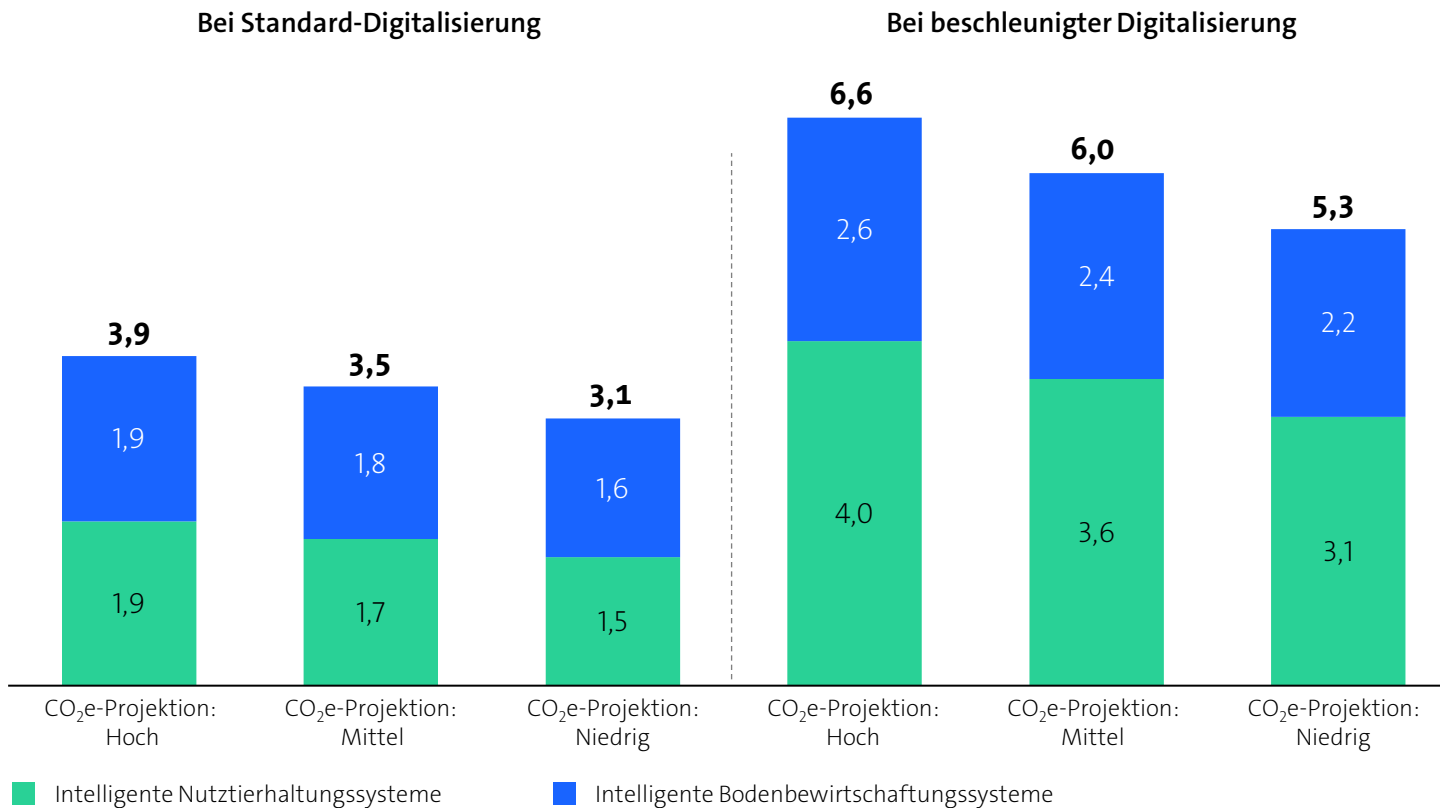
Erstellte CO₂e-Projektionen für 2030 in MT CO₂e



Bis zu 6,6 MT CO₂e lassen sich durch intelligente Bodenbewirtschaftung und intelligente Nutztierhaltung in der Landwirtschaft in 2030 einsparen

CO₂e-Einsparpotenziale im Jahr 2030 in der Landwirtschaft

[in MT CO₂e]



Erkenntnisse

Die CO₂e-Einsparpotenziale durch digitale Technologien wurden anhand nachstehender zwei Anwendungsfälle berechnet. Die CO₂e-Einsparungen resultieren dabei primär aus optimiertem Ressourceneinsatz. Der Großteil der Einsparungen stammt aus dem Anwendungsfall intelligente Nutztierhaltung, insbesondere bei beschleunigter Digitalisierung.

Intelligente Bodenbewirtschaftungssysteme

Intelligente Bodenbewirtschaftungssysteme, hauptsächlich durch teilflächenspezifische Düngung und Kalkung, ermöglichen in 2030 eine Emissionsreduktion von bis zu 10,8% (=1,8 MT CO₂e) bei Standard-Digitalisierung und 14,5% (=2,4 MT CO₂e) bei beschleunigter Digitalisierung, basierend auf der mittleren CO₂e-Projektion (=16,5 MT CO₂e).

Intelligente Nutztierhaltungssysteme

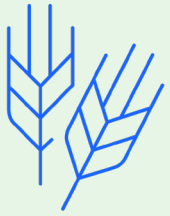
Intelligente Nutztierhaltungssysteme, hauptsächlich durch Tierüberwachungssysteme und Präzisionsfütterung, ermöglichen in 2030 eine Emissionsreduktion von bis zu 5,8% (=1,7 MT CO₂e) bei Standard-Digitalisierung und 12,1% (=3,6 MT CO₂e) bei beschleunigter Digitalisierung, basierend auf der mittleren CO₂e-Projektion (=29,7 MT CO₂e).

4.4.1

Landwirtschaft

Intelligente Bodenbewirtschaftungssysteme

Die möglichen Entwicklungen der Düngereinsatzes und des Ökolandbaus wurden in drei CO₂e-Projektionen dargestellt



Definition und Einflussfaktoren im Landwirtschaftssektor

Der Sektor Landwirtschaft umfasst gemäß dem Bundes-Klimaschutzgesetz die biologisch-chemischen Emissionen aus der Tiernutzung und von landwirtschaftlichen Böden. Zudem beinhaltet der Sektor Emissionen aus der stationären und mobilen Feuerung von Betrieben der Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei.^{1,2} Die Emissionen aus der landwirtschaftlichen Bodenbewirtschaftung, Düngemittelanwendung und Nutztierhaltung machen mit 55,5 MT CO₂e ca. 90% der landwirtschaftlichen Emissionen aus.^{3,a} Daher liegt der Fokus dieses Kapitels auf der Bodenbewirtschaftung und Düngemittelanwendung.

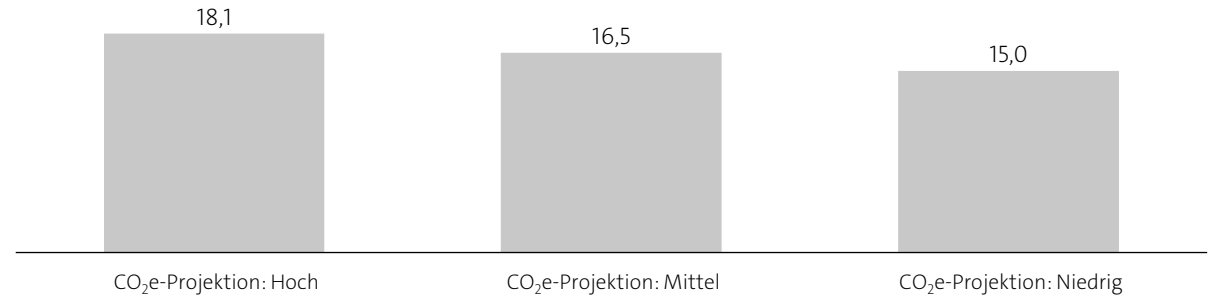
Einflussfaktoren bei der CO₂e-Projektion in der Bodenbewirtschaftung

Zur Ermittlung des CO₂e-Reduktionspotenzials digitaler Technologien in der Bodenbewirtschaftung für das Jahr 2030 ist eine entsprechende CO₂e-Projektion für 2030 erforderlich.^b Um mögliche Entwicklungsverläufe abzudecken und ein breiteres Verständnis der potenziellen Auswirkungen zu gewährleisten, wurden drei unterschiedliche CO₂e-Projektionen erstellt. Diese CO₂e-Projektionen werden hauptsächlich durch die folgenden Einflussfaktoren determiniert:

- **Stickstoff-Mineraldüngeranwendung:** Die Anwendung von Stickstoff-Mineraldünger trägt maßgeblich zu den Emissionen der Bodenbewirtschaftung bei. Seit 2015 wird ein Trend zu einer stark sinkenden Anwendung beobachtet.¹ Die CO₂e-Projektion des Subsektors hängt somit stark davon ab ob dieser Trend bis 2030 weitergeführt wird.
- **Ökolandbau:** Ebenso spielt der Ausbau des Ökolandbaus eine entscheidende Rolle. Da der Ökolandbau auf die Anwendung von chemisch-synthetische Dünger verzichtet, emittiert dieser weniger Emissionen.⁴ Somit ist die CO₂e-Projektion des Subsektors vom Wachstum des Ökolandbaus abhängig.⁵

CO₂e-Projektionen in der Bodenbewirtschaftung

[in MT CO₂e]



Folgende CO₂e-Projektionen wurden für die intelligenten Bodenbewirtschaftungssysteme erstellt.^a

CO₂e-Projektion hoch – Diese CO₂e-Projektion basiert auf den projizierten Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden, Kalkung, Harnstoffanwendung und anderen kohlenstoffhaltigen Düngemitteln für das Jahr 2030 aus dem UBA-Projektionsbericht 2023. Das UBA geht davon aus, dass der Trend zur sinkenden Anwendung von Stickstoff-Mineraldünger nicht weitergeführt wird, und bis 2030 wieder leicht ansteigen wird. Trotz eines projizierten höheren Wachstums des Ökolandbaus, führt der Anstieg in der Stickstoff-Mineraldüngeranwendung zur höchsten CO₂e-Projektion.^{2,c}

CO₂e-Projektion mittel – Für diese CO₂e-Projektion wurde die Emissionsprojektion als Mittelwert zwischen den Ergebnissen der hohen und niedrigen CO₂e-Projektionen berechnet, um einen ausgewogenen Ausblick auf die möglichen Emissionen im Jahr 2030 zu geben.

CO₂e-Projektion niedrig – Diese CO₂e-Projektion basiert auf der Annahme, dass die Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden, Kalkung, Harnstoffanwendung und anderen kohlenstoffhaltigen Düngemitteln dem Trend der letzten fünf Jahre folgen und jährlich um circa 2,5% reduziert werden. Es wird angenommen, dass die Trends zur sinkenden Verwendung von Stickstoff-Mineraldüngern und zum kontinuierlichen Wachstum des Ökolandbaus beibehalten werden.

Anmerkungen: a) Accenture Berechnung: Details zu Quellen und Berechnungen sind im [Anhang](#) zu finden; b) Siehe [Seite 18](#) zur Berechnungslogik; c) Es werden die Treibhausgasemissionen in Deutschland des Mit-

Maßnahmen-Szenarios (MMS) des UBA-Projektionsberichtes herangezogen.
Quellen: 1) [UBA \(2023j\)](#); 2) [BMJ & BfJ \(2019\)](#); 3) [UBA \(2023j\)](#); 4) [BNW \(2023\)](#); 5) [Kuhnert \(2023\)](#).

Durch digitale Technologien können Bodenbewirtschaftungssysteme feinteiliger eingesetzt werden und entsprechend feinteiliger optimieren



Intelligente Bodenbewirtschaftungssysteme

Die intelligente Bodenbewirtschaftung umfasst Techniken wie teilflächenspezifische Düngung und Kalkung, um eine effizientere Nutzung landwirtschaftlicher Ressourcen zu erreichen. Diese Praktiken werden durch den Einsatz fortschrittlicher digitaler Technologien ermöglicht. Durch automatisierte Ausbringung von Düngemitteln und Kalkdüngern, basierend auf standortspezifischem Bedarf, wird eine präzisere und effizientere Anwendung dieser Mittel ermöglicht.

Daten zu Pflanzen und ihrer Umgebung werden gesammelt und analysiert, um den genauen Bedarf an Einsatzmitteln für spezifische Flächen zu bestimmen. Mithilfe von Düngemittel-Applikatoren wird die Ausbringungsmenge automatisch an die analysierten Daten angepasst. Dies führt zu einer zielgerichteten Bewirtschaftung, verringert das Risiko von Über- oder Unterdosierung und reduziert dadurch den Einsatz von Düngemitteln und Kalkdüngern sowie die damit verbundenen CO₂e-Emissionen.^{1,2,3}

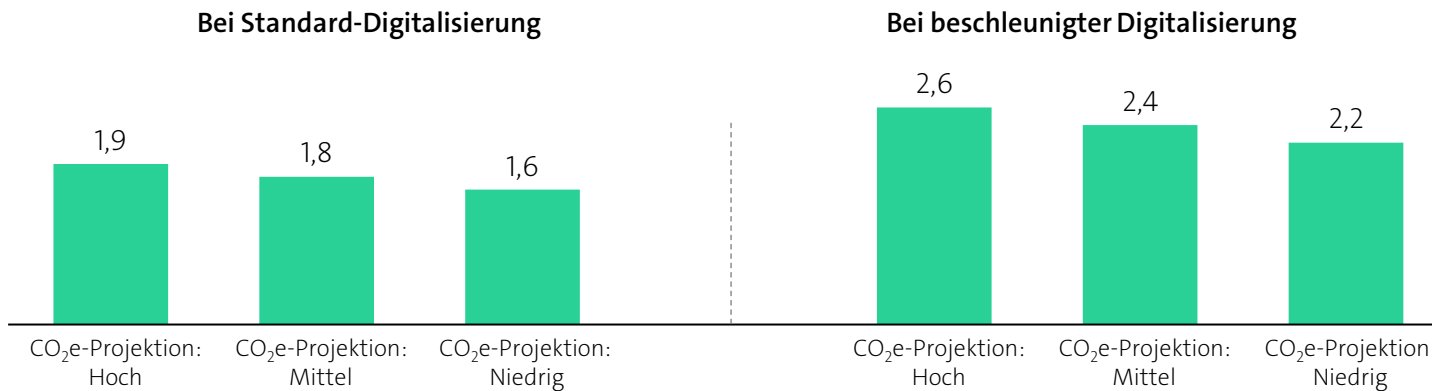
Wichtigste digitale Technologien

- **Datenerfassungssysteme:** Mit Hilfe von Drohnen, Boden- und GPS-Sensoren, Bodenproben und/oder Satellitenbildern werden Daten und Bilder der landwirtschaftlichen Flächen gesammelt.⁴
- **Analytik-Systeme:** Analytik-Systeme nutzen Künstliche Intelligenz und weitere Methoden zur Auswertung der gesammelten Daten, um den teilflächenspezifischen Bedarf an Einsatzmitteln zu ermitteln.⁵ Auf dieser Grundlage werden Applikationskarten erstellt, die den standortspezifischen Düngerbedarf aufzeigen.⁶
- **Automatisierte Düngerstreuer:** Die Applikationskarten werden an teilflächenspezifischen, applikationsfähigen Maschinen, wie z.B. Sprühgeräte oder Streuer, übermittelt. Auf Basis dieser Karten wird teilflächenspezifisch gedüngt.⁶

Durch intelligente Bodenbewirtschaftungssysteme können 2030 Einsparpotenziale von bis zu 2,6 MT CO₂e realisiert werden

CO₂e-Einsparpotenziale im Jahr 2030 durch intelligente Bodenbewirtschaftungssysteme

[in MT CO₂e]



Qualitativer Nutzen

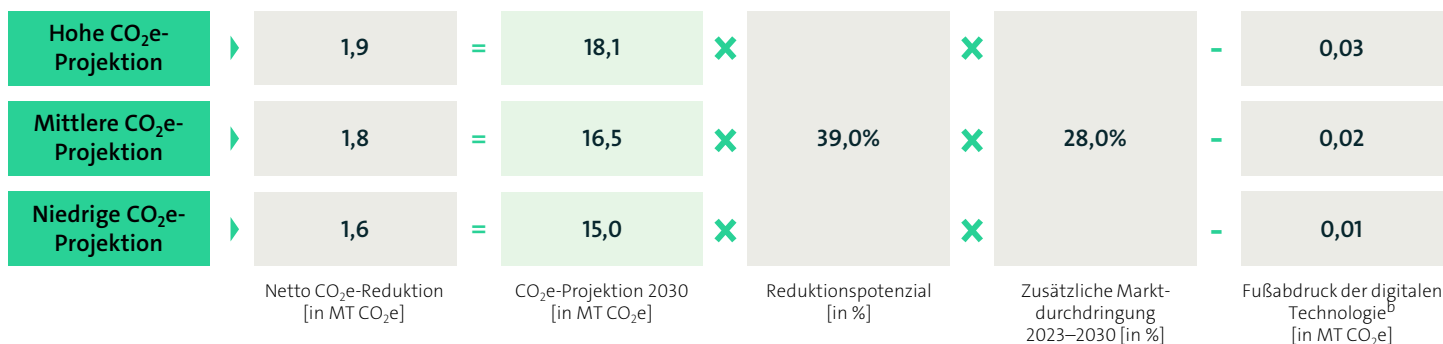
Die teilflächenspezifische Düngung und Kalkung spielt eine wichtige Rolle bei der Reduzierung der CO₂e-Emissionen der Bodenbewirtschaftung.

Durch eine eingehende standortspezifische Analyse der Bodenbedingungen und Pflanzengesundheit lässt sich Über- und Underdüngung sowie -kalkung vermeiden.

Da der Hauptanteil der CO₂e-Emissionen aus der Bodenbewirtschaftung direkt oder indirekt mit Düngung und Kalkung verbunden ist, können diese effektiv gesenkt werden.¹ Zudem trägt diese präzise Herangehensweise dazu bei, die Variabilität in der pflanzlichen Erzeugung zu verringern, die Bodengesundheit zu verbessern² und gleichzeitig den Grundwasserschutz im Rahmen der Düngerverordnung³ zu fördern.

Berechnung der Netto CO₂e-Reduktion am Beispiel der Standard-Digitalisierung

[in MT CO₂e]^a



Anmerkungen: a) Zur besseren Lesbarkeit wurden gerundete Werte verwendet; b) CO₂e-Emissionen, die aus der Nutzung digitaler Technologien entstehen.

Quellen: 1) UBA (2023b); 2) GRDC (2012); 3) Deter (2021).

Durch intelligente teilflächenspezifische Bodenbewirtschaftung konnten landwirtschaftliche Betriebe zwischen 12 und 44 kg Stickstoff pro Hektar einsparen



Fallstudie: Intelligente Bodenbewirtschaftung^a



12–44 kg/ha

Reduktion an Stickstoffdünger durch teilflächenspezifische Düngung¹

Ausgangslage

In einem Pilotprojekt der Firmen VISTA und FarmFacts, in Partnerschaft mit der Regierung der Oberpfalz, wurden acht Landwirtinnen und Landwirte über zwei Jahre in der teilflächenspezifischen Bodenbewirtschaftung geschult.

Digitale Technologien

Auf Basis von Satellitendaten und Pflanzenwachstumsmodellen wurde der exakte, teilflächenspezifische Düngerbedarf der Pflanzenbestände ermittelt.

Mit Hilfe der gesammelten Daten wurden Stickstoffdünger-Applikationskarten der landwirtschaftlichen Flächen erstellt. Mittels dieser Karten konnte teilflächenspezifisch gedüngt werden.

Reduktionspotenzial

In Niedrigertragszonen konnten durch die Anwendung teilflächenspezifischer Düngung zwischen 12 und 44 kg Stickstoff pro Hektar eingespart werden. Das sind ca. 10–30% der durchschnittlichen Stickstoffdüngermenge pro Hektar. Dadurch konnten die übermäßige Düngung und die damit verbundene Grundwasserbelastung reduziert sowie Düngungskosten eingespart werden.

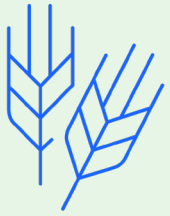
In den Hohertragszonen konnten Erträge optimiert werden, indem teilweise intensiver gedüngt wurde.

4.4.2

Landwirtschaft

Intelligente Nutztierhaltungssysteme

Die möglichen Entwicklungen der Emissionen des Tierbestandes wurden in drei CO₂e-Projektionen dargestellt



Definition und Einflussfaktoren im Landwirtschaftssektor

Der Sektor Landwirtschaft umfasst gemäß dem Bundes-Klimaschutzgesetz die biologisch-chemischen Emissionen aus der Tiernutzung und von landwirtschaftlichen Böden. Zudem beinhaltet der Sektor Emissionen aus der stationären und mobilen Feuerung von Betrieben der Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei.^{1,2} Die Emissionen aus der landwirtschaftlichen Bodenbewirtschaftung, Düngemittelanwendung und Nutztierhaltung machen mit 55,5 MT CO₂e ca. 90% der landwirtschaftlichen Emissionen aus.^{3,a} Daher liegt der Fokus dieses Kapitels auf der Nutztierhaltung.

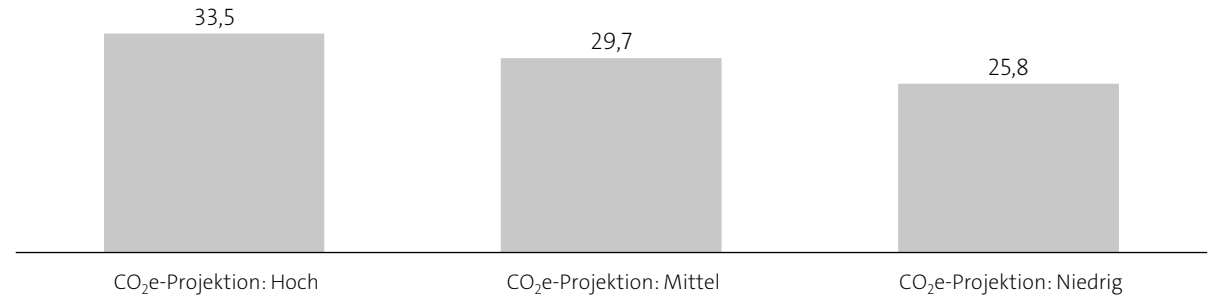
Einflussfaktoren bei der CO₂e-Projektion in der Nutztierhaltung

Zur Ermittlung des CO₂e-Reduktionspotenzials digitaler Technologien in der Nutztierhaltung für das Jahr 2030 ist eine entsprechende CO₂e-Projektion für 2030 erforderlich.^b Um mögliche Entwicklungsverläufe abzudecken und ein breiteres Verständnis der potenziellen Auswirkungen zu gewährleisten, wurden drei unterschiedliche CO₂e-Projektionen erstellt. Diese CO₂e-Projektionen werden hauptsächlich durch den folgenden variablen Einflussfaktor determiniert:

- **Nutztierbestände:** Die Nutztierbestände haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Emissionen der Nutztierhaltung, da die Emissionen dieses Subsektors aus den Verdauungsprozessen und der Gülle der Tiere stammen. Seit 2015 kann ein Trend zu zurückgehenden Rinder- und Schweinebeständen beobachtet werden.¹ Die CO₂e-Projektion des Subsektors hängt somit stark davon ab in welchem Ausmaß dieser Trend bis 2030 weitergeführt wird.

CO₂e-Projektionen in der Nutztierhaltung

[in MT CO₂e]



Folgende CO₂e-Projektionen wurden für die intelligenten Nutztierhaltungssysteme erstellt.^a

CO₂e-Projektion hoch – Diese CO₂e-Projektion für 2030 basiert auf den erwarteten Emissionen der Nutztierverdauung und Wirtschaftsdüngerlagerung aus dem UBA-Projektionsbericht 2023. Das UBA geht davon aus, dass der Rückgang der Rinder- und Schweinebestände weniger stark ausfallen wird als in den Vorjahren. Da Nutztieremissionen direkt mit Tierbeständen korrelieren, ergibt sich daraus die höchste CO₂e-Projektion.^c

CO₂e-Projektion mittel – Für diese CO₂e-Projektion wurde die Emissionsprojektion als Mittelwert zwischen den Ergebnissen der hohen und niedrigen CO₂e-Projektionen berechnet, um einen ausgewogenen Ausblick auf die möglichen Emissionen im Jahr 2030 zu geben.

CO₂e-Projektion niedrig – Diese CO₂e-Projektion wendet auf die projizierten Tierbestände im Jahr 2030 einen konstanten Emissionsfaktor an. Dieser basiert auf den Emissionen der enterischen Fermentation und der Lagerung von Wirtschaftsdünger im Jahr 2022.

Anmerkungen: a) Accenture Berechnung: Details zu Quellen und Berechnungen sind im [Anhang](#) zu finden; b) Siehe [Seite 18](#) zur Berechnungslogik; c) Es werden die Treibhausgasemissionen in Deutschland des Mit-

Maßnahmen-Szenarios (MMS) des UBA-Projektionsberichtes herangezogen.
Quellen: 1) [UBA \(2023i\)](#); 2) [BMJ & BfJ \(2019\)](#); 3) [UBA \(2023j\)](#).

Durch digitale Technologien können Nutztierhaltungssysteme individueller eingesetzt werden und dementsprechend individueller optimieren



Intelligente Nutztierhaltungssysteme

Intelligente Nutztierhaltungssysteme überwachen den Zustand von Nutztieren und ermöglichen eine optimierte Fütterung, was die Emissionen aus dem Verdauungsprozess reduziert.

Der Einsatz tragbarer oder ferngesteuerter Geräte erlaubt die Sammlung von Echtzeitdaten über den Gesundheitszustand und die Fütterungsmuster der Tiere.¹

Durch diese Systeme können Landwirtinnen und Landwirte frühzeitig Veränderungen im Verhalten oder physischen Zustand der Tiere erkennen, was für die frühzeitige Identifikation von Krankheiten und Verletzungen entscheidend ist.¹

Eine solche Überwachung verbessert nicht nur die Gesundheit und das Wohlbefinden der Tiere, sondern ermöglicht auch eine präzisere Anpassung der Futterformulierung und -abgabe an die individuellen Bedürfnisse jedes Tieres.²

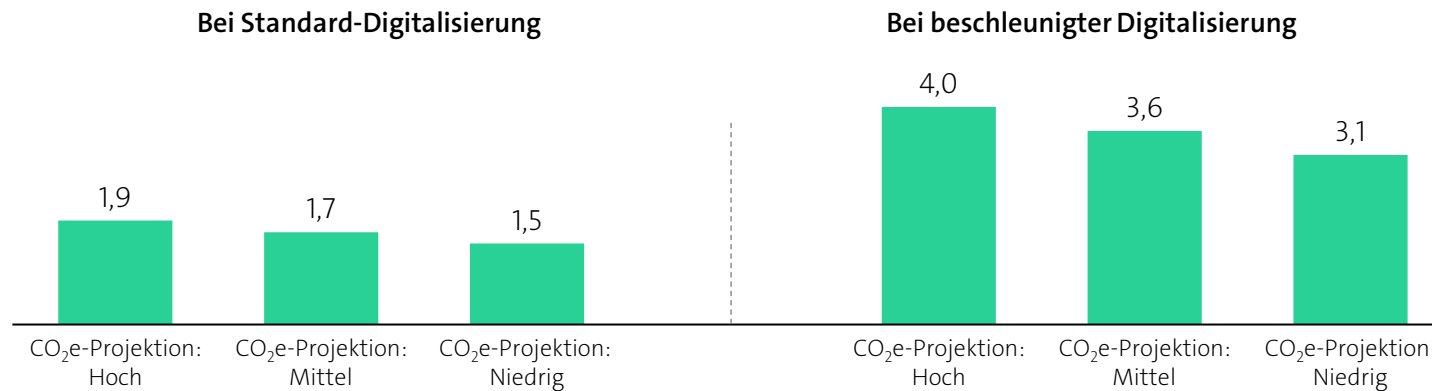
Wichtigste digitale Technologien

- **Internet der Dinge (IoT):** Durch tragbare und statische Sensoren werden automatisch Messungen am Tier, am Futtermittel und an der Umgebung durchgeführt. Zudem werden RFID-Tags (welche z.B. am Ohr eines Schweins angebracht werden können) genutzt, um individuelle Tiere zu identifizieren.²
- **Analytik-Systeme:** Die gesammelten Daten werden analysiert (u.a. mit Hilfe von Big-Data-Analysen³ und Künstlicher Intelligenz⁴), um den Nahrungsmittelbedarf eines Tieres zu bestimmen². Zudem wird der Gesundheitszustand des Tieres bewertet.⁵
- **Automatisierte Fütterungssysteme:** Durch die Verwendung analysierter Daten lassen sich individualisierte Maßnahmen realisieren. Automatisierte Fütterungsstationen sind in der Lage, Nahrungsmittel genau entsprechend dem täglichen, individuellen Bedarf eines jeden Tieres zu dosieren.⁵ Bei Anzeichen von Krankheiten ermöglichen diese Systeme zudem ein schnelleres Eingreifen.¹

Durch intelligente Nutztierhaltungssysteme können 2030 Einsparpotenziale von bis zu 4,0 MT CO₂e realisiert werden

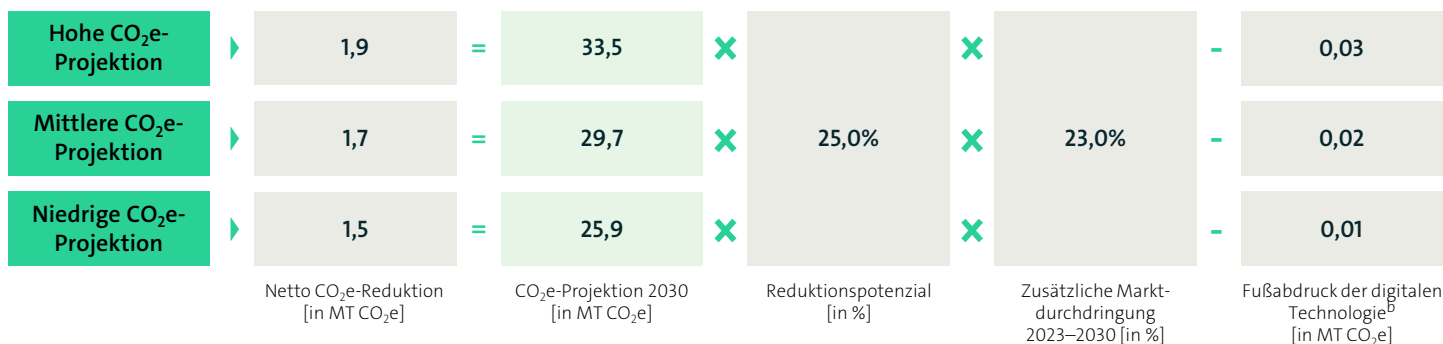
CO₂e-Einsparpotenziale im Jahr 2030 durch intelligente Nutztierhaltungssysteme

[in MT CO₂e]



Berechnung der Netto CO₂e-Reduktion am Beispiel der Standard-Digitalisierung

[in MT CO₂e]^a



Qualitativer Nutzen

In der Nutztierhaltung tragen die digital gestützte Tierüberwachung und die Präzisionsfütterung zur Reduktion der Emissionen des Verdauungsprozesses bei. Landwirtinnen und Landwirte können durch die Tierüberwachung fundiertere Entscheidungen treffen, welche zur Reduktion der Emissionen aus der Nutztierhaltung führen können.¹

Durch die Präzisionsfütterung kann die individuelle Nährstoffeffizienz eines Tiers gesteigert werden, welche die Emissionen aus der enterischen Fermentation und aus der Gülle reduziert.

Zudem ermöglicht die intelligente Nutztierhaltung eine Verbesserung der Tiergesundheit und eine Reduktion der Antibiotikanutzung.² Die individualisierte Fütterung trägt des Weiteren auch zu einer Reduktion an Nährstoffverschwendung und Futterkosten bei.³

Anmerkungen: a) Zur besseren Lesbarkeit wurden gerundete Werte verwendet; b) CO₂e-Emissionen, die aus der Nutzung digitaler Technologien entstehen.

Quellen: 1) Lovarelli et al. (2023); 2) Pomar & Remus (2019); 3) Schillings et al. (2021).

Durch intelligente Präzisionsfütterungsprogramme konnten 30% der Stickstoffausscheidungen von Schweinen reduziert werden



Fallstudie: Intelligente Nutztierhaltung^a



30%
Reduktion der
Stickstoffausscheidung
von Schweinen¹

Ausgangslage

Eine Studie von Andretta et al. (2016)¹ untersuchte den Einfluss von Präzisionsfütterungsprogrammen auf Leistung, Nährstoffhaushalt, Serumparameter und Futterkosten bei Zucht- und Mastschweinen.

Ziel war es, die Auswirkungen des Wechsels von konventioneller zu präziser Fütterung zu bewerten.

Im Versuch wurden insgesamt 70 Schweine über einen Zeitraum von 84 Tagen beobachtet, wobei fünf verschiedene Fütterungsbehandlungen angewendet wurden.

Digitale Technologien

In der Studie wurde das „Exafan Intelligent Precision Feeding System“ genutzt. Dieses System nutzt RFID-Tags, um individuelle Schweine zu identifizieren. Ein zentraler Computer misst und analysiert durch Big-Data-Analysen täglich u.a. das erhaltene Futter, das Gewicht und den Verzehr eines Schweines. Basierend auf diesen Analysen führt das System automatisierte Entscheidungen über die Futtermenge und die Futterzusammensetzung auf der Grundlage der individuellen Bedürfnisse des Schweines aus und stellt dieses Futter bereit.

Reduktionspotenzial

Durch die gezielte, individuelle Fütterung der Schweine konnte die Aufnahme von verdaulichem Lysin um 26%, die geschätzte Stickstoffausscheidung um 30% und die Futterkosten um 10% im Vergleich zur Gruppenfütterung reduziert werden. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass Präzisionsfütterung eine effektive Methode zur Steigerung der Nachhaltigkeit in der Schweineproduktion darstellt, ohne die Wachstumsleistung zu beeinträchtigen.

Anmerkung: a) Der dargestellte Anwendungsfall wurde nicht für die Analyse genutzt.
Quelle: 1) [Andretta et al. \(2016\)](#).

4.5

Verkehr

Im Verkehrssektor können digitale Technologien bis zu 3,0% zur Erreichung des Klimaziels 2030 beitragen

Der Verkehrssektor

Der Verkehrssektor umfasst Emissionen aus Straßen-, Schienenverkehr, inländischem Flugverkehr und Binnenschifffahrt, jedoch nicht die des internationalen Luftverkehrs und der Hochseeschifffahrt. Mit 144,5 MT CO₂e stellt der Straßenverkehr 97,7% der Sektoremissionen dar. Daher liegt der Untersuchungsfokus hier in den Pkw- und Lkw-Verkehren.

2,1–5,5%
= 3,5–9,3
MT CO₂e

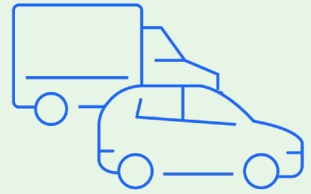
können bei mittlerer CO₂e-Projektion durch digitale Technologien im Verkehrssektor reduziert werden – abhängig von der Digitalisierungsgeschwindigkeit in Deutschland.

Bis zu 3,0%

der Klimalücke in Höhe von 308 MT CO₂e lassen sich durch digitale Technologien im Verkehrssektor schließen.

Kernerkenntnisse

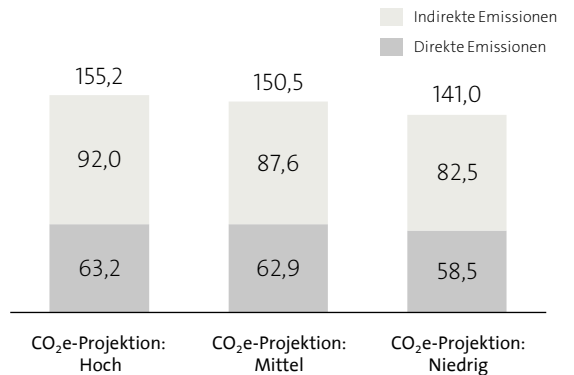
1. Bei beschleunigter Digitalisierung erhöhen sich die CO₂e Einsparungen um 166% auf 9,3 MT CO₂e, verglichen mit der Standard-Digitalisierungsgeschwindigkeit.^a
2. Car- und Ride-Sharing weisen signifikant geringe Einsparpotenziale auf. Ein Hauptgrund: Die zusätzliche Marktdurchdringung bis 2030 fällt im Verhältnis signifikant gering aus.
3. Die ermittelten Prognosen zeigen: Intelligente echtzeitbasierte Routen- und Frachtoptimierung im Lkw-Verkehr werden zwischen 2023 und 2030 zusätzliche 31 Prozentpunkte Marktdurchdringung erfahren; insbesondere bei kleineren Flotten.^b



CO₂e-Projektionen und Einflussfaktoren

Um das Reduktionspotenzial digitaler Technologien im Verkehrssektor in 2030 zu bewerten, wurden aufgrund variabler Einflussfaktoren drei verschiedene CO₂e-Emissionsprojektionen erstellt. Einer dieser Einflussfaktoren berücksichtigt den Anstieg von E-Pkw Neuzulassungen und deren Fahrleistung. Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist der Stromemissionsfaktor, beeinflusst durch die Entwicklung erneuerbarer Energien wie Solar- und Windkraft sowie den Ausbau der Netzinfrastruktur und Stromspeicher.

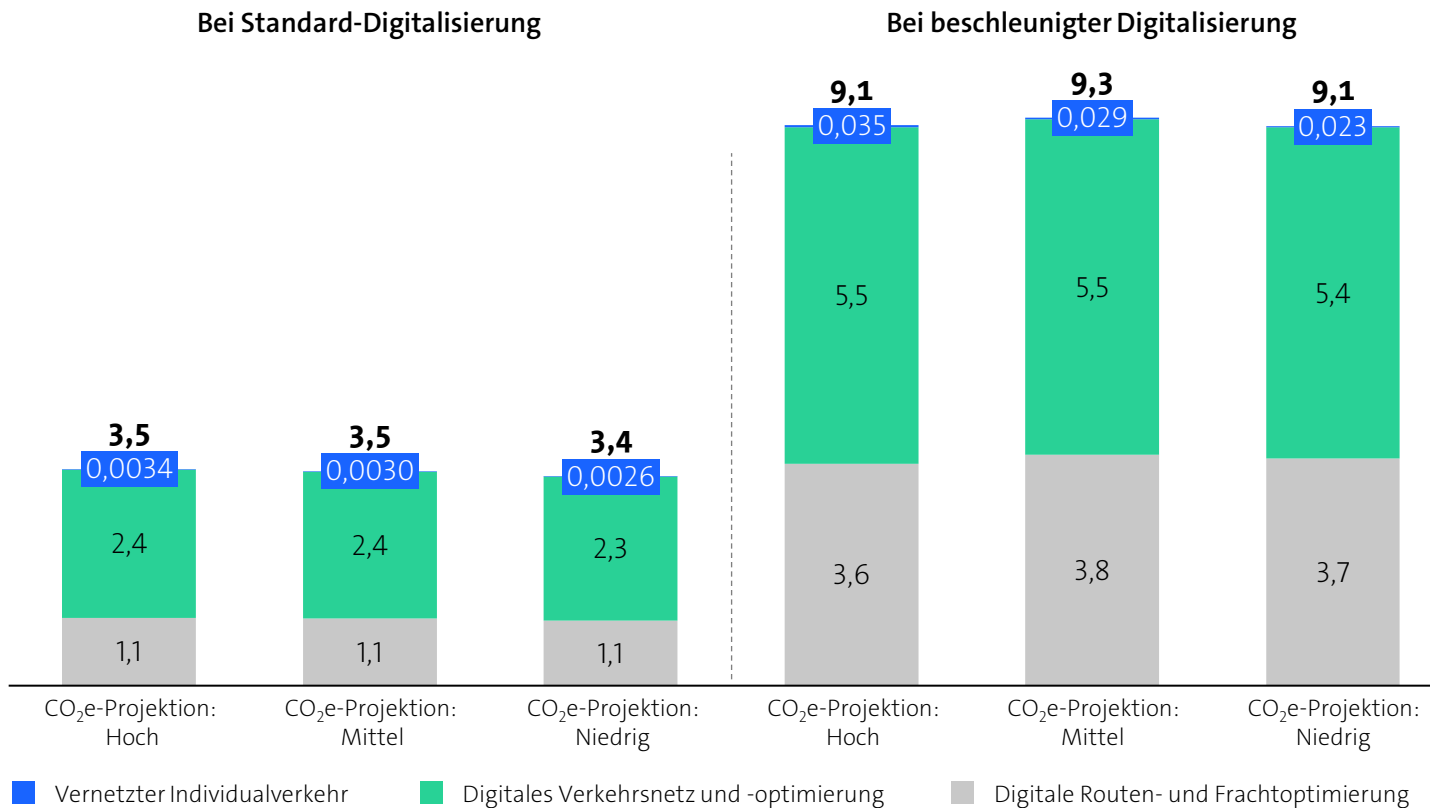
Erstellte CO₂e-Projektionen für 2030 in MT CO₂e



Bis zu 9,3 MT CO₂e lassen sich durch intelligenten Verkehr sowie intelligente Routen- und Frachtoptimierung im Verkehrssektor in 2030 einsparen

CO₂e-Einsparpotenziale im Jahr 2030 im Verkehrssektor^a

[in MT CO₂e]



Erkenntnisse

Die CO₂e-Einsparpotenziale durch digitale Technologien wurden anhand nachstehender drei Anwendungsfälle berechnet. Die CO₂e-Einsparungen resultieren dabei primär aus Einsparungen im Verkehrsaufkommen und -leistung.

Vernetzter Individualverkehr^b – mittels Car- und Ride-Sharing, weisen signifikant geringe CO₂e-Einsparpotenziale auf. Im Unterschied zur ersten Studie in 2021¹ zeigen neuere Untersuchungen, dass die Marktdurchdringung – im Vergleich zum gesamten Individualverkehr – bis 2030 sehr gering ist.²

Digitales Verkehrsnetz und -optimierung – hauptsächlich durch Echtzeitdaten, ermöglichen in 2030 eine Emissionsreduktion von bis zu 2,7% (=2,4 MT CO₂e) bei Standard-Digitalisierung und 6,2% (=5,5 MT CO₂e) bei beschleunigter Digitalisierung, basierend auf der mittleren CO₂e-Projektion (=87,6 MT CO₂e).

Digitale Routen- und Frachtoptimierung – hauptsächlich durch moderne Telematiksysteme, ermöglichen in 2030 eine Emissionsreduktion von bis zu 1,7% (=1,1 MT CO₂e) bei Standard-Digitalisierung und 6,0% (=3,8 MT CO₂e) bei beschleunigter Digitalisierung, basierend auf der mittleren CO₂e-Projektion (=62,9 MT CO₂e).

Anmerkungen: a) Abweichungen in den Summen können aus Rundungen resultieren; b) Aufgrund des geringen Einsparpotenzials finden sich die Berechnungen des vernetzten Individualverkehrs nur im Anhang (siehe S. 126 ff.).

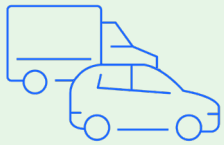
Quellen: 1) Bitkom (2021a); 2) Doll & Krauss (2022).

4.5.1

Verkehr

Digitales Verkehrsnetz und -optimierung

Die möglichen Entwicklungen der Pkw-Bestände und der Fahrleistung von E-Pkws wurden in drei CO₂e-Projektionen dargestellt



Definition und Einflussfaktoren

Der Sektor Verkehr umfasst gemäß dem Bundes-Klimaschutzgesetz Emissionen aus dem Straßenverkehr, Schienenverkehr, dem inländischen Flugverkehr, sowie der Binnenschifffahrt. Emissionen des internationalen Luftverkehrs und der Hochseeschifffahrt sind nicht in diesem Sektor enthalten.^{1,2} Der Straßenverkehr mit 144,5 MT CO₂e macht 97,7% der Emissionen im Verkehrssektor aus.^{3,a} Daher ist der Untersuchungsfokus in diesem Kapitel auf die Pkw- und Lkw-Verkehre gelegt.

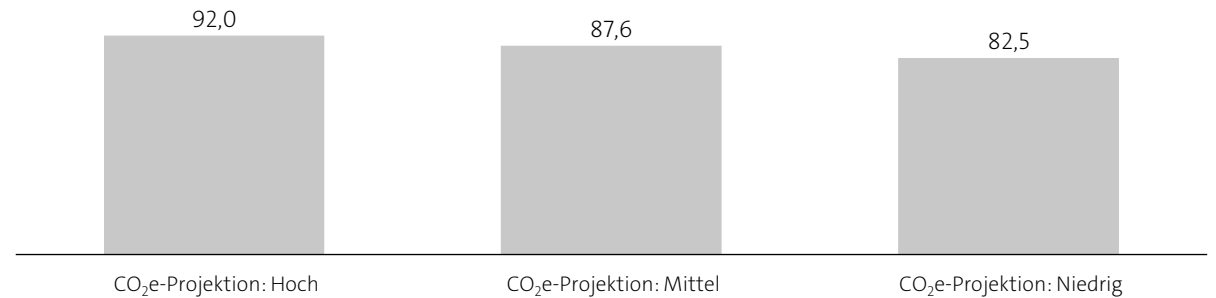
Einflussfaktoren bei der CO₂e-Projektion im Individualverkehr

Zur Ermittlung des CO₂e-Reduktionspotenzials digitaler Technologien im Individualverkehr für das Jahr 2030 ist eine entsprechende CO₂e-Projektion für 2030 erforderlich.^b Um mögliche Entwicklungsverläufe abzudecken und ein breiteres Verständnis der potenziellen Auswirkungen zu gewährleisten, wurden drei unterschiedliche CO₂e-Projektionen erstellt. Diese CO₂e-Projektionen werden hauptsächlich durch die folgenden variablen Einflussfaktoren determiniert:

- **Pkw-Bestände und -Fahrleistung:** Die CO₂e-Emissionen in 2030 hängen maßgeblich am Bestand bzw. an der Fahrleistung der E-Pkws Ende 2030 ab. Daher ist das Wachstum von E-Pkw Neuzulassungen bis Ende 2030 eine sehr wichtige Projektionsvariable.
- **Stromemissionsfaktor:** Die o.g. Verschiebung von konventionellen Pkws zu E-Pkws verschiebt die direkten Emissionen im Verkehrssektor zu Strommix-bedingten indirekten Emissionen. Der damit verbundene Emissionsfaktor hängt von der Ausbaugeschwindigkeit erneuerbarer Energien wie Solar- und Windkraft sowie der Entwicklung der Netzinfrastruktur und Stromspeicher ab. Siehe auch Kapitel Energie.

CO₂e-Projektionen im Individualverkehr

[in MT CO₂e]



Folgende CO₂e-Projektionen wurden für die digitale Verkehrsnetz und -optimierung erstellt.^c

CO₂e-Projektion hoch – Diese CO₂e-Projektion basiert auf der Annahme, dass der Anteil von konventionellen und E-Pkws an den Pkw-Neuzulassungen und -Fahrleistungen bis Ende 2030 stabil bleibt. Somit ist der Anteil von E-Pkws am Pkw-Bestand in der hohen CO₂e-Projektion der niedrigste der drei CO₂e-Projektionen. Als Emissionsfaktor wurde der Wert aus der hohen CO₂e-Projektion des Energiesektors genutzt.

CO₂e-Projektion mittel – Für diese CO₂e-Projektion wurde ein Mittelwert der Anteile von konventionellen und E-Pkws am Pkw-Bestand und -Fahrleistung der hohen und niedrigen CO₂e-Projektionen berechnet, um einen ausgewogenen Ausblick auf die möglichen Emissionen im Jahr 2030 zu geben. Als Emissionsfaktor wurde der Wert aus der mittleren CO₂e-Projektion des Energiesektors genutzt.

CO₂e-Projektion niedrig – Diese CO₂e-Projektion basiert auf dem vom UBA projizierten Anteil von konventionellen und E-Pkws Ende 2030.^d Der Anteil von E-Pkws am Pkw-Bestand ist hier der höchste. Der Anteil an der Pkw-Fahrleistung von E-Pkws steht im selben Verhältnis wie der Anteil am Pkw-Bestand. Als Emissionsfaktor wurde der Wert aus der niedrigen CO₂e-Projektion des Energiesektors genutzt.

Anmerkungen: a) Siehe auch [Seite 17](#); b) Siehe [Seite 18](#) zur Berechnungslogik; c) Accenture Berechnung: Details zu Quellen und Berechnungen sind im [Anhang](#) zu finden; d) Es werden die Treibhausgasemissionen in Deutschland des Mit-Maßnahmen-Szenarios (MMS) des UBA-Projektionsberichtes herangezogen.

Quellen: 1) UBA (2023j); 2) BMJ & BfJ (2019); 3) UBA (2023j).

Durch digitale Technologien werden Verkehrsnetze und -ströme transparenter und erlauben den Verkehrsteilnehmern individuelle Optimierungen



Digitales Verkehrsnetz und -optimierung

Systeme zur Verkehrssteuerung und -optimierung tragen zur Reduktion von Emissionen im Personenverkehr bei, indem sie den Zugang zu emissionsärmeren Verkehrswegen und -mitteln erleichtern. Zwei wesentliche Ansätze werden hierbei verfolgt: die Routenoptimierung im Pkw-Verkehr und das digitale öffentliche Verkehrsnetz.

Die Routenoptimierung zeigt Autofahrerinnen und Autofahrern auf Basis von Echtzeit-Verkehrsdaten das optimale Fahrverhalten und die effizienteste Streckenführung im Kontext des aktuellen Verkehrsaufkommens.

Das digitale öffentliche Verkehrsnetz fördert die Nutzung des öffentlichen Nahverkehrs durch verbesserte Fahrerlebnisse. Echtzeitinformationen, digitale Fahrscheine und Annehmlichkeiten wie kostenloses WLAN erhöhen die Attraktivität öffentlicher Verkehrsmittel und schaffen damit Anreize für den Umstieg von Pkws auf öffentliche Verkehrsmittel.

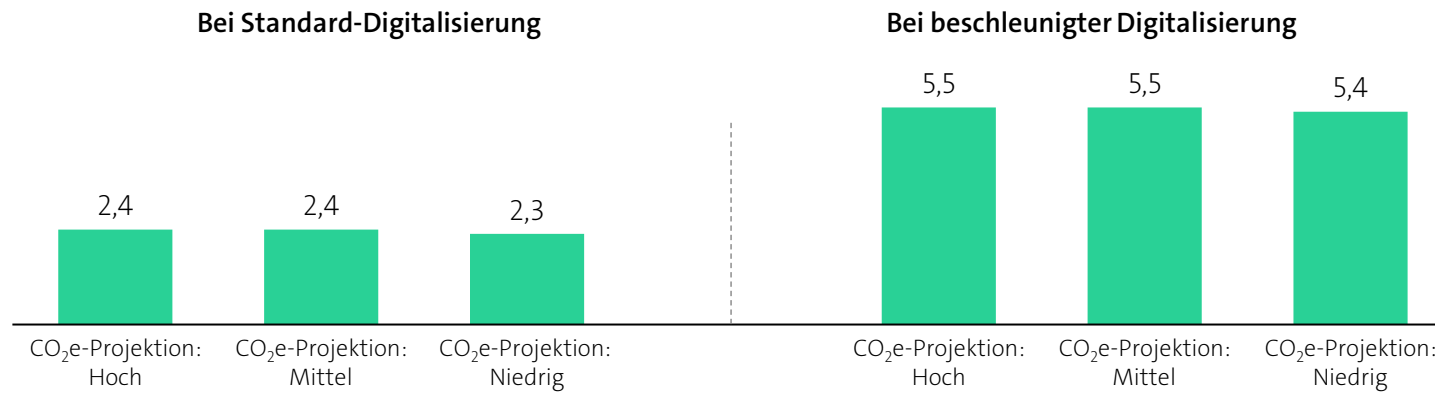
Wichtigste digitale Technologien

- **Geographische Informationssysteme (GIS):** GIS erfassen Daten aus Trackingsystemen wie GPS (Global Positioning System) und bieten detaillierte räumliche Analysen. Zusätzlich ermöglichen sie das Verständnis räumlicher Muster zur Optimierung von Routen.¹
- **Automatische Fahrzeugortungssysteme (AVL):** AVL nutzt das Internet der Dinge (IoT), um Echtzeitinformationen über Fahrzeuge zu sammeln. Diese Daten verbessern die Betriebseffizienz und helfen bei der Überwachung und Optimierung des Verkehrsflusses.¹
- **Automatische Fahrgastzählssysteme (AFZ):** AFZ nutzen Sensoren, um die Anzahl der Passagierinnen und Passagiere in Verkehrsmitteln zu ermitteln.² Diese Daten sind wichtig für die Planung und Anpassung von Fahrplänen und helfen, Überfüllungen zu vermeiden.¹
- **Entscheidungshilfesysteme:** Diese Systeme analysieren AVL- und AFZ-Daten, um Echtzeit-Alternativen anzubieten. Sie unterstützen bei der effizienten Ressourcenallokation und verbessern die Zuverlässigkeit des Verkehrssystems.¹
- **Fahrgastinformationssysteme und Echtzeit-Navigationssysteme:** Diese Systeme bieten Verkehrsinformationen in Echtzeit, unterstützt durch IoT und KI. Sie ermöglichen eine effizientere Reiseplanung und verbessern die Nutzererfahrung durch präzise Verkehrsmusteranalysen.^{3,4}

Durch digitale Verkehrsnetze und Verkehrsnetzoptimierung können 2030 Einsparpotenziale von bis zu 5,5 MT CO₂e realisiert werden

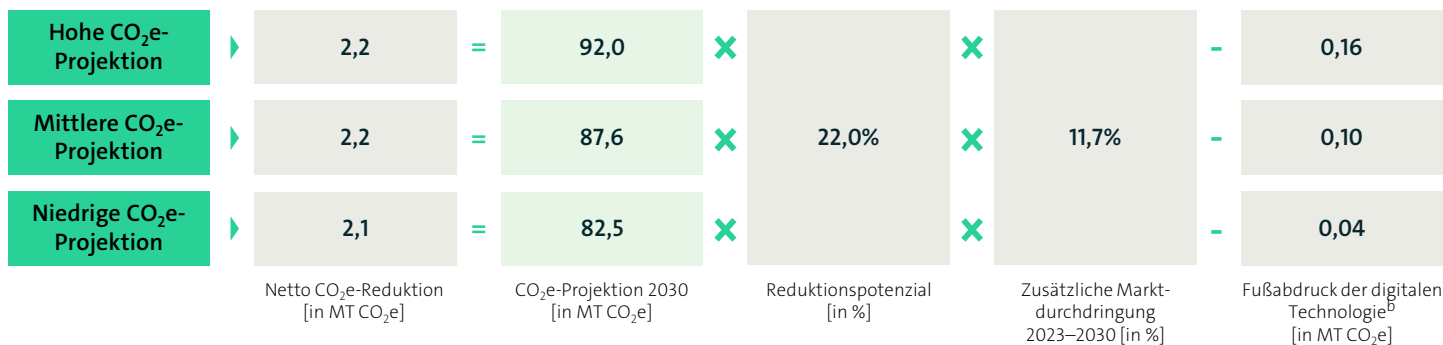
CO₂e-Einsparpotenziale im Jahr 2030 durch digitales Verkehrsnetz und -optimierung^a

[in MT CO₂e]



Berechnung der Netto CO₂e-Reduktion am Beispiel der Routenoptimierung^b

[in MT CO₂e bei Standard-Digitalisierung]^c



Anmerkungen: a) Das Einsparpotenzial des Anwendungsfalls stammt aus den Wirkungshebeln digitale Pkw-Routenoptimierung und digitales öffentliches Verkehrsnetz, welche unterschiedliche CO₂e-Projektionen, Reduktionspotenziale, usw. haben. Das Einsparpotenzial beider Hebel wurde für den Anwendungsfall aufaddiert; b) Beispielhaft wird die Berechnung des Wirkungshebels digitale Pkw-Routenoptimierung dargestellt; c) Zur besseren Lesbarkeit wurden gerundete Werte verwendet; d) CO₂e-Emissionen, die aus der Nutzung digitaler Technologien entstehen.

Quellen: 1) Isler (2023); 2) BMUV (2022); 3) FIS (2022); 4) VCÖ (2016).

Qualitativer Nutzen

Die Anwendung von Echtzeit-Navigationssystemen im Rahmen der digitalen Optimierung von Verkehrsnetzen führt zu einer Reduktion der Anzahl und Dauer von Staus. Dies wird durch verbesserte Routenplanung und -ausführung erreicht. Die direkte Folge ist ein flüssigerer Verkehrsfluss, was wiederum zur Verbesserung der allgemeinen Verkehrsplanung¹ beiträgt.

Die Digitalisierung der öffentlichen Verkehrsnetze motiviert zum Umstieg von Privat-Pkws auf öffentliche Verkehrsmittel. Dies führt zu einer Reduktion des Pkw-Verkehrs. Der qualitative Nutzen liegt hier in der Entlastung der Straßen sowie in einer nachhaltigeren, umweltfreundlicheren Mobilität.

Zusätzlich führen eine Verbesserung des Verkehrsflusses und die Reduktion des Verkehrs zur Minderung der gesundheits-schädlichen² Feinstaubbelastung.³

Darüber hinaus hat eine solche Verbesserung des Verkehrs auch soziale Auswirkungen. Haushalte mit niedrigem Einkommen, die sich häufig an stark befahrenen Straßen befinden, sind besonders von den negativen Folgen des Verkehrs betroffen und profitieren somit überproportional von diesen Maßnahmen.⁴

Digitale Routenoptimierung im Pkw-Verkehr spart weltweit 1 Million Tonnen CO₂e pro Jahr ein



Fallstudie: Digitales Verkehrsnetz und -optimierung^a



1.000.000 Tonnen
CO₂e-Reduktion p.a.

Ausgangslage

Seit 2021 ermöglicht die mobile App „Google Maps“ ihren Nutzerinnen und Nutzern, Routen zu wählen, die Kraftstoff sparen. Abhängig vom jeweiligen Fahrzeugtyp lassen sich diese Routen individuell anpassen. In Deutschland ist diese Funktion seit 2022 zugänglich.¹

Digitale Technologien

Auf Basis von Daten der Europäischen Umweltagentur und Googles eigenen maschinellen Lernmodellen² sowie Künstlicher Intelligenz³ erstellt Google Routenvorschläge auf Google Maps.

Mit Hilfe der gesammelten Daten können Gefahrenstellen ermittelt und umfahren werden, um ein kraftstoffsparendes Fahren zu gewähren.

Reduktionspotenzial

In den ersten zwei Jahren seit der Einführung dieser Funktion wurden in Nordamerika so viele CO₂e-Emissionen eingespart, als ob 100.000 Autos dauerhaft nicht mehr genutzt worden wären. Mit Hilfe von künstlicher Intelligenz und Erkenntnissen des National Renewable Energy Laboratory (NREL) veröffentlichte Google eine Schätzung, nach der global über eine Millionen Tonnen CO₂e-Emissionen pro Jahr durch die Verwendung von kraftstoffsparenden Routen eingespart werden können.¹

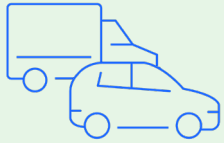
Anmerkung: a) Der dargestellte Anwendungsfall wurde nicht für die Analyse genutzt.
Quellen: 1) Rang (2022); 2) Wittich (2022); 3) Dicker (2021).

4.5.2

Verkehr

Digitale Routen- und Frachtoptimierung im Lkw-Güterverkehr

Die möglichen Entwicklungen der Lkw-Bestände und der Fahrleistung von E-Lkws wurden in drei CO₂e-Projektionen dargestellt



Definition und Einflussfaktoren

Der Sektor Verkehr umfasst gemäß dem Bundes-Klimaschutzgesetz Emissionen aus dem Straßenverkehr, Schienenverkehr, dem inländischen Flugverkehr, sowie der Binnenschifffahrt. Emissionen des internationalen Luftverkehrs und der Hochseeschifffahrt sind nicht in diesem Sektor enthalten.^{1,2} Der Straßenverkehr mit 144,5 MT CO₂e macht 97,7% der Emissionen im Verkehrssektor aus.^{3,a} Daher ist der Untersuchungsfokus in diesem Kapitel auf die Pkw- und Lkw-Verkehre gelegt.

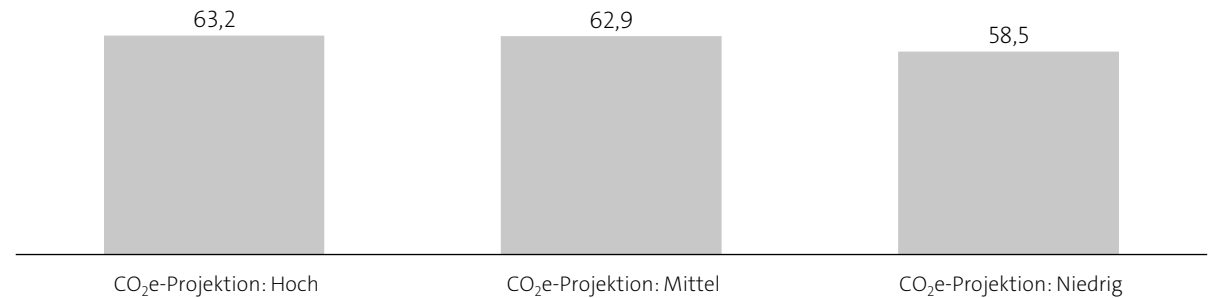
Einflussfaktoren bei der CO₂e-Projektion im Lkw-Güterverkehr

Zur Ermittlung des CO₂e-Reduktionspotenzials digitaler Technologien im Lkw-Güterverkehr für das Jahr 2030 ist eine entsprechende CO₂e-Projektion für 2030 erforderlich.^b Um mögliche Entwicklungsverläufe abzudecken und ein breiteres Verständnis der potenziellen Auswirkungen zu gewährleisten, wurden drei unterschiedliche CO₂e-Projektionen erstellt. Diese CO₂e-Projektionen werden hauptsächlich durch die folgenden Einflussfaktoren determiniert:

- **Lkw-Bestände und -Fahrleistung:** Die CO₂e-Emissionen in 2030 hängen maßgeblich am Bestand bzw. an der Fahrleistung der konventionellen Diesel-Lkws und E-Lkws Ende 2030 ab. Daher ist die Verteilung dieser zwei Lkw Typen Ende 2030 eine sehr wichtige Projektionsvariable.
- **Stromemissionsfaktor:** Die o.g. Verschiebung von konventionellen Diesel-Lkws zu E-Lkws verschiebt die direkten Emissionen im Verkehrssektor zu Strommix-bedingten indirekten Emissionen. Der damit verbundene Emissionsfaktor hängt von der Ausbaugeschwindigkeit erneuerbarer Energien wie Solar- und Windkraft sowie der Entwicklung der Netzinfrastruktur und Stromspeicher ab.

CO₂e-Projektionen im Lkw-Güterverkehr

[in MT CO₂e]



Folgende CO₂e-Projektionen wurden für die digitale Routen- und Frachtoptimierung im Lkw-Güterverkehr erstellt.^c Für die Bewertung der Effizienz dienen primär die Verhältnisse zwischen konventionellen Diesel-Lkws und E-Lkws als Grundlage.

CO₂e-Projektion hoch – Die hohe CO₂e-Projektion basiert auf der heutigen Verteilung von konventionellen Diesel-Lkws und E-Lkws.^c In dieser Projektion macht der Anteil an konventionellen Diesel-Lkws 99% aus. Bei E-Lkws erfolgt die Emissionsberechnung über den Energieverbrauch in Kilowattstunde (kWh) multipliziert mit dem Emissionsfaktor gemäß der Projektion im Energiekapitel.

CO₂e-Projektion mittel – Bei der mittleren CO₂e-Projektion wird ein Anteil an E-Lkws von 6% angenommen. Dieser Wert stellt den Mittelwert zwischen der Verteilung der hohen und niedrigen CO₂e-Projektion dar. Als Emissionsfaktor wurde die mittlere Projektion aus dem Energiekapitel genutzt.

CO₂e-Projektion niedrig – Die niedrige CO₂e-Projektion basiert auf der vom UBA für 2030 projizierten Verteilung der Antriebsarten. Hier macht der Anteil an E-Lkws 11% aus. Als Emissionsfaktor wurde die niedrige Projektion aus dem Energiekapitel genutzt.

Anmerkungen: a) Siehe auch [Seite 17](#); b) Siehe [Seite 18](#) zur Berechnungslogik; c) Accenture Berechnung: Details zu Quellen und Berechnungen sind im [Anhang](#) zu finden; d) Es werden die Treibhausgasemissionen in Deutschland des Mit-Maßnahmen-Szenarios (MMS) des UBA-Projektionsberichtes herangezogen.

Quellen: 1) [UBA \(2023j\)](#); 2) [BMJ & BfJ \(2019\)](#); 3) [UBA \(2023j\)](#).

Durch digitale Technologien können Routen- und Frachtoptimierungen im Lkw-Güterverkehr noch feinteiliger, dynamischer und skalierter erfolgen



Digitale Routen- und Frachtoptimierung im Lkw-Güterverkehr

Digitale Routen- und Frachtoptimierung befasst sich mit dem Einsatz digitaler Technologien zur effizienten Lösung von Optimierungsproblemen bei Routen und Frachten. Diese Technologien erleichtern die schnelle und effektive Lösung komplexer Herausforderungen, ermöglichen die Echtzeit-Überwachung und Anpassung der Optimierungsergebnisse.

Anwendung finden sie vor allem in der Planung und Optimierung von Touren und Ladeplänen für Transportfahrzeuge und Ladeeinheiten. Unterschieden wird hierbei zwischen der langfristigen Planung, der genauen Terminierung (inklusive Feinterminierung von Routen und Fahrzeugen, wie beispielsweise Zeitfenstersteuerung an Laderampen) und der ad-hoc Steuerung, etwa bei der Umleitung von Lkws bei Stau.

Aktuell konzentrieren sich Erörterungen über Künstliche Intelligenz bzw. intelligente Routen- und Frachtoptimierung, vorrangig auf akademische Publikationen. In den nächsten Jahren ist jedoch zu erwarten, dass der Einsatz KI-gestützter Methoden zur Optimierung von Touren, Routen, Frachten und genutzter Infrastruktur in der Unternehmenspraxis an Relevanz gewinnt.

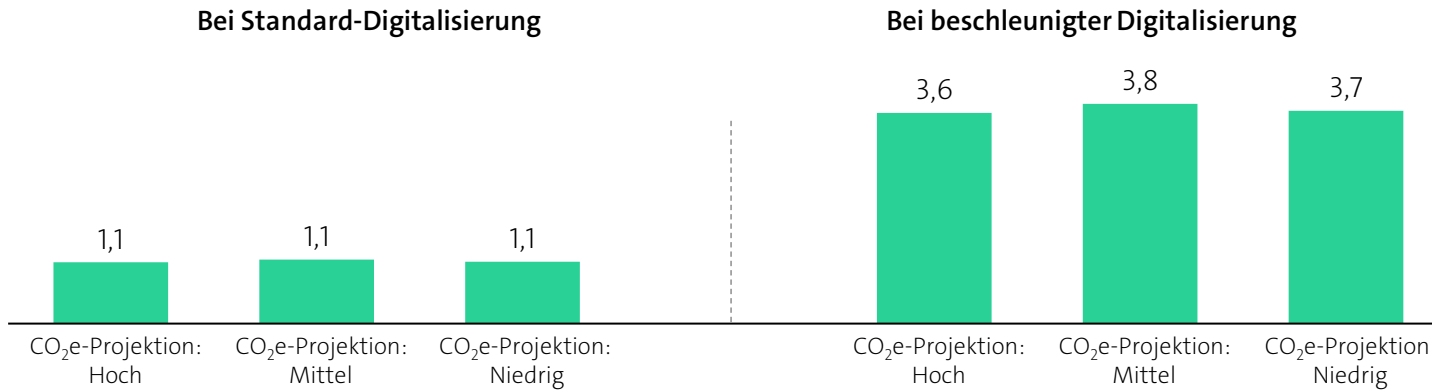
Wichtigste digitale Technologien

- **Telematiksysteme und KI-Optimierung^a:** Telematiksysteme und KI-Optimierung vereinfachen die Flottenüberwachung durch Bereitstellung von Echtzeitdaten zu Standort (per GPS), Fahrzeug und Fahrverhalten, was zu optimierter Routenplanung und gesteigerter Kraftstoffeffizienz führt.
- **Internet der Dinge (IoT):** IoT-Geräte liefern wichtige Informationen über Fahrzeug und Ladung in Echtzeit, die zur Frachtüberwachung und Optimierung des Kraftstoffverbrauchs beitragen.
- **Vier weitere Technologien**, die noch nicht breit implementiert sind, aber zunehmend an Relevanz gewinnen, sind folgende:^a (1) Blockchain-Technologie^b: Kürzt Transaktionszeiten (v.a. an Übergabepunkten) und senkt so den Ressourcenverbrauch, was die Effizienz in der Transportkette steigert. (2) Cloud-basierte Frachtplattformen: Erhöhen die Transparenz im Transportwesen und minimieren Leerfahrten durch unternehmensübergreifende Zusammenarbeit (Bsp. Shared Vehicles). (3) Autonome Fahrzeuge: Bieten Potenzial für verbesserte Transporteffizienz und reduzierte Emissionen, befinden sich aber noch in einer frühen Phase der Implementierung (Bsp. Truck Platooning). (4) 3D-Druck^c: Verringert den Bedarf an Transport für bestimmte Waren und zeigt großes Potenzial für zukünftige Logistiklösungen. Es ist unwahrscheinlich, dass diese Technologie bis 2030 eine Marktdurchdringung erreicht, die das Transportaufkommen massiv reduziert.

Durch digitale Routen- und Frachtoptimierung können im Lkw-Güterverkehr 2030 Einsparpotenziale von bis zu 3,8 MT CO₂e realisiert werden

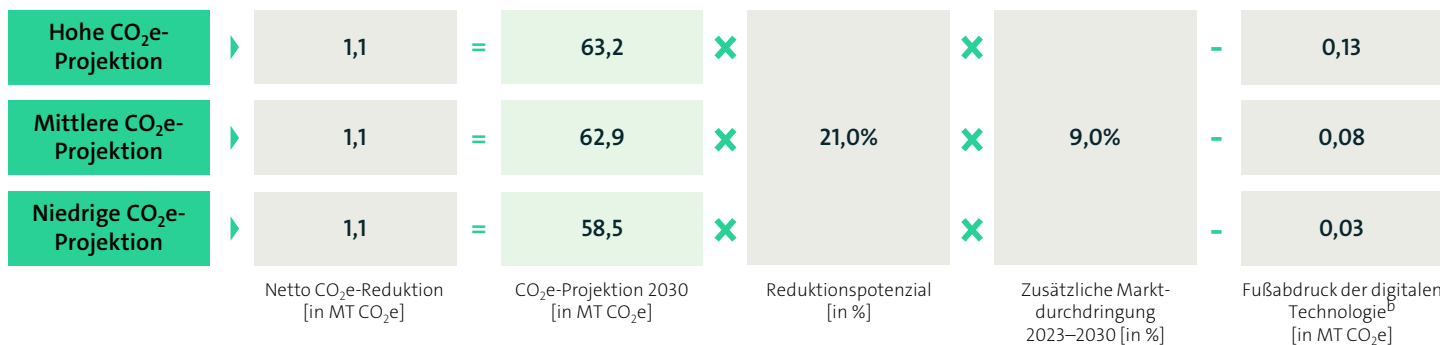
CO₂e-Einsparpotenziale im Jahr 2030 durch digitale Routen- und Frachtoptimierung

[in MT CO₂e]



Berechnung der Netto CO₂e-Reduktion am Beispiel der Standard-Digitalisierung

[in MT CO₂e]^a



Anmerkungen: a) Zur besseren Lesbarkeit wurden gerundete Werte verwendet; b) CO₂e-Emissionen, die aus der Nutzung digitaler Technologien entstehen; c) Mit Sensoren ausgestattete Ladeeinheiten und Lademittel, die potenzielle Störungen anzeigen, z.B. durch starke Erschütterung, können Standard-Nachlieferungen früher auslösen, um oftmals dringliche Nachlieferungen, v.a. Expresslieferungen per Luftfracht mit hoher CO₂e-Intensität pro Tonnenkilometer zu vermeiden.

Qualitativer Nutzen

Der qualitative Nutzen der digitalen Routen- und Frachtoptimierung durch den Einsatz genannter Technologien liegt in der Steigerung der Effizienz und Nachhaltigkeit in der Logistikbranche.

Konkret ermöglichen die Technologien eine präzisere Planung und Durchführung von Transporten, indem sie Echtzeitdaten und fortschrittliche Analysen bereitstellen. Dies führt zu einer Reduzierung von Leerfahrten, einer optimierten Auslastung von Transportmitteln, einer Minimierung von Wartezeiten und ineffizienten Nachlieferungen^c.

In Konsequenz werden Lieferzeiten bedarfsgerecht definiert, Kosten eingespart (insbesondere beim Kraftstoffverbrauch) und gleichzeitig die Umweltbelastung (inklusive CO₂e und anderer lokaler Schadstoffe wie Feinstaub) verringert.

Durch den potenziellen Zeitgewinn aus der o.g. Optimierung der Lieferzeiten kann es in manchen Fällen sogar zu einer Entschleunigung des Lkw-Transports und damit zur Verlagerung auf Bahn und Binnenschiff kommen. In einem solchen Szenario würde die Digitalisierung nicht nur den Lkw-Verkehr effizienter gestalten, sondern ihn vermeiden.

Komplexe echte Daten ersetzen Durchschnitts- sowie Schätzwerte mittels intelligenter Algorithmen und erlauben so CO₂e-Einsparungen von etwa 10–20%



Fallstudie: Intelligente Routenoptimierung^a



10–20% Verringerung
der CO₂e-Emissionen

Ausgangslage

In einer Branche, die von der Notwendigkeit schneller und gleichzeitig umweltfreundlicher Lieferoptionen geprägt ist, stehen Logistikunternehmen vor der Herausforderung, ihre Routenplanung zu optimieren und gleichzeitig die CO₂e-Emissionen zu reduzieren. Klassische Routenoptimierung berücksichtigen oftmals Schätzwerte (z.B. für Verkehrsflüsse), statische Werte (z.B. für Lieferzeitfenster des Empfängers) und Durchschnittswerte (z.B. für Sendungsvolumina und Fahrzeugkapazitäten).

Digitale Technologien

Greenplan, ein von DHL finanziertes Startup, hat eine Lösung für voll-dynamische Routenplanung und -optimierung entwickelt.¹

Der datengetriebene Algorithmus optimiert Zustellrouten und Haltesequenzen auf sehr innovative Weise: (1) Touren werden auf Basis tatsächlicher und nicht durchschnittlicher Sendungsvolumina aufgestellt, (2) Abfahrtzeiten werden auf Basis historischer tageszeitabhängiger Geschwindigkeitsprofile² geplant und dynamisch (z.B. durch Geofencing) ausgelöst und geleitet, (3) Struktur der Touren hängt von tatsächlichen und nicht durchschnittlichen Sendungsvolumina ab, wobei bei der Kapazitätsplanung heterogene Flotten und unterschiedliche Fahrzeuganbieter berücksichtigt werden.³

Reduktionspotenzial

Greenplans digitale Lösung kann die Fahrstrecken um durchschnittlich 10% reduzieren, was direkt zu einer Verringerung der CO₂e-Emissionen führt. Im Kontext einer typischen Logistikflotte sind das jährliche CO₂e-Einsparungen von etwa 10–20%.⁴

Anmerkung: a) Der dargestellte Anwendungsfall wurde nicht für die Analyse genutzt.

Quellen: 1) DHL Group (2020); 2) Greenplan (2023a); 3) Greenplan (2023b); 4) Greenplan (2023c).

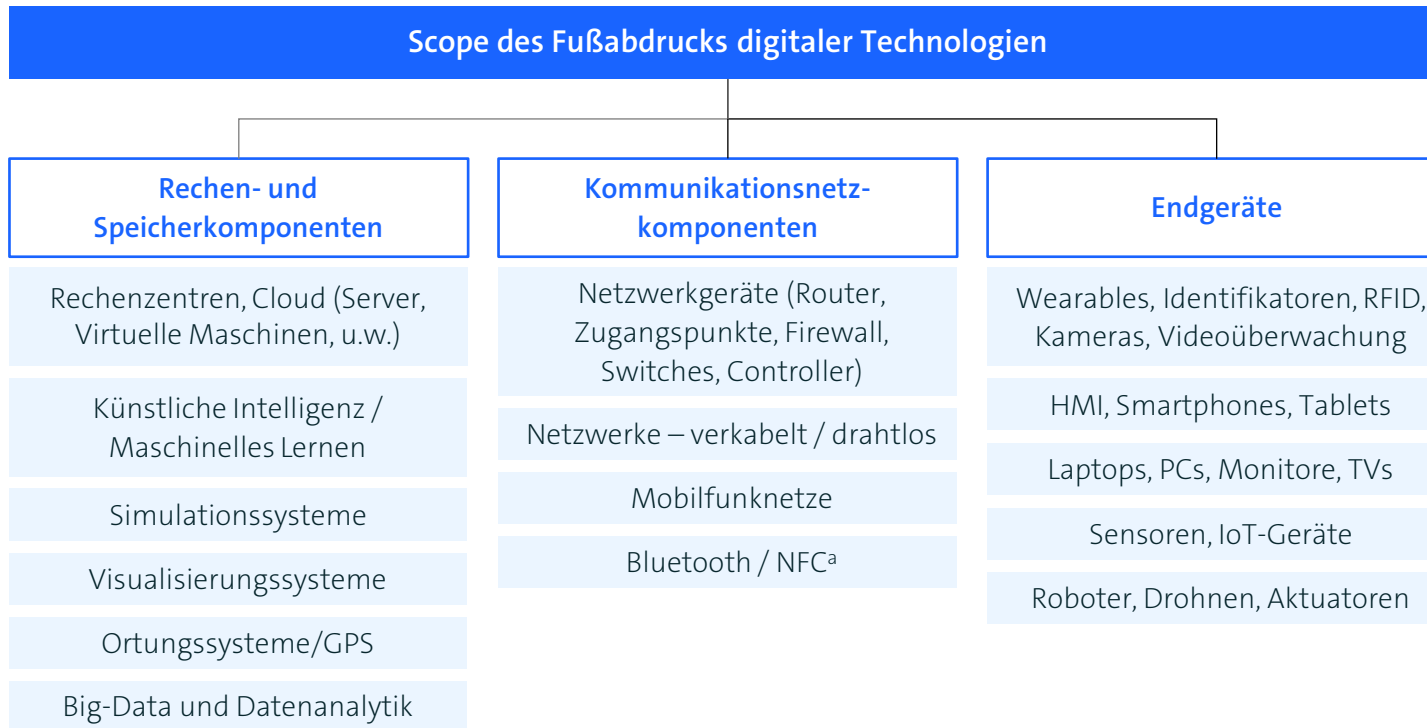
5

Fußabdruck digitaler Technologien



Der Fußabdruck der digitalen Technologien basiert auf Rechen- und Speicherkomponenten, Kommunikationsnetzkomponenten und Endgeräten

Betrachtete IKT^c-Kategorien und -Unterkategorien



Scope des Fußabdrucks

Die nachfolgenden Ausführungen orientieren sich an der aufgeschlüsselten Struktur der IKT^c-Kategorien, die eine klare Differenzierung zwischen Rechen- und Speicher-komponenten, Komponenten der Kommunikationsnetze sowie Endgeräten vorsehen.

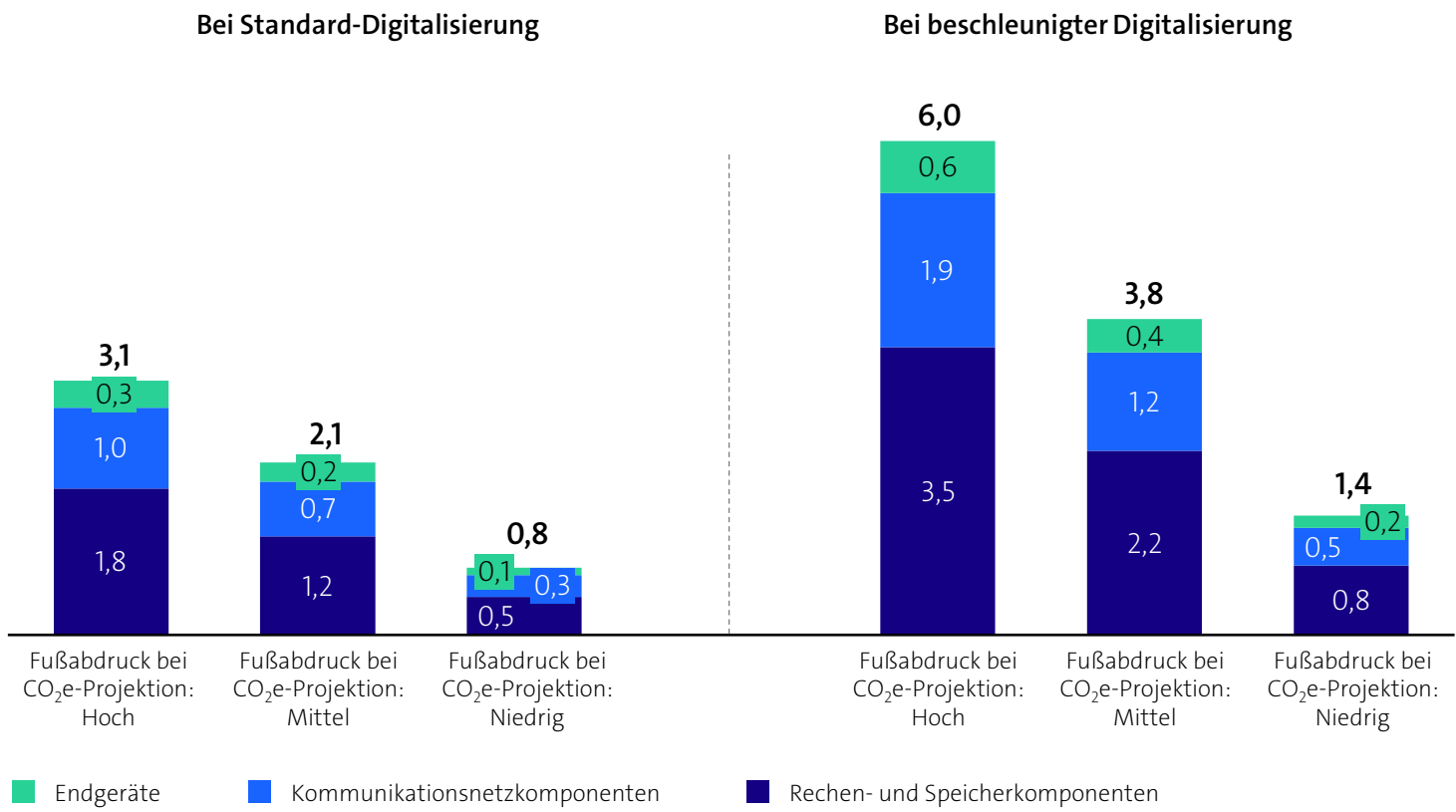
Innerhalb dieser Segmente finden sich insgesamt fünfzehn spezifische Unterkategorien, die als Grundlage für die durchgeführten, anwendungsspezifischen Analysen dienen (bottom-up Ansatz).

Gemessen wurden die CO₂e-Emissionen durch (a) die Nutzung^b digitaler Technologien und (b) darin enthaltene (sogenannte „embodied“) Emissionen durch Herstellung, inkl. Lieferkette sowie durch End-of-Life Behandlung

Im Jahr 2030 werden die untersuchten Anwendungsfälle durch die Nutzung digitaler Technologien voraussichtlich ~2–4 MT CO₂e emittieren

CO₂e-Fußabdruck durch Nutzung digitaler Technologien

[Alle Zahlen in MT CO₂e]



Emissionstreiber in der Nutzungsphase

Die Analyse zeigt, dass der CO₂e-Fußabdruck in der Nutzungsphase digitaler Technologien stark von der Digitalisierungsgeschwindigkeit abhängt.

Im Kontext der beschleunigten Digitalisierung erhöht sich der Ausstoß auf 6,0 MT CO₂e bei hoher CO₂e-Projektion, ein signifikanter Anstieg gegenüber den 3,1 MT CO₂e der Standard-Digitalisierung.

Die Nutzungsphase, oft unterschätzt, erweist sich als kritisch, da insbesondere Rechenzentren und Netzinfrastrukturen immense Mengen an Energie verbrauchen.

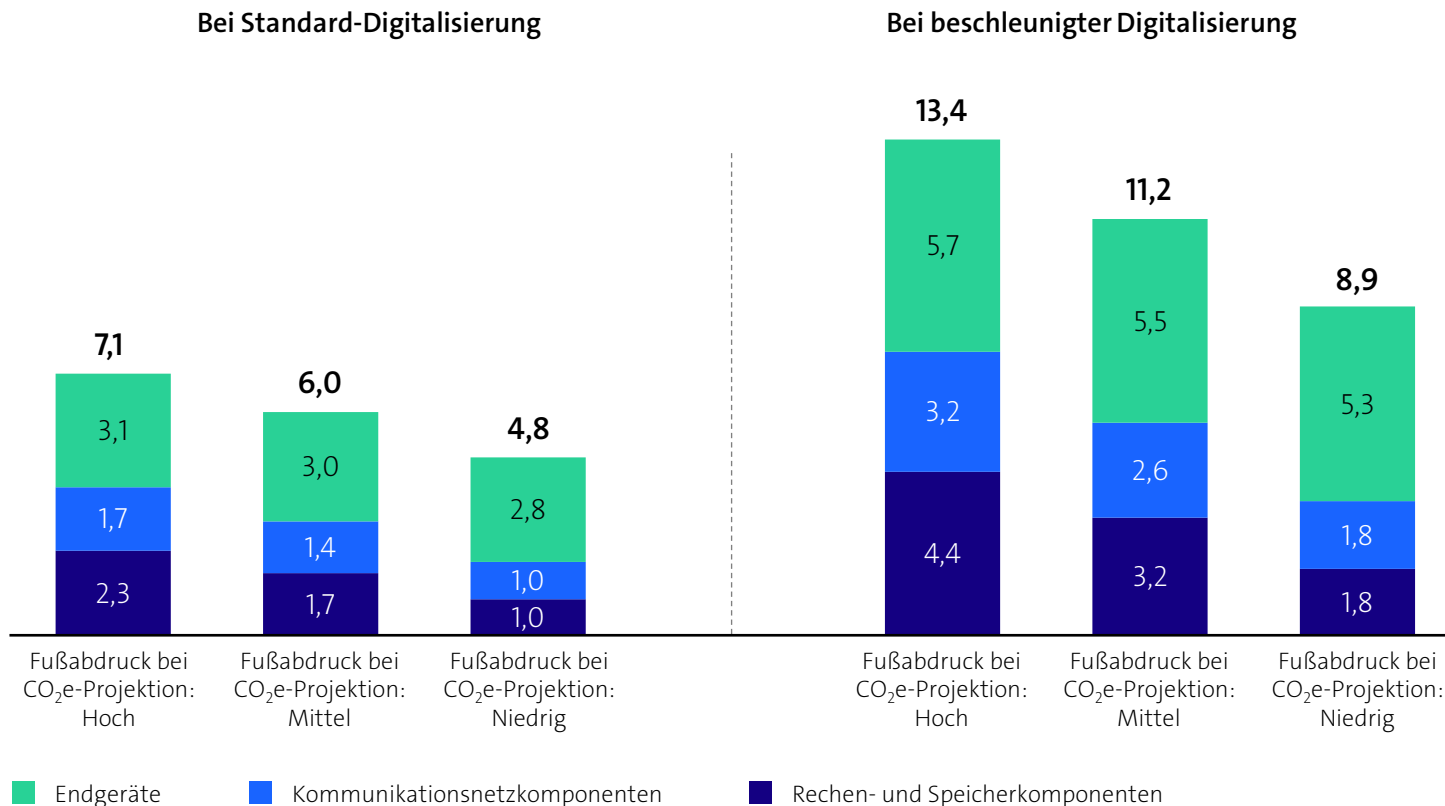
Insbesondere die Rechen- und Speicherkomponenten haben einen überproportionalen Anteil am Gesamtausstoß, was die Bedeutung von Effizienzsteigerungen in diesem Bereich hervorhebt.

Anmerkung: Es handelt sich hierbei um den CO₂e-Fußabdruck der digitalen Technologien in den betrachteten Anwendungsfällen unter Berücksichtigung der erwarteten zusätzlichen Marktdurchdringung zwischen 2023 und 2030 der jeweiligen Anwendungsfälle.^a

Im Jahr 2030 werden die untersuchten Anwendungsfälle durch die Nutzung und Herstellung digitaler Technologien voraussichtlich ~6–11 MT CO₂e emittieren

CO₂e-Fußabdruck durch Nutzung und Herstellung digitaler Technologien

[Alle Zahlen in MT CO₂e]



Vergleich Nutzung vs. Herstellung

Die Analyse zeigt eine Zunahme der CO₂e-Emissionen, wenn die Herstellungsphase mit berücksichtigt wird:

Während die reine Nutzungsphase digitaler Technologien bei beschleunigter Digitalisierung bereits einen CO₂e-Fußabdruck von 6,0 MT CO₂e erreicht (siehe Seite zuvor), wächst dieser Wert unter Einbeziehung der Herstellungsemissionen auf 13,4 MT CO₂e an. Das sind mehr als doppelt so hohe Emissionen.

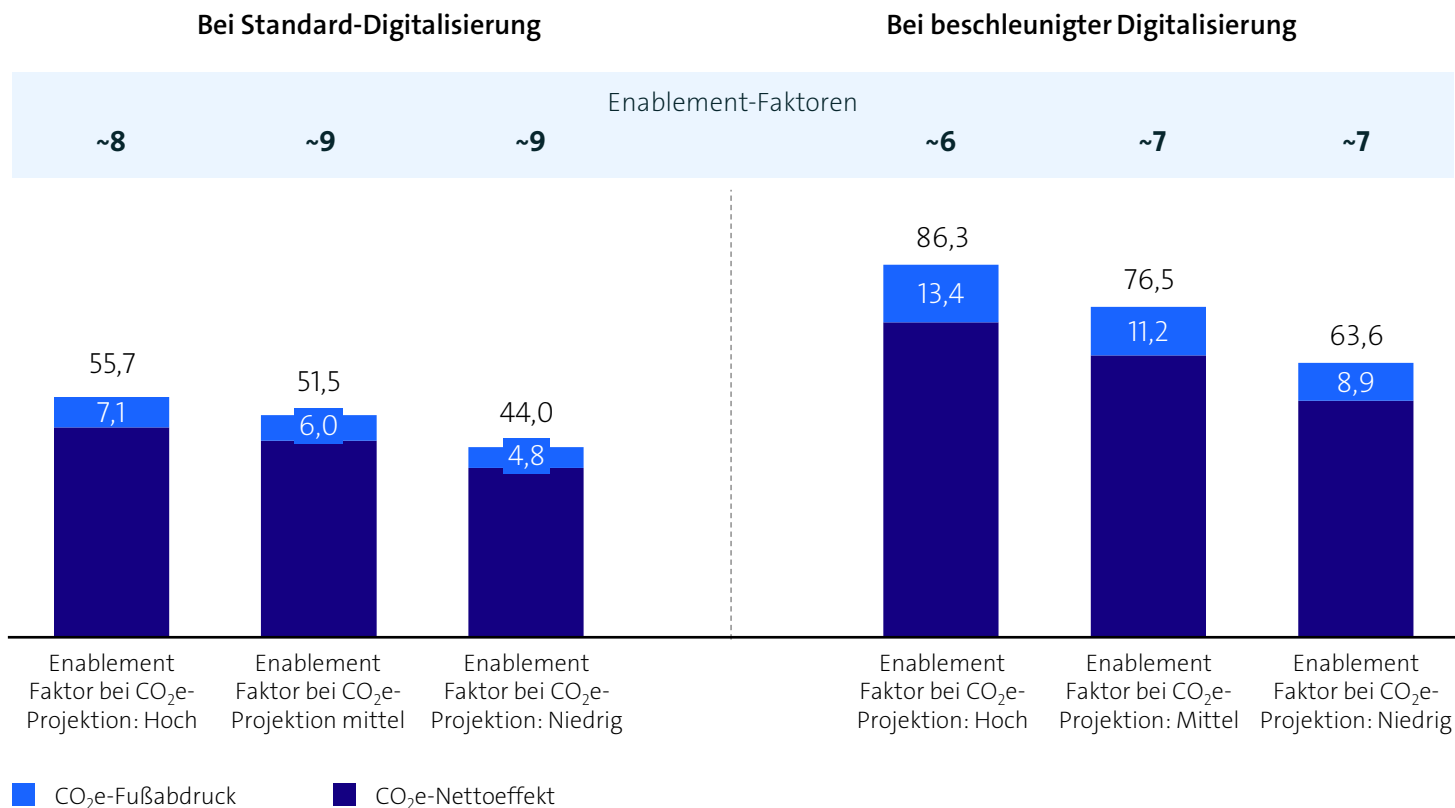
Dies verdeutlicht die Relevanz der globalen Produktionsprozesse von Informations- und Kommunikationstechnologien im Umweltkontext digitaler Lösungen, vor allem von Endgeräten, die in dieser Analyse den Großteil der Emissionen ausmachen.

Anmerkung: Es handelt sich hierbei um den CO₂e-Fußabdruck der digitalen Technologien in den betrachteten Anwendungsfällen unter Berücksichtigung der erwarteten zusätzlichen Marktdurchdringung zwischen 2023 und 2030 der jeweiligen Anwendungsfälle.^a

Der Enablement-Faktor digitaler Technologien liegt im Jahr 2030 zwischen 6 und 9 – abhängig von der CO₂e-Projektion und Digitalisierungsgeschwindigkeit

Enablement-Faktoren durch Nutzung und Herstellung digitaler Technologien

[Alle Zahlen in den Balken in MT CO₂e]



Definition und Kernerkenntnisse

Der Enablement-Faktor misst das Verhältnis zwischen den CO₂e-Einsparungen und dem CO₂e-Fußabdruck digitaler Technologien. Beispiel hohe CO₂e-Projektion und beschleunigte Digitalisierung: $\sim 6 = 86,3/13,4$.

Abhängig von den CO₂e-Projektionen variiert der Enablement-Faktor zwischen 6 und 9. Wenn die Digitalisierung beschleunigt wird, verringern sich die Enablement-Faktoren um ungefähr 18 bis 22% – allerdings auf höherem CO₂e-MT-Niveau.

Bei beiden Digitalisierungsgeschwindigkeiten (Standard und beschleunigt) sind die CO₂e-Einsparungen (Gesamtbalken) deutlich höher als der CO₂e-Fußabdruck (hellblaue Balken).

Zusammengefasst zeigt die Auswertung ein positives Bild: Digitale Technologien haben einen netto-positiven Effekt, d.h. das Potenzial, weit mehr CO₂e-Emissionen einzusparen, als sie durch ihre Nutzung und Herstellung verursachen.

Anmerkung: Es handelt sich hierbei um den CO₂e-Fußabdruck der digitalen Technologien in den betrachteten Anwendungsfällen unter Berücksichtigung der erwarteten zusätzlichen Marktdurchdringung zwischen 2023 und 2030 der jeweiligen Anwendungsfälle.^a

6

Rebound-Effekte



Rebound-Effekte treten auf, wenn durch Effizienzsteigerungen die Nachfrage oder Nutzung steigt, wodurch das volle Einsparpotenzial nicht ausgeschöpft wird

Definition

»Von Rebound-Effekten bei Effizienzsteigerungen spricht man, wenn die Effizienzsteigerung eine vermehrte Nachfrage bzw. Nutzung bewirkt und dadurch die möglichen Einsparungen beim Einsatz von Ressourcen nicht voll ausgeschöpft werden.«¹

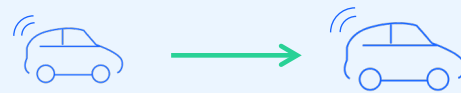
Literaturüberblick

Da Rebound-Effekte Länder-, Sektor- und Technologie-spezifisch sind, gestaltet sich eine genaue Berechnung sehr schwierig. Dies zeigt sich auch in der großen Heterogenität von Studien, die eine Bandbreite von 4–37% für die durch Rebound-Effekte verursachte Reduzierung der Effizienzpotenziale aufweisen.^{2,3}

Direkte Rebound-Effekte

Geringere Nutzungskosten erhöhen den Verbrauch desselben Gutes oder derselben Dienstleistung.

Beispiel: Beim Erwerb eines Autos mit einem effizienteren Motor, entscheidet sich Person x für ein größeres Auto oder nutzt das effizientere Auto mehr als das vorherige.



Indirekte Rebound-Effekte

Geringere Nutzungskosten erhöhen den Verbrauch anderer Güter und Dienstleistungen.

Beispiel: Da Person x nun ein effizienteres Auto fährt und Geld eingespart hat, reist sie im nächsten Urlaub mit dem Flugzeug statt mit dem Zug oder Auto.



Wirtschaftsweite Rebound-Effekte

Sinkende Energiepreise bewirken eine Preissenkung für Zwischen- und Endprodukte, wodurch sich Produktions- und Konsummuster ändern.

Beispiel: Die steigende Nachfrage nach effizienten Autos führt zu einer kostengünstigeren Produktion. Die gesunkenen Autopreise führen zu einem Anstieg der Nachfrage.

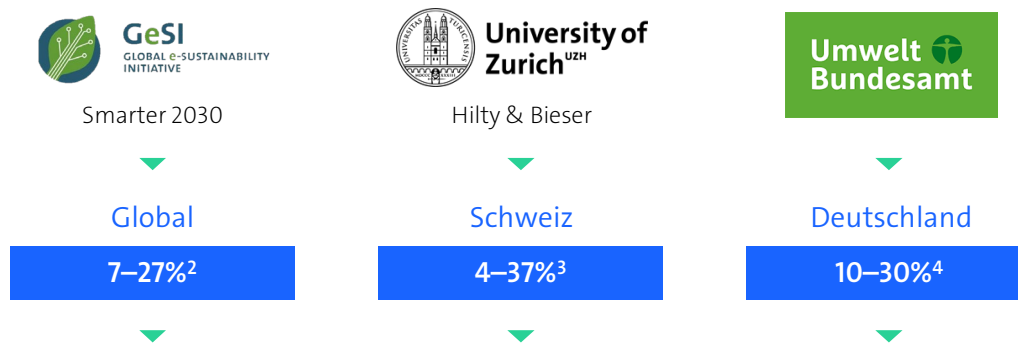


Das Quantifizieren von Rebound-Effekten ist komplex – und die Ergebnisse verschiedener Publikationen weisen große Spannweiten auf

Die Quantifizierung von Rebound-Effekten ist komplex

Rebound-Effekte werden selbst von einer Vielzahl zusätzlicher Faktoren beeinflusst, einschließlich Verhaltens- und Systemreaktionen, so dass es schwierig ist, ihre Auswirkungen genau zu isolieren und zu quantifizieren.¹

Studien weisen in ihren Berechnungen eine große Spannweite möglicher Rebound-Effekte auf



Verringerung des Einsparpotenzials durch neue Technologien aufgrund direkter, indirekter oder gesamtwirtschaftlicher Rebound-Effekte.

Inhalte der relevanten Studien

- **Sieben Anwendungsbereiche** – Die Studien berechnen Rebound-Effekte bei Effizienzgewinnen in sieben Anwendungsbereichen. Beispiel: Hilty & Bieser kommen zu dem Ergebnis, dass E-Commerce, E-Health und E-Work die höchsten Rebound-Effekte erzeugen, während die Smarter 2030 Studie E-Commerce und E-Health die niedrigsten Rebound-Effekte, aber dafür E-Work und Logistik die höchsten Rebound-Effekte zuschreibt.
- **Geographie** – die Smarter 2030 Studie berechnet Rebound-Effekte global, Hilty & Bieser für die Schweiz und die Metastudie des Umweltbundesamtes für Deutschland.

Schwachstellen der Studien

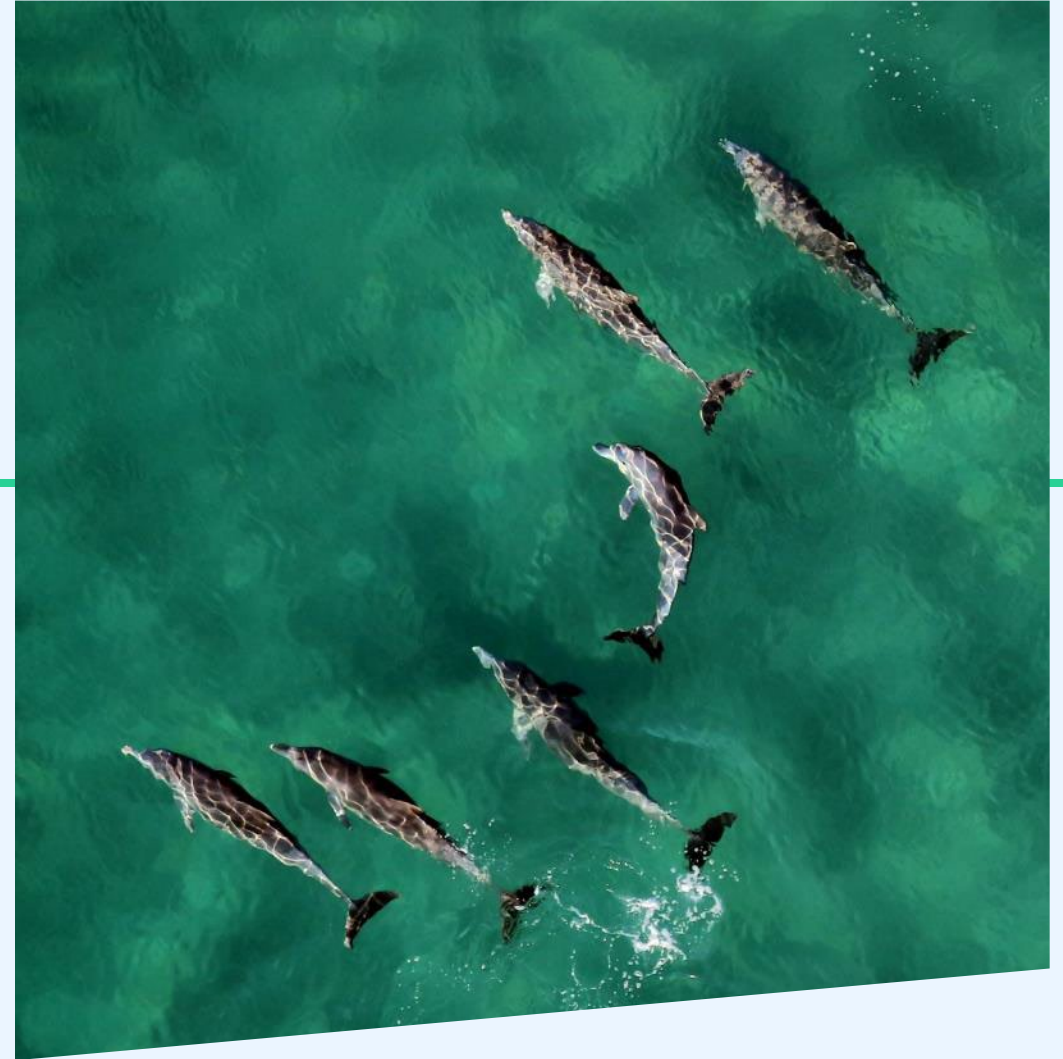
- **Annahmenbasierte Berechnung:** Der Ansatz, insbesondere bei indirekten Rebound-Effekten, basiert weitgehend auf Annahmen statt Fakten.
- **Mangelnde Transparenz der Berechnung:** Die berücksichtigten Technologien wurden nicht transparent dargestellt.
- **Heterogene Ergebnisse:** Die Spannweite der Rebound-Effekte zwischen den Studien ist sehr groß, abhängig von Geographie und Umfang.

Relevanz für diese Studie

Aufgrund der beschriebenen Komplexität und Breite der Spannweite erfolgt in dieser Studie keine Berechnung der Rebound-Effekte.

7

Projektlenkung und Projektteam



Projektlenkung und Projektteam

Projektlenkung



Fabian Zacharias
Leiter Public Affairs
Bitkom e.V.



Niklas Meyer-Breitkreutz
Bereichsleiter
Nachhaltigkeit &
Umwelt
Bitkom e.V.
Ansprechpartner



Alexander Holst
Managing Director
Sustainability
Accenture Strategy &
Consulting



Boris von Chlebowski
Mitglied der
Geschäftsführung
Accenture



Balkan Cetinkaya
Principal Director
Sustainability
Accenture Strategy

Projektteam



Lea Schoppe
Sustainability
Consultant
Accenture Strategy



Jamie Sommer
Sustainability
Consultant
Accenture Strategy



Jonas Strunk
Sustainability
Consultant
Accenture Strategy



Maximilian Krempel
Sustainability
Consultant
Accenture Strategy



Patrick Grimm
Sustainability
Consultant
Accenture Strategy

Fachexperten Accenture:

- Akshay Kasera (ICT-Fußabdruck)
- Balkan Cetinkaya (Güterverkehr)
- Eike Haas (Landwirtschaft)
- Jonas Schwaben (Energiesektor)
- Jürgen Bartz (Gebäudesektor)
- Michal Stachera (Energiesektor)
- Ria Chopra (ICT-Fußabdruck)
- Sayali Karekar (ICT-Fußabdruck)
- Tomek Stec (Energiesektor)
- Yasar Mert (Güterverkehr)

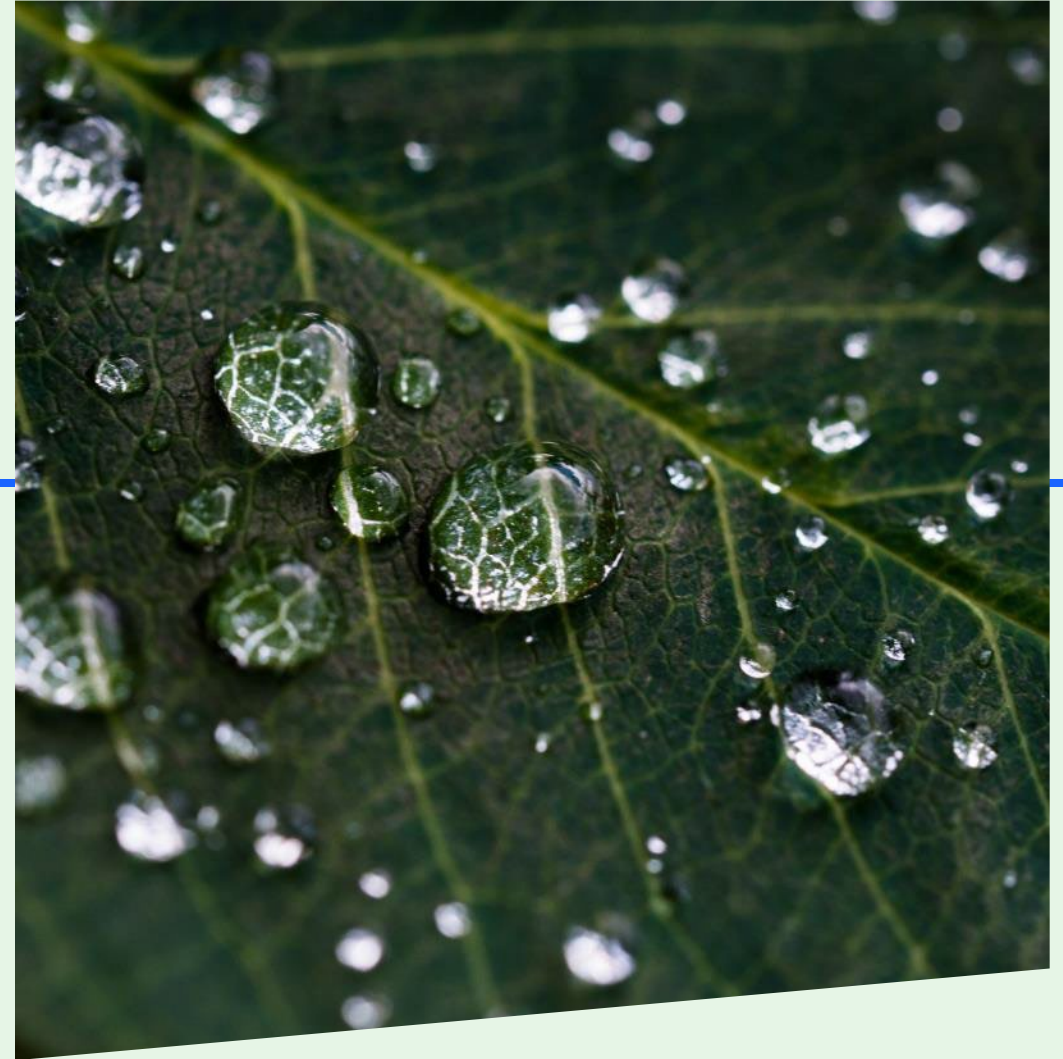
Erweitertes Accenture Projektteam:

- Anna-Laura Bonk
- Jette Ohlert
- Katharina Ent
- Manuel Simon

8

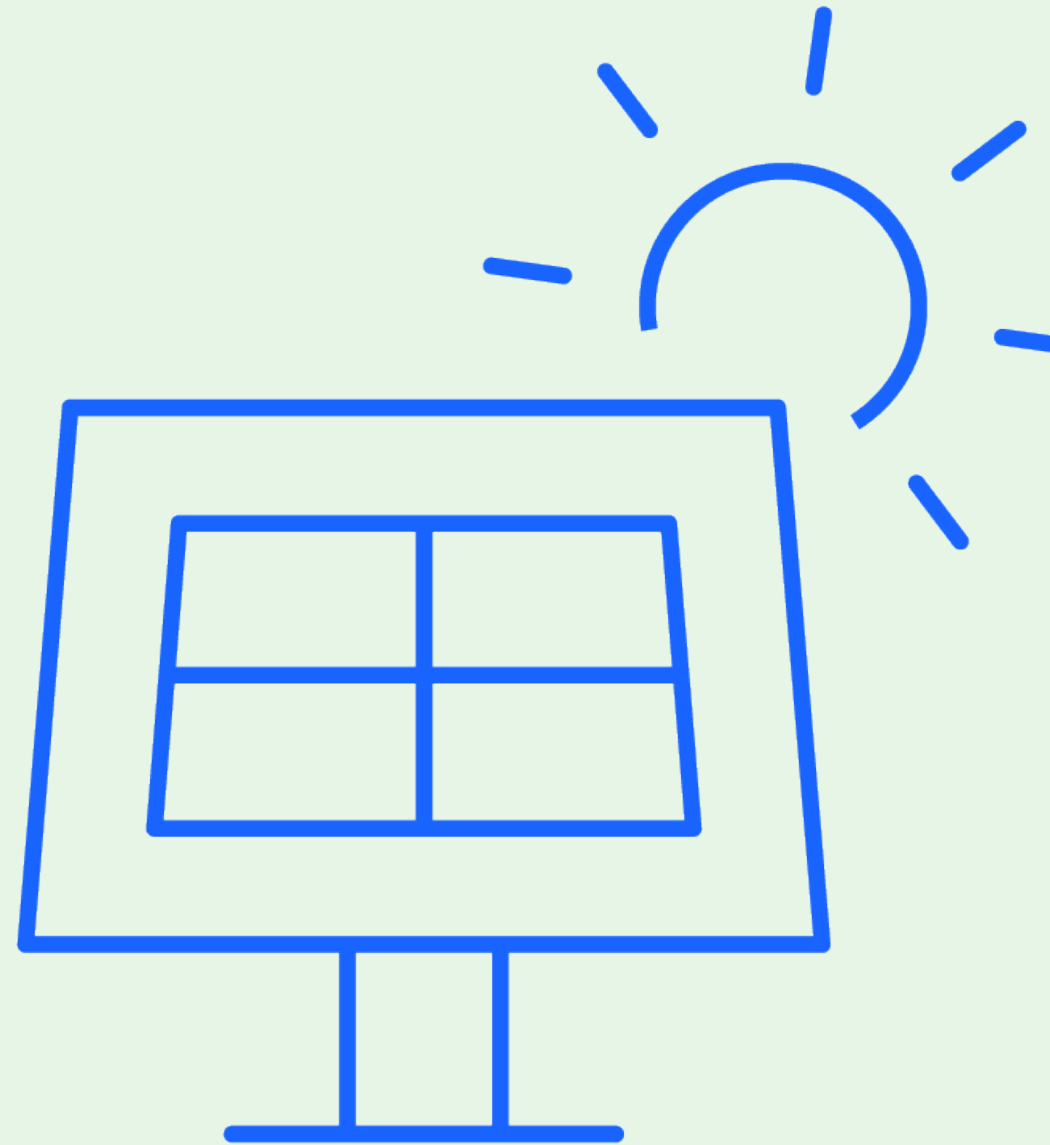
Anhang: Annahmen & Quellen

1. Energie
2. Gebäude
3. Industrie
4. Landwirtschaft
5. Verkehr
6. Fußabdruck der digitalen Technologien
7. Quellenverzeichnis



8.1

Energie



Ergebnisübersicht

CO ₂ e-Projektion und Digitalisierungsgeschwindigkeit	Anwendungsfall	CO ₂ e-Projektion 2030	CO ₂ e-Einsparpotenzial (brutto)	CO ₂ e-Einsparpotenzial (netto)	Rel. netto CO ₂ e-Einsparpotenzial (vs. Projektion)	Rel. netto CO ₂ e-Einsparpotenzial (vs. Klimalücke)	CO ₂ e-Fußabdruck der Technologie	Spezifisches Reduktionspotenzial	Marktdurchdringung 2023	Marktdurchdringung 2030	
					In Prozent	In Prozent	In MT CO ₂ e	In Prozent	In Prozent	In Prozent	
CO ₂ e-Projektion: Hoch	Standard Digitalisierung	Gesamt	279,02	19,65	19,07	6,8%	6,2%	0,58			
		Smart Grids	279,02	12,24	11,86	4,3%	3,9%	0,38	10,9%	0,6%	41%
		Smarte Produktion EE	279,02	7,41	7,21	2,6%	2,3%	0,20	4,7%	25%	81%
	Beschleunigte Digitalisierung	Gesamt	279,02	21,15	20,52	7,4%	6,7%	0,63			
		Smart Grids	279,02	13,15	12,74	4,6%	4,1%	0,41	10,9%	0,6%	44%
		Smarte Produktion EE	279,02	8,00	7,78	2,8%	2,5%	0,22	4,7%	25%	86%
CO ₂ e-Projektion: Mittel	Standard Digitalisierung	Gesamt	169,96	25,05	24,51	14,4%	8,0%	0,54			
		Smart Grids	169,96	16,77	16,39	9,6%	5,3%	0,38	24,4%	0,6%	41%
		Smarte Produktion EE	169,96	8,28	8,12	4,8%	2,6%	0,16	8,7%	25%	81%
	Beschleunigte Digitalisierung	Gesamt	169,96	26,96	26,38	15,5%	8,6%	0,58			
		Smart Grids	169,96	18,02	17,62	10,4%	5,7%	0,40	24,4%	0,6%	44%
		Smarte Produktion EE	169,96	8,94	8,76	5,2%	2,8%	0,18	8,6%	25%	86%
CO ₂ e-Projektion: Niedrig	Standard Digitalisierung	Gesamt	60,91	25,25	24,99	41,0%	8,1%	0,26			
		Smart Grids	60,91	17,49	17,30	28,4%	5,6%	0,19	71,1%	0,6%	41%
		Smarte Produktion EE	60,91	7,76	7,69	12,6%	2,5%	0,07	22,8%	25%	81%
	Beschleunigte Digitalisierung	Gesamt	60,91	27,16	26,88	44,1%	8,7%	0,28			
		Smart Grids	60,91	18,78	18,58	30,5%	6,0%	0,20	71,0%	0,6%	44%
		Smarte Produktion EE	60,91	8,38	8,30	13,6%	2,7%	0,08	22,6%	25%	86%

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

1. Smart Grids (1/2)

CO₂e-Projektionen

Die Prognosen für die Emissionen der Bruttostromerzeugung im Jahr 2030 wurden anhand von drei CO₂e-Projektionen erstellt, in denen der Bruttostromverbrauch für Deutschland in 2030 konstant bei 660,6 TWh gehalten¹, dieser aber mit sich unterscheidenden spezifischen Stromemissionsfaktoren multipliziert wurde.

- Hohe CO₂e-Projektion: Als Stromemissionsfaktor wurden 422,37 g/kWh gewählt, basierend auf der Annahme, dass sich dieser in demselben Maße verbessert, wie es in den letzten fünf Jahren beobachtet wurde.²
- Mittlere CO₂e-Projektion: Als Stromemissionsfaktor wurden 257,29 g/kWh gewählt (Mittelwert der Stromemissionsfaktoren der hohen und niedrigen CO₂e-Projektionen), um einen moderaten Ausbau klimafreundlicher Energieträger zu simulieren.
- Niedrige CO₂e-Projektion: Als Stromemissionsfaktor wurden 92,20 g/kWh gewählt, basierend auf dem Projektionsbericht 2023^a für Deutschland und einem 85% Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch in 2030.¹

CO₂e-Einsparpotenziale

Das CO₂e-Einsparpotenzial basiert auf der Menge des Strombedarfs, die Smart Grids durch ihre Potenziale in der Lastverschiebung, flexibel dem Angebot der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien anpassen können. Dabei wurden ausschließlich die Lastverschiebung pro Jahr in TWh, und nicht die Lastabschaltung oder Lasterhöhung betrachtet. Für die drei verschiedenen CO₂e-Projektionen wurden jeweils ein Wert für die maximal mögliche Lastverschiebung berechnet, da ein höherer Anteil an erneuerbaren Energien im Stromnetz auch eine höhere Lastverschiebung zur Folge hat, wenn man die Lastverschiebungspotenziale der Smart Grids vollends ausnutzt.³

Unter der Annahme, dass mit jeder TWh an realisiertem Lastverschiebungspotenzial eine TWh weniger Strom aus Kohle und Gas produziert werden muss, wurden die Lastverschiebungspotenziale der drei CO₂e-Projektionen mit dem entsprechenden spezifischen Emissionsfaktor einer eingesparten TWh multipliziert.⁴ Dieser entspricht der Differenz der Emissionsfaktoren von Strom aus fossilen Energieträgern und Strom aus erneuerbaren Energieträgern und unterscheidet sich für die drei CO₂e-Projektionen, da die Emissionsfaktoren der Energieträger mit ihren – je nach Emissionsprojektion – unterschiedlichen Stromerzeugungsmengen gewichtet wurden.^{1,4}

Aus der Multiplikation von Lastverschiebungspotenzial, dem Emissionsfaktor einer eingesparten TWh Strom und dem Marktdurchdringungsdelta ergibt sich für jede CO₂e-Projektion das CO₂e-Einsparpotenzial. Das Marktdurchdringungsdelta ist die Differenz der Marktdurchdringung 2030 und Marktdurchdringung 2023.

Beispielhaft für die mittlere CO₂e-Projektion und die beschleunigte Digitalisierung: CO₂e-Einsparpotenzial = 18,02 MT CO₂e = 65,9 TWh x 0,63 MT CO₂e/TWh x (44,0% – 0,6%).^b

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

1. Smart Grids (2/2)

Reduktionspotenziale

Die Reduktionspotenziale wurden auf Basis der errechneten CO₂e-Einsparpotenziale sowie der CO₂e-Projektionen und Marktdurchdringungsdelta für alle drei CO₂e-Projektionen ermittelt. Das Reduktionspotenzial ergibt sich aus dem CO₂e-Einsparpotenzial dividiert durch CO₂e-Projektion und Marktdurchdringungsdelta. Das Marktdurchdringungsdelta ist die Differenz der Marktdurchdringung 2030 und Marktdurchdringung 2023.

Beispielhaft für die mittlere CO₂e-Projektion und der beschleunigten Digitalisierung: Reduktionspotenzial = 24,4% = 18,02 MT CO₂e / (170 MT CO₂e x (44,0% – 0,6%)).

Marktdurchdringungsraten

Die Marktdurchdringung ist definiert als der Prozentsatz der Stromverbraucher, die intelligente Messsysteme einsetzen und über einen dynamischen Tarif verfügen, der die Mindestkriterien für die Teilnahme am intelligenten Netz erfüllt.

- **2023:** Die Anzahl der tatsächlich installierten intelligenten Zähler und der Nutzer dynamischer Tarife zu Beginn des Jahres 2023¹, ergänzt um die geschätzte Anzahl der installierten intelligenten Zähler und der Anschlüsse für dynamische Tarife bis Ende des Jahres 2023.
- **2030 Standard:** Um die Marktdurchdringung für 2030 zu kalkulieren, wurde primär das im April 2023 beschlossene Gesetz „Neustart der Digitalisierung der Energiewende“ herangezogen.² Das Gesetz setzt den Rahmen für den gesetzlichen Smart-Meter-Rolloutfahrplan³ (und fordert die beschleunigte Einführung von dynamischen Stromtarifen). Folgende Rolloutparameter wurden wie folgt herangezogen: (1) 95% der Verbraucher ab 6000–100.000 kWh/Jahr + (2) 50% der Verbraucher über 100.000 kWh/Jahr + (3) 95% der Erzeuger von 7–100 kW installierter Leistung + (4) 50% der

Erzeuger über 100 kW installierter Leistung + (5) 100% des Pflichtrollouts gemäß §14a EnWG für Wärmepumpen, Heimspeichersysteme und private Ladestationen + (6) 15% der Verbraucher (unter 6.000 kWh/Jahr) und Erzeuger (1–7 kW installierter Leistung), die unter den “optionalen Rollout” fallen.³

Zusätzlich zu diesem Hochlauf wurde zwischen der Verfügbarkeit und tatsächlichen Nutzung dynamischer Stromtarife unterschieden. Es wird angenommen, dass nicht jeder Verbraucher und Erzeuger mit einem intelligenten Messsystem auch tatsächlich einen dynamischen Tarif abschließt. Es wurde eine Tarifierung von 60% angenommen.⁴

- **2030 Beschleunigt:** Die beschleunigte Marktdurchdringung basiert ebenfalls auf dem im April 2023 beschlossenen Gesetz „Neustart der Digitalisierung der Energiewende“, sowie dem gesetzlichen Smart-Meter-Rolloutfahrplan.^{2,3} Die Berechnungslogik ist dieselbe wie bei der Standard-Digitalisierung. Für die beschleunigte Digitalisierung wurde angenommen, dass es möglich ist, die o.g. Ausbaugeschwindigkeit vom heutigen Zeitpunkt bis zum Jahr 2030, um ca. 5% zu beschleunigen. So könnten bis zum Jahr 2030 die Ziele des Smart-Meter-Rolloutfahrplans um ca. vier Monate gegenüber dem eigentlichen Zeitplan vorgezogen werden. Es würden also zusätzlich die ersten vier Monate des Smart Meter Rollouts im Jahr 2031 in der beschleunigten Marktdurchdringung berücksichtigt werden. Da die Ausbaugeschwindigkeit ab dem Jahr 2031 gesteigert werden soll, resultiert der um ca. 5% beschleunigte Smart-Meter-Rollout in einer erhöhten Marktdurchdringung von 44% im Jahr 2030.

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

2. Smarte Erzeugung erneuerbare Energien (1/2)

CO₂e-Projektionen

Die Prognosen für die Emissionen der Bruttostromerzeugung im Jahr 2030 wurden anhand von drei CO₂e-Projektionen erstellt, in denen der Bruttostromverbrauch für Deutschland in 2030 konstant bei 660,6 TWh gehalten¹, dieser aber mit sich unterscheidenden spezifischen Stromemissionsfaktoren multipliziert wurde.

- Hohe CO₂e-Projektion: Als Stromemissionsfaktor wurden 422,37 g/kWh gewählt, basierend auf der Annahme, dass sich dieser in demselben Maße verbessert, wie es in den letzten fünf Jahren beobachtet wurde.²
- Mittlere CO₂e-Projektion: Als Stromemissionsfaktor wurden 257,29 g/kWh gewählt (Mittelwert der Stromemissionsfaktoren der hohen und niedrigen CO₂e-Projektionen), um einen moderaten Ausbau klimafreundlicher Energieträger zu simulieren.
- Niedrige CO₂e-Projektion: Als Stromemissionsfaktor wurden 92,20 g/kWh gewählt, basierend auf dem Projektionsbericht 2023^a für Deutschland und einem 85% Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch in 2030.¹

CO₂e-Einsparpotenziale

Das CO₂e-Einsparpotenzial basiert auf der Strommenge, die durch die Effizienzsteigerung der digitalen Technologien in Wind- und Solarparks zusätzlich realisiert werden können. Diese bestehen aus der Optimierung im laufenden Betrieb (z.B.: dem verbesserten Nachstellen der Rotorblätter) bei Windkraftanlagen und der Steigerung der Verfügbarkeit (prädiktive Wartung) bei Windkraft- und Solaranlagen.^{3,4,5} Die prozentualen Effizienzsteigerungen wurden mit den unterschiedlichen jährlichen Strommengen aus Wind und Solar der drei unterschiedlichen CO₂e-Projektionen multipliziert, da ein höherer Anteil an erneuerbaren Energien im Stromnetz auch eine höhere zusätzlich realisierbare

Strommenge zur Folge hat.¹ Unter der Annahme, dass mit jeder TWh an zusätzlich realisiertem Strom eine TWh weniger Strom aus Kohle und Gas produziert werden muss, wurden die zusätzlich realisierbaren Strommengen der drei CO₂e-Projektionen mit dem entsprechenden spezifischen Emissionsfaktor einer eingesparten TWh multipliziert.⁶ Dieser entspricht der Differenz der Emissionsfaktoren von Strom aus fossilen Energieträgern und Strom aus erneuerbaren Energieträgern und unterscheidet sich für die drei CO₂e-Projektionen, da die Emissionsfaktoren der Energieträger mit ihren – je nach CO₂e-Projektion – unterschiedlichen Stromerzeugungsmengen gewichtet wurden.^{1,6} Hier treten zwei gegenläufige Effekte ein, die sich zum Teil aufheben: Der Ausbau von Wind und Solar nehmen in einem ähnlichen Maße zu, wie die Differenz der Emissionsfaktoren im Laufe der Energiewende abnimmt. Grund dafür ist die Verschiebung von Strom aus Kohle zu weniger schmutzigem Strom aus Gas im fossilen Anteil der Stromproduktion.

Aus der Multiplikation des zusätzlich realisierbaren Stroms, dem Emissionsfaktor einer eingesparten TWh Strom und dem Marktdurchdringungsdelta ergibt sich für jede CO₂e-Projektion das CO₂e-Einsparpotenzial. Das Marktdurchdringungsdelta ist die Differenz der Marktdurchdringung 2030 und Marktdurchdringung 2023.

Beispielhaft für die mittlere CO₂e-Projektion und die beschleunigte Marktdurchdringungsrate:

$$\text{CO}_2\text{e-Einsparpotenzial} = 8,9 \text{ MT CO}_2\text{e} = 23,36 \text{ TWh} \times 0,63 \text{ MT CO}_2\text{e/TWh} \times (86\% - 25\%).^a$$

Anmerkung: a) Zur besseren Lesbarkeit wurden gerundete Werte verwendet.

Quellen: 1) UBA (2023i); 2) UBA (2023f); 3) Chandler (2022); 4) Wind Europe (2021); 5) Betti et al. (2019); 6) IPCC (2014).

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

2. Smarte Erzeugung erneuerbare Energien (2/2)

Reduktionspotenziale

Die Reduktionspotenziale wurden auf Basis der errechneten CO₂e-Einsparpotenziale sowie der CO₂e-Projektionen und Marktdurchdringungsdelta für alle drei CO₂e-Projektionen ermittelt.

Das Reduktionspotenzial ergibt sich aus dem CO₂e-Einsparpotenzial dividiert durch CO₂e-Projektion und Marktdurchdringungsdelta. Das Marktdurchdringungsdelta ist die Differenz der Marktdurchdringung 2030 und Marktdurchdringung 2023.

Beispielhaft für die mittlere CO₂e-Projektion und die beschleunigte Marktdurchdringungsrate: Reduktionspotenzial = 8,6% = 8,9 MT CO₂e / (170 MT CO₂e x (86% – 25%)).^a

Marktdurchdringungsraten

Die Marktdurchdringung wird als Prozentsatz der Unternehmen der Energieindustrie definiert, die digitale Zwillinge heutzutage anwenden bzw. der Prozentsatz der Windkraft- und Solaranlagen, die im Jahr 2030 die digitalen Technologien zur Effizienzsteigerung implementiert haben.

- **2023:** Als Marktdurchdringung wurde der Prozentsatz der Unternehmen in der Energie- und Versorgungsindustrie definiert, die Technologien zur Effizienzsteigerung implementiert haben. Es wurde die Marktdurchdringung des digitalen Zwillings in der Energie- und Versorgungsindustrie stellvertretend als Indikator für die Marktdurchdringung der betrachteten Technologien zur smarten Erzeugung erneuerbarer Energien herangezogen. Diese Herleitung unterliegt der Annahme, dass die Auswirkungen beider digitalen Technologien vergleichbar sind:

Wie bei der smarten Erzeugung erneuerbarer Energien, weisen auch die Unternehmen der zugrundeliegenden Studie auf die Reduktion von Kosten und Fehlern, der Steigerung von Effizienzen sowie der Vorhersage und Optimierung von Leistungsmerkmalen hin¹, nachdem der digitale Zwilling implementiert wurde.

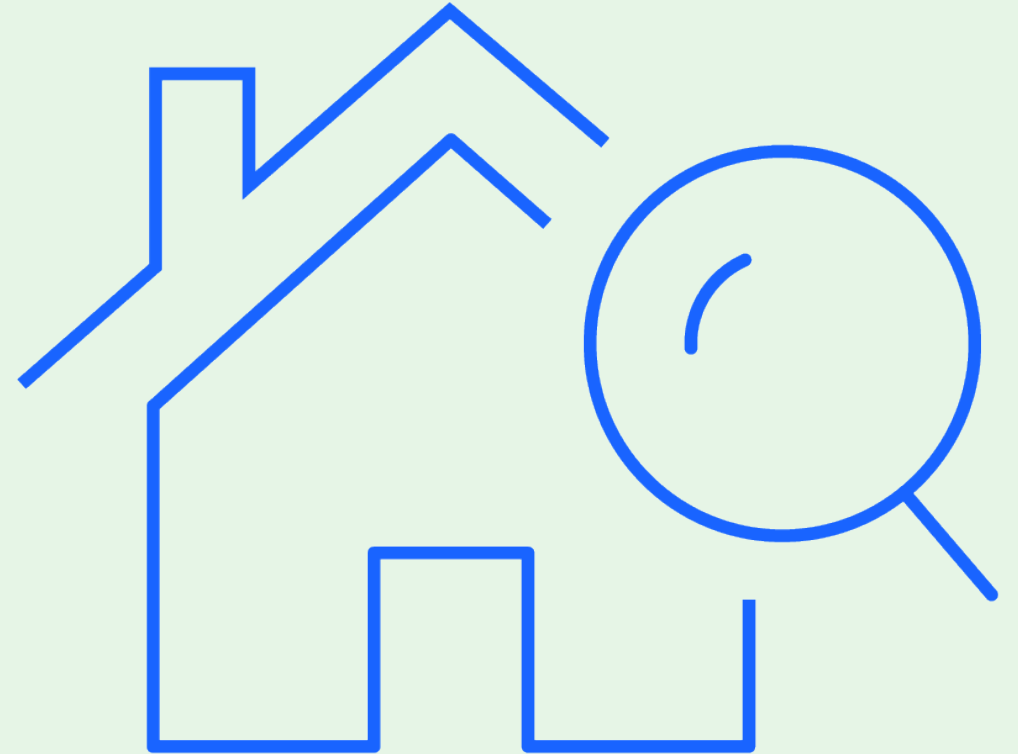
- **2030 Standard:** Um die Marktdurchdringung für 2030 zu kalkulieren, wurde der Prozentsatz der Windkraft- sowie Solaranlagen berechnet, die im Jahr 2030 auf einfache Weise mit den digitalen Technologien zur Effizienzsteigerung nachgerüstet werden können. Die Kalkulation basiert auf der Annahme, dass dies alle Anlagen einschließt, die nach 2015 errichtet wurden bzw. bis 2030 neu errichtet werden, sowie alle Anlagen, die vor 2015 gebaut, aber bis 2030 erneuert werden.^{2,3} Für diese Berechnung wurden die Lebensdauer von Windkraft- sowie Solaranlagen und der intensive Ausbau der Windkraft- sowie Solaranlagen bis 2030 mit einbezogen.^{3,4,5} Es wurde die Annahme getroffen, dass 90% der Anlagen, die auf einfache Weise mit den digitalen Technologien zur Effizienzsteigerung nachgerüstet werden können, bis 2030 auch tatsächlich nachgerüstet wurden.
- **2030 Beschleunigt:** Für die beschleunigte Digitalisierung wird eine schnellere Marktdurchdringung der in den Studien vorgestellten Technologien erwartet. Als Datengrundlage dienen dieselben Publikationen und Berechnungsmethoden, die für die Standard-Marktdurchdringungsrate herangezogen wurden.¹⁻⁵ Dabei wurde angenommen, dass 95% der Anlagen, die auf einfache Weise mit den digitalen Technologien zur Effizienzsteigerung nachgerüstet werden können, bis 2030 auch tatsächlich nachgerüstet wurden, um die rasche und fortschrittliche Integration dieser Technologien eindrücklich zu veranschaulichen.

Anmerkung: a) Zur besseren Lesbarkeit wurden gerundete Werte verwendet.

Quellen: 1) Dreger (2021); 2) Fraunhofer ISE (2016); 3) UBA (2023i); 4) Ingram (2020); 5) NREL (2017b).

8.2

Gebäude



Zusammenfassung der Anwendungsfälle

CO ₂ e-Projektion und Digitalisierungsgeschwindigkeit	Anwendungsfall	CO ₂ e-Projektion 2030	CO ₂ e-Einsparpotenzial (brutto)	CO ₂ e-Einsparpotenzial (netto)	Rel. netto CO ₂ e-Einsparpotenzial (vs. Projektion)	Rel. netto CO ₂ e-Einsparpotenzial (vs. Klimalücke)	CO ₂ e-Fußabdruck der Technologie	Spezifisches Reduktionspotenzial	Marktdurchdringung 2023	Marktdurchdringung 2030	
		In MT	In MT	In MT	In Prozent	In Prozent	In MT CO ₂ e	In Prozent	In Prozent	In Prozent	
CO ₂ e-Projektion: Hoch	Standard Digitalisierung	Gesamt	219,28	20,50	19,68	9,0%	6,4%	0,83			
		Smart Homes	109,03	9,84	9,51	8,7%	3,1%	0,32	4% - 37%	12%	49%
		Vernetzte Gebäude	110,26	10,67	10,16	9,2%	3,3%	0,50	1% - 40%	34%	60%
	Beschleunigte Digitalisierung	Gesamt	219,28	30,51	29,09	13,3%	9,4%	1,42			
		Smart Homes	109,03	13,36	12,89	11,8%	4,2%	0,46	4% - 37%	12%	65%
		Vernetzte Gebäude	110,26	17,15	16,19	14,7%	5,3%	0,96	1% - 40%	34%	83%
CO ₂ e-Projektion: Mittel	Standard Digitalisierung	Gesamt	152,88	12,88	12,39	8,1%	4,0%	0,49			
		Smart Homes	83,83	7,19	6,99	8,3%	2,3%	0,20	4% - 37%	12%	49%
		Vernetzte Gebäude	69,05	5,69	5,40	7,8%	1,8%	0,29	1% - 40%	34%	60%
	Beschleunigte Digitalisierung	Gesamt	152,88	19,18	18,34	12,0%	6,0%	0,84			
		Smart Homes	83,83	9,94	9,65	11,5%	3,1%	0,29	4% - 37%	12%	65%
		Vernetzte Gebäude	69,05	9,24	8,69	12,6%	2,8%	0,55	1% - 40%	34%	83%
CO ₂ e-Projektion: Niedrig	Standard Digitalisierung	Gesamt	99,50	7,23	7,05	7,1%	2,3%	0,17			
		Smart Homes	61,10	5,06	4,98	8,2%	1,6%	0,07	4% - 37%	12%	49%
		Vernetzte Gebäude	38,40	2,17	2,07	5,4%	0,7%	0,10	1% - 40%	34%	60%
	Beschleunigte Digitalisierung	Gesamt	99,50	10,65	10,36	10,4%	3,4%	0,29			
		Smart Homes	61,10	7,00	6,89	11,3%	2,2%	0,11	4% - 37%	12%	65%
		Vernetzte Gebäude	38,40	3,65	3,46	9,0%	1,1%	0,19	1% - 40%	34%	83%

Übersicht über die Anwendungsfälle, Hebel und adressierbare Emissionen

1. Smart Home

Für Smart Home werden zwei Wirkungshebel mit jeweils mehreren Faktoren berücksichtigt. Diese Kombination zielt darauf ab, die Effizienz der Wohngebäude durch intelligente Technologien und Automatisierung zu steigern und somit die Umweltauswirkungen zu minimieren.

Hebel	Anwendungen des Hebels	Adressierbare Emissionen
Gebäude- und Energiemanagement	Smarte Thermostate	Emissionen der Raumwärme
	Automatisierte Heizsysteme	Emissionen der Raumwärme
	Smarte Beleuchtung	Emissionen der Beleuchtung
Gebäudeautomation	Automatisierte Gebäude	Gesamtemissionen (inkl. Raumwärme, Beleuchtung und Klimakälte)

2. Vernetzte Gebäude

Für die Berechnung der Potenziale der vernetzten Gebäude werden zwei Wirkungshebel mit jeweils mehreren Faktoren berücksichtigt. Diese Kombination zielt darauf ab, die Effizienz von Nichtwohngebäude durch intelligente Technologien und Automatisierung zu steigern und somit die Umweltauswirkungen zu minimieren.

Hebel	Anwendungen des Hebels	Adressierbare Emissionen
Gebäude- und Energiemanagement	Smarte Thermostate	Emissionen der Raumwärme
	Smart Meter	Emissionen der Raumwärme
	Smarte Beleuchtung	Emissionen der Beleuchtung
	Automatisierte HLK ^b	Emissionen der Klimakälte
Gebäudeautomation	Automatisierte Gebäude	Gesamtemissionen (inkl. Raumwärme, Beleuchtung und Klimakälte)

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

1. Smart Home (1/2)

CO₂e-Projektionen

Für die differenzierte Betrachtung der möglichen Emissionsprognosen im Jahr 2030 wurden drei CO₂e-Projektionen erstellt, in denen sowohl direkte als auch indirekte Emissionen des Gebäudesektors berücksichtigt wurden. Direkte Emissionen stammen unmittelbar aus der Verbrennung in privaten Haushalten und im Bereich GHD^a, während indirekte Emissionen z.B. durch die Stromerzeugung für Beleuchtung entstehen. Die Bilanzierung in dieser Studie erfolgt laut Verursacherprinzip, welches alle Treibhausgase dort berücksichtigt, wo sie entstehen. Damit weicht die Bilanzierung von der Bilanzierung des UBAs² laut Quellprinzip ab. Es ist anzumerken, dass die Emissionen aus Warmwasser von dieser Berechnung exkludiert wurden, um eine spezifische Anwendbarkeit für den verschiedenen Wirkungshebel zu gewährleisten. Insgesamt wurden die Emissionen des Gebäudesektors für 2030 basierend auf den Endenergieverbräuchen je Energieträger mit den jeweiligen Primärenergiefaktoren und CO₂e-Emissionsfaktoren multipliziert und anteilig den Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden zugerechnet.^{1,2,3}

- Hohe CO₂e-Projektion: Diese CO₂e-Projektion basiert auf den Energieverbräuchen und Aufteilung der Energieträger aus 2020² unter der Prämisse, dass die historischen Verbräuche der Gebäude seit 2014 und der Anteil der Raumwärme weitgehend konstant sind³. Außerdem wurden Primärenergiefaktoren^{4,5,6} und ein diskontierter Stromemissionsfaktor (422,37 g/kWh) verwendet, unter der Annahme, dass sich der Faktor in dem Maße verbessert, wie es in den letzten fünf Jahren beobachtet wurde.^{2,7, b.}
- Mittlere CO₂e-Projektion: Für diese CO₂e-Projektion wurde der Endenergieverbrauch aus der hohen CO₂e-Projektion^{2,3}, und der CO₂e-Projektion des UBAs für 2030² gemittelt. Der Stromemissionsfaktor wurde gemittelt, um einen moderaten Ausbau klimafreundlicher Energieträger für den Strommix zu berücksichtigen (257,29 g/kWh).

- Mittlere CO₂e-Projektion: Für diese CO₂e-Projektion wurde der Endenergieverbrauch aus der hohen CO₂e-Projektion^{2,3}, und der CO₂e-Projektion des UBAs für 2030² gemittelt. Der Stromemissionsfaktor wurde gemittelt, um einen moderaten Ausbau klimafreundlicher Energieträger für den Strommix zu berücksichtigen (257,29 g/kWh).
- Niedrige CO₂e-Projektion: Diese CO₂e-Projektion für 2030 berücksichtigt für die Kalkulation den vom UBA prognostizierten Endenergieverbrauch und Stromemissionsfaktor (92,20 g/kWh)² für 2030. Hier treffen alle UBA-Prognosen ein, dementsprechend werden die Treibhausgasemissionen des Mit-Maßnahmen-Szenarios (MMS) herangezogen.

CO₂e-Einsparpotenziale

Das Brutto-Einsparpotenzial ergibt sich aus der Multiplikation von CO₂e-Projektionen, Reduktionspotenzial und Marktdurchdringungsdelta.¹ Das Marktdurchdringungsdelta ist die Differenz der Marktdurchdringung 2030 und Marktdurchdringung 2023. Für diesen Anwendungsfall wird die Bruttoeinsparung berechnet, indem die einzelnen Potenziale der Hebel summiert und dann teilweise verrechnet werden. Beispielsweise wird das Potenzial der smarten Thermostate bei der Gebäudeautomation subtrahiert, weil diese auch Teil der Gebäudeautomationssysteme sind.

Beispielhaft für die hohe CO₂e-Projektion bei smarten Thermostaten:

$$\text{CO}_2\text{e-Einsparpotenzial} = 100,9 \text{ MT CO}_2\text{e} \times 9\% \times (49\% - 12\%) = 3,4 \text{ MT CO}_2\text{e}$$

Der Fußabdruck der Technologie berechnet sich auf der Ebene des gesamten Anwendungsfalls, hier beispielhaft wie folgt für die Standard-Digitalisierung: Durchschnittliche Marktdurchdringung (Delta) x Fußabdruck IT x Stromemission = 37% x 5,1% x 17,2. Um das Netto-Einsparpotenzial des gesamten Anwendungsfalls zu berechnen, wird das Brutto-Einsparpotenzial mit dem Fußabdruck der Technologie verrechnet: 9,8 MT CO₂e – 0,3 MT CO₂e = 9,5 MT CO₂e.

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

1. Smart Home (2/2)

Reduktionspotenziale

Das Reduktionspotenzial bezieht sich auf die Verringerung des Energieverbrauchs durch den Einsatz von smarten Gebäudetechnologien. Diese Einschätzung wurde nach der Untersuchung existierender wissenschaftlicher Arbeiten mittels acht verschiedener Datenpunkte¹⁻⁸ ermittelt. Zu diesen zählen akademische Veröffentlichungen, Publikationen relevanter Forschungseinrichtungen sowie Befragungen von Expertinnen und Experten.⁹ Es ist anzumerken, dass die Anwendung in Nichtwohngebäuden von dieser Berechnung ausgeschlossen wurde, um eine spezifische Anwendbarkeit für die Wohngebäude als Teil des Gebäudesektors zu gewährleisten.

Marktdurchdringungsraten

Die Marktdurchdringung wird als Prozentsatz der Haushalte definiert, die Smart Home Technologien zur Reduktion ihres Energieverbrauchs implementieren. Für alle drei Marktdurchdringungsraten wird dabei die Marktdurchdringung der beiden Hebel, also Gebäude- und Energiemanagement, sowie die Gebäudeautomation, einzeln betrachtet. Um eine umfassende Einschätzung dieser Raten zu erhalten, wurden Daten aus verschiedenen Studien konsolidiert. In Fällen, in denen die Marktdurchdringung für verschiedene Zieljahre vorliegen, wurde ein Modell des linearen Wachstums verwendet, um kohärente und finale Schätzungen der Marktdurchdringung zu erzielen.

- **2023:** Für die aktuelle Marktdurchdringung für Smart Home wurden Publikationen relevanter Forschungseinrichtungen und Umfragen sowie Statistiken herangezogen.¹⁰ ¹¹ Im Gebäude- und Energiemanagement wurden insbesondere folgende zwei Quellen herangezogen: Zum einen wurden die „Laufenden Wirtschaftsrechnungen (LWR)“ des Statistischen Bundesamts verwendet, die einen Stichprobenumfang von 8.000 Haushalten umfassen.¹¹ Zum anderen wurde eine repräsentative Umfrage von Bitkom Research herangezogen, bei der 1.178 Personen in Deutschland ab 16 Jahren telefonisch befragt wurden.¹²

- **2030 Standard:** Um die Marktdurchdringung für 2030 zu ermitteln, wurden die Prognosen aus den Publikationen relevanter Forschungseinrichtungen und Statistiken verwendet und diese, auf Basis der konservativen Marktdurchdringung in 2023, nach unten verringert. Diese Studien prognostizierten bereits die Marktdurchdringung in 2030, stellten aber im Basisjahr 2023 eine mehr als 20-prozentige Abweichung von den Daten des Statistischen Bundesamts dar. Um diese Differenz auszugleichen, wurde die Prognose prozentual nach unten korrigiert.^{9-11,13}
- **2030 Beschleunigt:** Für die beschleunigte Digitalisierung wird eine schnellere Marktdurchdringung der in den Studien vorgestellten Technologien erwartet. Als Datengrundlage dienen dieselben Publikationen, die für die Marktdurchdringung bei der Standard-Digitalisierung berücksichtigt wurden. Dabei wurde der für 2030 antizipierte Wert für Deutschland als beschleunigte Marktdurchdringung angenommen, um die rasche und fortschrittliche Integration dieser Technologien abzubilden.^{9-11,13}

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

2. Vernetzte Gebäude (1/2)

CO₂e-Projektionen

Für die differenzierte Betrachtung der möglichen Emissionsprognosen im Jahr 2030 wurden drei CO₂e-Projektionen erstellt, in denen sowohl direkte als auch indirekte Emissionen des Gebäudesektors berücksichtigt wurden. Direkte Emissionen stammen unmittelbar aus der Verbrennung in privaten Haushalten und im Bereich GHD^a, während indirekte Emissionen z.B. durch die Stromerzeugung für Beleuchtung entstehen. Die Bilanzierung in dieser Studie erfolgt laut Verursacherprinzip, welches alle Treibhausgase dort berücksichtigt, wo sie entstehen. Damit weicht die Bilanzierung von der Bilanzierung des UBAs² laut Quellprinzip ab. Es ist anzumerken, dass bewusst die Emissionen aus Warmwasser von dieser Berechnung ausgeschlossen wurde, um eine spezifische Anwendbarkeit für den verschiedenen Wirkungshebel zu gewährleisten. Insgesamt wurden die Emissionen des Gebäudesektors für 2030 basierend auf den Endenergieverbräuchen je Energieträger mit den jeweiligen Primärenergiefaktoren und CO₂e-Emissionsfaktoren multipliziert und anteilig den Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden zugerechnet.

- Hohe CO₂e-Projektion: Diese CO₂e-Projektion basiert auf den Energieverbräuchen und Aufteilung der Energieträger aus 2020² unter der Prämisse, dass die historischen Verbräuche der Gebäude seit 2014 und der Anteil der Raumwärme weitgehend konstant sind³. Außerdem wurden Primärenergiefaktoren^{4,5,6} und ein diskontierter Stromemissionsfaktor (422,37 g/kWh) verwendet, unter der Annahme, dass sich der Faktor in dem Maße verbessert, wie es in den letzten fünf Jahren beobachtet wurde.^{2,7, b}
- Mittlere CO₂e-Projektion: Für diese CO₂e-Projektion wurde der Endenergieverbrauch aus der hohen CO₂e-Projektion^{2,3}, und der Projektion des UBAs für 2030² gemittelt. Der Stromemissionsfaktor wurde gemittelt, um einen moderaten Ausbau klimafreundlicher Energieträger für den Strommix zu berücksichtigen (257,29 g/kWh).

- Niedrige CO₂e-Projektion: Diese CO₂e-Projektion für 2030 berücksichtigt für die Kalkulation den vom UBA prognostizierten Endenergieverbrauch und Stromemissionsfaktor (92,20 g/kWh)² für 2030. Hier treffen alle UBA-Prognosen ein, dementsprechend werden die Treibhausgasemissionen des Mit-Maßnahmen-Szenarios (MMS) herangezogen.

CO₂e-Einsparpotenziale

Das Brutto-Einsparpotenzial ergibt sich aus der Multiplikation von CO₂e-Projektion, Reduktionspotenzial und Marktdurchdringungsdelta. Das Marktdurchdringungsdelta ist die Differenz der Marktdurchdringung 2030 und Marktdurchdringung 2023. Für diesen Anwendungsfall wird die Bruttoeinsparung berechnet, indem die einzelnen Potenziale der Hebel summiert und dann teilweise verrechnet werden. Beispielsweise wird das Potenzial der smarten Thermostate bei der Gebäudeautomation subtrahiert, weil diese auch Teil der Gebäudeautomationssysteme sind.

Beispielhaft für die hohe CO₂e-Projektion bei smarten Thermostaten:
 CO₂e-Einsparpotenzial = 51,8 MT CO₂e x 8% x (60% – 34%) = 1,3 MT CO₂e.

Der Fußabdruck der Technologie berechnet sich auf der Ebene des gesamten Anwendungsfalls, hier beispielhaft wie folgt für die Standard-Digitalisierung:
 Durchschnittliche Marktdurchdringung (Delta) x Fußabdruck IT x Stromemission = 26% x 5,1% x 38,95. Um das Netto-Einsparpotenzial des gesamten Anwendungsfalls zu berechnen, wird das Brutto-Einsparpotenzial mit dem Fußabdruck der Technologie verrechnet: 10,7 MT CO₂e – 0,5 MT CO₂e = 10,2 MT CO₂e.

Anmerkung: a) Gewerbe, Handel und Dienstleistungen.

Quellen: 1) Accenture Berechnung; 2) UBA (2023j); 3) Dena (2022); 4) BDEW (2022); 5) UBA (2023d); 6) DBFZ (2023); 7) UBA (2023c).

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

2. Vernetzte Gebäude (2/2)

Reduktionspotenziale

Das Reduktionspotenzial bezieht sich auf die Verringerung des Energieverbrauchs durch den Einsatz von smarten Gebäudetechnologien in Nichtwohngebäuden. Diese Einschätzung wurde nach der Untersuchung existierender wissenschaftlicher Arbeiten mittels zwölf verschiedener Datenpunkte¹⁻⁸ ermittelt. Zu diesen zählen akademische Veröffentlichungen, Publikationen relevanter Forschungseinrichtungen sowie Befragungen von Expertinnen und Experten.⁹ Es ist anzumerken, dass bewusst die Anwendung in Wohngebäuden von dieser Berechnung ausgeschlossen wurde, um eine spezifische Anwendbarkeit für die Nichtwohngebäude als Teil des Gebäudesektors zu gewährleisten.

Marktdurchdringungsraten

Die Marktdurchdringung wird als Prozentsatz der Unternehmen definiert, die vernetzte Gebäudetechnologien zur Reduktion ihres Energieverbrauchs implementieren. Für alle drei Marktdurchdringungsraten wird dabei die Marktdurchdringung der beiden Hebel, also Gebäude- und Energiemanagement, sowie die Gebäudeautomation, einzeln betrachtet. Um eine umfassende Einschätzung dieser Raten zu erhalten, wurden Daten aus verschiedenen Studien konsolidiert. In Fällen, in denen die Marktdurchdringungsraten für verschiedene Zieljahre vorliegen, wurde ein Modell des linearen Wachstums verwendet, um kohärente und finale Schätzungen der Marktdurchdringung zu erzielen.

- **2023:** Für die aktuelle Marktdurchdringungsrate für vernetzte Gebäude wurde eine Expertenbefragung durchgeführt und diese mit einer Accenture-Umfrage gemittelt.^{9,10} Für den Hebel Gebäudeautomatisierung wurde dabei die Schätzung einer Studie verwendet und diese, unter Annahme eines linearen Wachstums, für 2023 prognostiziert.⁹

- **2030 Standard:** Um die jeweiligen Marktdurchdringungsraten für 2030 zu ermitteln, wurden die Prognosen und CAGR aus den Publikationen relevanter Forschungseinrichtungen und Statistiken verwendet, sowie Befragungen von Expertinnen und Experten.^{4,9,10}
- **2030 Beschleunigt:** Für die beschleunigte Digitalisierungsgeschwindigkeit postuliert man zwei beschleunigte Marktdurchdringungsraten für die in den Studien vorgestellten Technologien. Als Datengrundlage dienten unter anderem dieselben Publikationen, die für die Marktdurchdringung bei der Standard-Digitalisierung berücksichtigt wurden und die Befragungen von Expertinnen und Experten.^{4,9}

Weitere Annahmen und Anmerkungen

Berechnungslogik

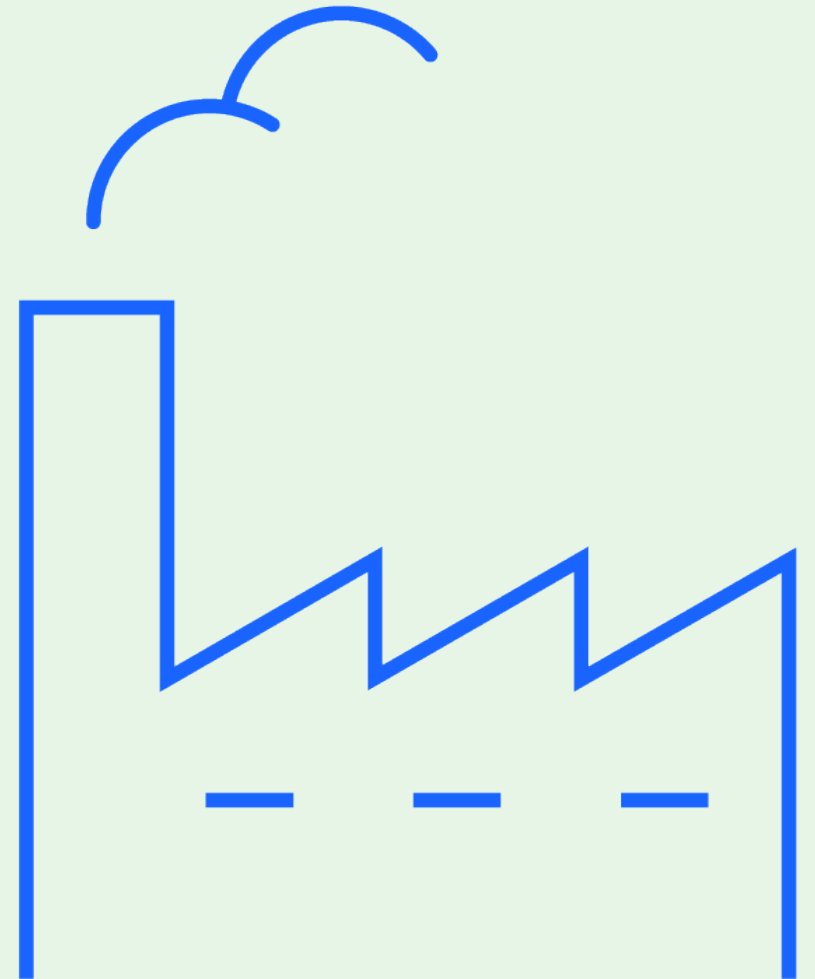
- **CO₂e-Projektion:** Für die CO₂e-Projektionen der Gebäudeemissionen in 2030 wurden die Emissionen durch Warmwasser nicht betrachtet, ebenso wurde nur ein kleiner Teil der Emissionen durch Geräte und Prozesse inkludiert. Hierbei wurde der Endenergieverbrauch aus 2020 von Beleuchtung und Klimakälte (in TWh) des Dena Gebäudereport 2023¹ mit dem Projektionsbericht² verglichen und für die hohe CO₂e-Projektion mit der Reduktionsrate des Endenergieverbrauchs aus dem Projektionsbericht verrechnet (2020 vs. 2030). Für die niedrige CO₂e-Projektion wurde keine Veränderung des Endenergieverbrauchs angenommen, die mittlere CO₂e-Projektion bildet den gemittelten Endenergieverbrauch aus der hohen und niedrigen CO₂e-Projektion ab.
- **Potenzial der smarten Thermostate:** Hier wurde eine konservative Verbrauchsreduktion (ca. 9%) angenommen, die eine geringere Reduktion annimmt als beispielsweise das Fraunhofer-Institute for Building Physics IBP (12–28%).^{3,4}
- **Verrechnung der CO₂e-Einsparungspotenziale von smarten Thermostaten und Gebäudeautomation:** Unter der Annahme, dass Gebäudeautomationssysteme auch smarte Thermostate umfassen, wurde die Einsparung in MT CO₂e bei der Gebäudeautomatisierung entsprechend verringert. Das errechnete Potenzial der Thermostate in der Gebäude-automatisierung (*CO₂e-Projektion x Marktdurchdringung (Delta) der Gebäudeautomation x spezifischer Reduktionshebel der Thermostate*) wurde entsprechend vom Gesamtpotenzial abgezogen. Für die Ermittlung der Einsparungen durch smarte Thermostate wurde weiterhin der standardisierte Ansatz gewählt, sodass keine Doppelungen berechnet wurden.

Grundlegende Annahmen

1. Laut Projektionsbericht verzeichnet der Endenergieverbrauch aus Geräten und Prozessen in TWh eine Reduktion von 15,4% (2030 verglichen mit 2020).² Beleuchtung und Klimakälte sind nicht im Endenergieverbrauch der Raumwärme inkludiert und fallen somit unter den Verbrauch aus Geräten und Prozessen, wozu z.B. auch Waschmaschinen zählen. Daher wird angenommen, dass die Reduktion bis 2030 laut UBA 1:1 für Beleuchtung und Klimakälte ebenso anwendbar ist, wie für die anderen erfassten Anteile.
2. Verglichen mit den gesamten Energieverbräuchen der Gebäude machen die Verbräuche aus Beleuchtung und Klimakälte einen kleineren Teil aus. Für die Berechnung der Verbräuche in 2030 dient das Basisjahr 2020 abzüglich der Verbrauchsreduktion, abhängig von der jeweiligen CO₂e-Projektion. Insgesamt entfallen in Wohngebäuden etwa 2% des Gesamtenergieverbrauchs auf die Beleuchtung und Klimakälte, in Nichtwohngebäuden sind es etwa 24%.¹ Der alleinige Energieträger für Beleuchtung und Klimakälte ist Strom.
3. Der Endenergieverbrauch ist seit 2014 weitgehend konstant und unterlag nur geringen Schwankungen; daher wird angenommen, dass er bis 2030 weiterhin konstant bleibt (hohe CO₂e-Projektion). Auch der prozentuale Anteil der Endenergieverbräuche (z.B. Raumwärme WG, Raumwärme NWG, Warmwasser WG, Warmwasser NWG, etc.) bleibt analog zu 2020.¹
4. Teilweise beziehen sich Studien im Bereich der Gebäudeautomation auf das effektive Einsparpotenzial durch Automation versus keine Automation in Neubauten⁵ oder unter der Bedingung der Sanierung von Gebäuden⁶. Zur Vereinfachung wurden für diese Effekte angenommen, dass diese Bedingungen erfüllt werden.
5. Smart Meter als Instrument der Emissionsreduktion sind für private Haushalte in der CO₂e-Projektion des UBAs für 2030 bereits inkludiert, daher wurde das Potenzial nur für Nichtwohngebäude ermittelt und die Potenziale für Wohngebäude exkludiert.²

8.3

Industrie



Zusammenfassung der Anwendungsfälle

CO ₂ e-Projektion:	Szenario und Digitalisierungsgeschwindigkeit	Anwendungsfall	CO ₂ e-Projektion 2030	CO ₂ e-Einsparpotenzial (brutto)	CO ₂ e-Einsparpotenzial (netto)	Rel. netto CO ₂ e-Einsparpotenzial (vs. Projektion)	Rel. netto CO ₂ e-Einsparpotenzial (vs. Klimalücke)	CO ₂ e-Fußabdruck der Technologie	Spezifisches Reduktionspotenzial	Marktdurchdringung 2023	Marktdurchdringung 2030	
			In MT	In MT	In MT	In Prozent	In Prozent	In MT CO ₂ e	In Prozent	In Prozent	In Prozent	
Hoch	Standard Digitalisierung	Gesamt	253,78	7,73	6,53	2,6%	2,1%	1,20				
		Automatisierung	253,78	4,97	4,37	1,7%	1,4%	0,60	15%	21%	34%	
		Digital Twin	253,78	2,77	2,16	0,9%	0,7%	0,61	7%	26%	40%	
	Beschleunigte Digitalisierung	Gesamt	253,78	17,58	14,93	5,9%	4,8%	2,65				
		Automatisierung	253,78	12,06	10,62	4,2%	3,4%	1,44	15%	21%	53%	
		Digital Twin	253,78	5,52	4,31	1,7%	1,4%	1,21	7%	26%	55%	
Mittel	Standard Digitalisierung	Gesamt	207,09	6,31	5,58	2,7%	1,8%	0,73				
		Automatisierung	207,09	4,05	3,69	1,8%	1,2%	0,36	15%	21%	34%	
		Digital Twin	207,09	2,26	1,89	0,9%	0,6%	0,37	7%	26%	40%	
	Beschleunigte Digitalisierung	Gesamt	207,09	14,35	12,73	6,1%	4,1%	1,61				
		Automatisierung	207,09	9,84	8,96	4,3%	2,9%	0,88	15%	21%	53%	
		Digital Twin	207,09	4,51	3,77	1,8%	1,2%	0,74	7%	26%	55%	
Niedrig	Standard Digitalisierung	Gesamt	160,41	4,89	4,63	2,9%	1,5%	0,26				
		Automatisierung	160,41	3,14	3,01	1,9%	1,0%	0,13	15%	21%	34%	
		Digital Twin	160,41	1,75	1,62	1,0%	0,5%	0,13	7%	26%	40%	
	Beschleunigte Digitalisierung	Gesamt	160,41	11,11	10,53	6,6%	3,4%	0,58				
		Automatisierung	160,41	7,62	7,31	4,6%	2,4%	0,31	15%	21%	53%	
		Digital Twin	160,41	3,49	3,23	2,0%	1,0%	0,26	7%	26%	55%	

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

1. Automatisierung (1/2)

CO₂e-Projektionen

Für die differenzierte Betrachtung der möglichen Emissionsprognosen im Jahr 2030 wurden drei CO₂e-Projektionen erstellt, in denen sowohl direkte als auch indirekte Emissionen der Industrie berücksichtigt wurden. Direkte Emissionen entstehen unmittelbar durch industrielle Prozesse, beispielsweise durch Verbrennungsverfahren. Indirekte Emissionen hingegen resultieren aus dem Verbrauch von Ressourcen wie Strom oder Wasserstoff, durch deren Erzeugung Emissionen in vorgelagerten Prozessen entstehen.^{1,2,3}

- CO₂e-Projektion: Hoch: Die CO₂e-Projektion für die direkten Emissionen basieren auf den Emissionen des Sektors „Industrie“ des Klimaschutzgesetzes (KSG), welche auf Basis des Trends der letzten fünf Jahre bis 2030 extrapoliert wurden. Die indirekten Emissionen berücksichtigen den Elektrizitäts- und Fernwärmebedarf der Industrie in 2030 laut Projektionsberichts 2023. Für den Strommix und der entsprechenden Emissionsintensität wurde hier die konservative Annahme getroffen, dass die Energiewende entsprechend des Trends der letzten Jahre fortschreitet und kein beschleunigter Ausbau der Erneuerbaren Energien vollzogen wird. Aus diesem Grund wurde in der hohen CO₂e-Projektion auch kein Umstieg auf Wasserstoff modelliert.
- CO₂e-Projektion: Mittel: Die Emissionsprognose resultiert aus dem Durchschnitt der Emissionsdaten der hohen und niedrigen CO₂e-Projektion.
- CO₂e-Projektion: Niedrig: Die CO₂e-Projektion basiert auf den Daten des Projektionsberichts 2023 für Deutschland im MMS. Die direkten Emissionen entsprechen den Emissionen für 2030, die laut der CO₂e-Projektion dem Sektor „Industrie“ zugeordnet sind. Die indirekten Emissionen berücksichtigen den Elektrizitäts-, Fernwärme- und Wasserstoffbedarf der Industrie in 2030 laut Projektionsbericht 2023 und die entsprechenden prognostizierten spezifischen Emissionsfaktoren.

CO₂e-Einsparpotenziale

Das Brutto-Einsparpotenzial ergibt sich aus der Multiplikation von der CO₂e-Projektion, Reduktionspotenzial und Marktdurchdringungsdelta. Das Marktdurchdringungsdelta ist die Differenz der Marktdurchdringung 2030 und Marktdurchdringung 2023.

Beispielhaft für die hohe CO₂e-Projektion: CO₂e-Einsparpotenzial = 253,78 MT CO₂e x 15% x (33,9% – 20,8%) = 4,97 MT CO₂e -> 1% CO₂e-Einsparpotenzial. Der Fußabdruck der Technologie berechnet sich beispielhaft wie folgt: Marktdurchdringung (Delta) x Fußabdruck IT x Stromemission = 13,1% x 4,4% x 102,47. Um das Netto-Einsparpotenzial zu berechnen, wird das Brutto-Einsparpotenzial mit dem Fußabdruck der Technologie verrechnet: 4,97 MT CO₂e – 0,6 MT CO₂e = 4,37 MT CO₂e.

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

1. Automatisierung (2/2)

Reduktionspotenziale

Das Reduktionspotenzial bezieht sich auf die Verringerung des Energieverbrauchs durch den Einsatz von Automatisierungstechnologien. Diese Einschätzung wurde nach sorgfältiger Untersuchung existierender wissenschaftlicher Arbeiten mittels einer Metastudie ermittelt. Es ist anzumerken, dass bewusst die Anwendung von Simulationen und digitalen Zwillingstechnologien von dieser Berechnung ausgeschlossen wurde, um eine spezifische Anwendbarkeit für den Automatisierungs-Wirkungshebel zu gewährleisten.¹⁻⁴

Marktdurchdringungsraten

Die Marktdurchdringung wird als Prozentsatz der Industrieunternehmen definiert, die Automatisierungslösungen zur Reduktion ihres Energieverbrauchs implementieren. Für alle drei Marktdurchdringungsraten wurden Daten aus verschiedenen Studien konsolidiert. In Fällen, in denen die Marktdurchdringungsraten für verschiedene Zieljahre vorliegen, wurde ein Modell des linearen Wachstums verwendet, um kohärente und finale Schätzungen der Marktdurchdringung zu erzielen.¹⁻⁶

- **2023:** Für die aktuelle Marktdurchdringungsrate der Automatisierung wurden Publikationen von Forschungseinrichtungen und Statistiken herangezogen. Zusätzlich wurden Experteninterviews geführt, um die Marktdurchdringungsrate für 2023 zu validieren.⁶

- **2030 Standard:** Um die Standard-Marktdurchdringung für 2030 zu kalkulieren, wurden umfassende (Meta-)Studien herangezogen. Diese Studien erörtern den potenziellen Anteil automatisierbarer Prozesse und prognostizieren die Anzahl der Unternehmen, die besagte Technologien für diese Prozesse adaptieren werden. Diese Werte wurden miteinander verrechnet, um die Marktdurchdringung zu bestimmen. Bei Datensätzen, die sich auf ein anderes Referenzjahr als 2030 beziehen, wurde ein lineares Wachstumsmodell angewendet.
- **2030 Beschleunigt:** Unter Berücksichtigung der schwer vorhersehbaren inhaltlichen und zeitlichen Technologieentwicklungen wird für die beschleunigte Digitalisierung eine schnellere Marktdurchdringungsrate der betrachteten Technologien erwartet. Die für 2040 prognostizierten Werte wurden auf 2030 vorverlegt, basierend auf denselben Publikationen wie für die Standardgeschwindigkeit, um die potenziell raschere Technologieintegration abzubilden.

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

2. Digitaler Zwilling (1/2)

CO₂e-Projektionen

Für die differenzierte Betrachtung der möglichen Emissionsprognosen im Jahr 2030 wurden drei CO₂e-Projektionen erstellt, in denen sowohl direkte als auch indirekte industrielle Emissionen berücksichtigt wurden. Direkte Emissionen entstehen unmittelbar durch industrielle Prozesse, beispielsweise durch Verbrennungsverfahren. Indirekte Emissionen hingegen resultieren aus dem Verbrauch von Ressourcen wie Strom oder Wasserstoff, deren Emissionen in vorgelagerten Prozessen anfallen.¹⁻⁴

- Hohe CO₂e-Projektion: Die CO₂e-Projektion für die direkten Emissionen basieren auf den Emissionen des Sektors „Industrie“ des Klimaschutzgesetzes (KSG), welche auf Basis des Trends der letzten fünf Jahre bis 2030 extrapoliert wurden. Die indirekten Emissionen berücksichtigen den Elektrizitäts- und Fernwärmebedarf der Industrie in 2030 laut Projektionsbericht 2023. Für den Strommix und der entsprechenden Emissionsintensität wurde hier die konservative Annahme getroffen, dass die Energiewende entsprechend des Trends der letzten Jahre fortschreitet und kein beschleunigter Ausbau der Erneuerbaren Energien vollzogen wird. Aus diesem Grund wurde in der hohen CO₂e-Projektion auch kein Umstieg auf Wasserstoff modelliert.
- Mittlere CO₂e-Projektion: Die Emissionsprognose resultiert aus dem Durchschnitt der Emissionsdaten der hohen und niedrigen CO₂e-Projektionen.
- Niedrige CO₂e-Projektion: Diese CO₂e-Projektion basiert auf den Daten des Projektionsberichts 2023 für Deutschland im MMS. Die direkten Emissionen entsprechen den Emissionen für 2030, die laut der CO₂e-Projektion dem Sektor „Industrie“ zugeordnet sind. Die indirekten Emissionen berücksichtigen den Elektrizitäts-, Fernwärme- und Wasserstoffbedarf der Industrie in 2030 laut Projektionsberichts 2023 und die entsprechenden prognostizierten spezifischen Emissionsfaktoren.

CO₂e-Einsparpotenziale

Das Brutto-Einsparpotenzial ergibt sich aus der Multiplikation von der CO₂e-Projektion, Reduktionspotenzial und Marktdurchdringungsdelta. Das Marktdurchdringungsdelta ist die Differenz der Marktdurchdringung 2030 und Marktdurchdringung 2023.

Beispielhaft für die hohe CO₂e-Projektion: CO₂e-Einsparpotenzial = 253,78 MT CO₂e x 7,4% x (40,3% – 25,5%) = 2,77 MT CO₂e -> 1% CO₂e-Einsparpotenzial. Der Fußabdruck der Technologie berechnet sich beispielhaft wie folgt: Marktdurchdringung (Delta) x Fußabdruck IT x Stromemission = 14,8% x 4,0% x 102,47. Um das Netto-Einsparpotenzial zu berechnen, wird das Brutto-Einsparpotenzial mit dem Fußabdruck der Technologie verrechnet: 2,77 MT CO₂e – 0,61 MT CO₂e = 2,61 MT CO₂e.

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

2. Digitaler Zwilling (2/2)

Reduktionspotenziale

Das Reduktionspotenzial bezieht sich auf die Verringerung des Energieverbrauchs durch den Einsatz von digitalen Zwillingen. Diese Einschätzung wurde nach sorgfältiger Untersuchung existierender wissenschaftlicher Arbeiten mittels vier Datenpunkten ermittelt. Zu diesen zählen akademische Veröffentlichungen, Publikationen relevanter Forschungseinrichtungen sowie Befragungen von Expertinnen und Experten. Es ist anzumerken, dass bewusst die Anwendung von Automatisierungslösungen von dieser Berechnung ausgeschlossen wurde, um eine spezifische Anwendbarkeit für den digitalen Zwilling-Wirkungshebel zu gewährleisten.^{1,2}

Marktdurchdringungsraten

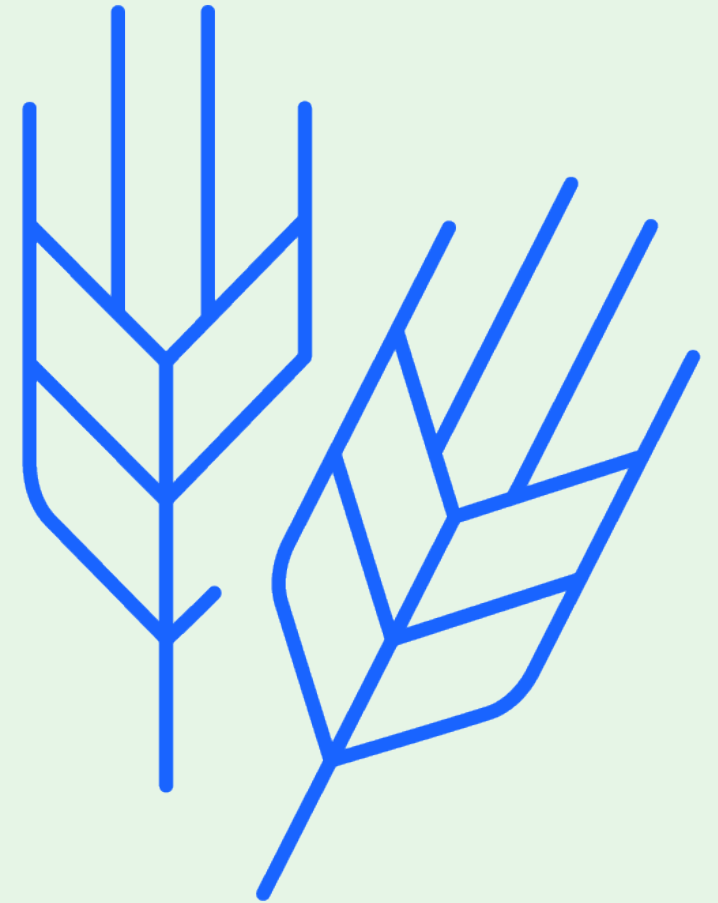
Die Marktdurchdringung wird als Prozentsatz der Industrieunternehmen definiert, die digitale Zwillinge zur Reduktion ihres Energieverbrauchs implementieren. Für alle drei Marktdurchdringungsdaten wurden Daten aus verschiedenen Studien konsolidiert. In Fällen, in denen die Marktdurchdringungsdaten für verschiedene Zieljahre vorliegen, wurde ein Modell des linearen Wachstums verwendet, um kohärente und finale Schätzungen der Marktdurchdringung zu erzielen.^{1,2,3}

- **2023:** Diese Marktdurchdringungsrate stützt sich auf drei zentrale Datenquellen. Die erste Studie stützt sich auf eine Befragung von über 200 Unternehmen, die aussagten, digitale Zwillinge (1) im Kontext des Betriebs physischer Anlagen einzusetzen oder eine Implementierung zu planen und (2) diese für das Nachhaltigkeitsmanagement einzusetzen oder eine Implementierung zu planen. Als ergänzende Informationsquelle wurde eine umfangreiche Metastudie herangezogen. Des Weiteren wurde ergänzend eine Bitkom-Umfrage aus dem Jahr 2022 verwendet, in der 163 Industrieunternehmen in Deutschland konkret zum Umsetzungsstand befragt wurden.^{1,2,3}

- **2030 Standard:** Die Standard Prognose der Marktdurchdringung für das Jahr 2030 stützt sich auf o.g. Datenquellen.
- **2030 Beschleunigt:** Unter Berücksichtigung der schwer vorhersehbaren Technologieentwicklungen und Timings postuliert man für die beschleunigte Digitalisierung eine erhöhte Marktdurchdringungsrate der betrachteten Technologien. Die für 2040 prognostizierten Werte wurden auf 2030 vorverlegt, basierend auf denselben Publikationen wie für die Standardgeschwindigkeit, um die potenziell raschere Technologieintegration zu reflektieren.

8.4

Landwirtschaft



Zusammenfassung der Anwendungsfälle

CO ₂ e-Projektion und Digitalisierungsgeschwindigkeit	Anwendungsfall	CO ₂ e-Projektion 2030	CO ₂ e-Einsparpotenzial (brutto)	CO ₂ e-Einsparpotenzial (netto)	Rel. netto CO ₂ e-Einsparpotenzial (vs. Projektion)	Rel. netto CO ₂ e-Einsparpotenzial (vs. Klimalücke)	CO ₂ e-Fußabdruck der Technologie	Spezifisches Reduktionspotenzial	Marktdurchdringung 2023	Marktdurchdringung 2030	
											In MT
CO ₂ e-Projektion: Hoch	Standard Digitalisierung	Gesamt	51,60	3,92	3,85	7,5%	1,3%	0,07			
		Intelligente Bodenbewirtschaftung	18,10	1,97	1,93	10,7%	0,6%	0,04	39%	29%	57%
		Intelligente Nutztierhaltung	33,50	1,95	1,92	5,7%	0,6%	0,03	25%	18%	41%
	Beschleunigte Digitalisierung	Gesamt	51,60	6,75	6,63	12,9%	2,2%	0,12			
		Intelligente Bodenbewirtschaftung	18,10	2,66	2,61	14,4%	0,8%	0,05	39%	29%	67%
		Intelligente Nutztierhaltung	33,50	4,09	4,02	12,0%	1,3%	0,07	25%	18%	66%
CO ₂ e-Projektion: Mittel	Standard Digitalisierung	Gesamt	46,21	3,53	3,49	7,5%	1,1%	0,04			
		Intelligente Bodenbewirtschaftung	16,54	1,80	1,78	10,8%	0,6%	0,02	39%	29%	57%
		Intelligente Nutztierhaltung	29,67	1,73	1,71	5,8%	0,6%	0,02	25%	18%	41%
	Beschleunigte Digitalisierung	Gesamt	46,21	6,05	5,98	12,9%	1,9%	0,07			
		Intelligente Bodenbewirtschaftung	16,54	2,43	2,40	14,5%	0,8%	0,03	39%	29%	67%
		Intelligente Nutztierhaltung	29,67	3,62	3,58	12,1%	1,2%	0,04	25%	18%	66%
CO ₂ e-Projektion: Niedrig	Standard Digitalisierung	Gesamt	40,82	3,14	3,12	7,6%	1,0%	0,02			
		Intelligente Bodenbewirtschaftung	14,98	1,63	1,62	10,8%	0,5%	0,01	39%	29%	57%
		Intelligente Nutztierhaltung	25,85	1,51	1,50	5,8%	0,5%	0,01	25%	18%	41%
	Beschleunigte Digitalisierung	Gesamt	40,82	5,36	5,33	13,1%	1,7%	0,03			
		Intelligente Bodenbewirtschaftung	14,98	2,20	2,19	14,6%	0,7%	0,01	39%	29%	67%
		Intelligente Nutztierhaltung	25,85	3,16	3,14	12,1%	1,0%	0,02	25%	18%	66%

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

1. Intelligente Bodenbewirtschaftungssysteme (1/2)

CO₂e-Projektionen

Für die differenzierte Betrachtung der möglichen Emissionsprognosen im Jahr 2030 wurden drei CO₂e-Projektionen erstellt. Die CO₂e-Projektionen basieren auf den Emissionen, die aus landwirtschaftlichen Böden, Kalkung, Harnstoffanwendung und anderen kohlenstoffhaltigen Düngemitteln resultieren.

- Hohe CO₂e-Projektion: Zur Kalkulation von der hohen CO₂e-Projektion von 14,98 MT CO₂e wurde eine Wachstumsrate anhand der Emissionen aus den Jahren 2017 und 2022 berechnet.¹ Diese wurde auf die Emissionen des das Jahr 2022 angewendet wurde, um die projizierten Emissionen für das Jahr 2030 zu kalkulieren.
- Mittlere CO₂e-Projektion: Zur Kalkulation der mittleren CO₂e-Projektion (16,54 MT CO₂e) wird ein Mittelwert der hohen und niedrigen CO₂e-Projektionen berechnet, um einen ausgewogenen Ausblick auf die möglichen Emissionen im Jahr 2030 zu geben.
- Niedrige CO₂e-Projektion: Die niedrige CO₂e-Projektion von 18,10 MT CO₂e basiert auf die vom Projektionsbericht 2023 des Umweltbundesamts projizierten Emissionen aus Landwirtschaftliche Böden, Kalkung, Harnstoffanwendung und anderen kohlenstoffhaltigen Düngemitteln im Jahr 2030, im MMS übernommen.²

Die CO₂e-Projektionen beinhalten die verbesserte Methodik der direkten Lachgasemissionen, welche im Berichterstattungs-Modell seit der Inventar-Submission 2022 genutzt wird. Diese Methodik wurde auf Grundlage von deutschen Messdaten entwickelt und führte zu einem niedrigeren Emissionswert.²

CO₂e-Einsparpotenziale

Das Netto-Einsparpotenzial ergibt sich aus dem Brutto-Einsparpotenzial minus den Fußabdruck der angewendeten Technologie. Das Brutto-Einsparpotenzial ergibt sich aus der Multiplikation von der CO₂e-Projektion, Reduktionspotenzial und Marktdurchdringungsdelta. Das Marktdurchdringungsdelta ist die Differenz der Marktdurchdringung 2030 und Marktdurchdringung 2023. Beispielhaft für die hohe CO₂e-Projektion und die Standard-Digitalisierungsgeschwindigkeit:

Netto CO₂e-Einsparpotenzial = 1,97 MT CO₂e – 0,04 MT CO₂e = 1,93 MT CO₂e → 11% CO₂e-Einsparpotenzial

Brutto CO₂e-Einsparpotenzial = 18,10 MT CO₂e x 39% x (57% – 29%) = 1,97 MT CO₂e.

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

1. Intelligente Bodenbewirtschaftungssysteme (2/2)

Reduktionspotenziale

Das Reduktionspotenzial umfasst die Reduktion des Düngemittelbedarfs durch die Anwendung teilflächenspezifischer Düngung. Es ergibt sich aus dem Mittelwert von vier Studien.¹⁻⁴ Es wurde die Annahme getroffen, dass sich aus einer prozentualen Reduktion von Düngemittel eine gleichwertige Reduktion von Emissionen ergibt.

Marktdurchdringungsraten

Die Marktdurchdringung wird als Prozentsatz der Landwirtinnen und Landwirte definiert, die teilflächenspezifische Düngung und Kalkung anwenden.

- **2023:** Zur Kalkulation der Marktdurchdringung im Jahr 2023 wurden Datenpunkte aus fünf Studien⁵⁻⁹ herangezogen. Da diese aus unterschiedlichen Jahren stammten, wurde eine Wachstumsrate verwendet, um die Marktdurchdringung im Jahr 2023 zu kalkulieren. Diese Wachstumsrate basiert auf der Marktdurchdringung der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung der Jahre 2001 und 2019.^{5,10}
- **2030 Standard:** Die projizierte Marktdurchdringung im Jahr 2030 bei einer Standard-Digitalisierung basiert auf zwei Datenpunkten. Der erste Datenpunkt stammt aus einer Studie, bei der eine erwartete Marktdurchdringungsrate für das Jahr 2030 angegeben wurde.¹¹ Der zweite Datenpunkt wurde kalkuliert in dem eine Wachstumsrate auf die Marktdurchdringung im Jahr 2023 angewandt wurde. Die verwendete Wachstumsrate stammt aus dem Markt für Technologien zur teilflächenspezifischen Düngung in Deutschland.¹² Diese beiden Datenpunkte wurden gemittelt, um die projizierte Marktdurchdringung im Jahr 2030 zu ermitteln.
- **2030 Beschleunigt:** Zur Kalkulation der projizierten Marktdurchdringung im Jahr 2030 bei einer beschleunigten Digitalisierung wurde eine Wachstumsrate auf die heutige Marktdurchdringung angewandt. Die verwendete Wachstumsrate wurde aus der Marktdurchdringung von teilflächenspezifischer Düngung und Kalkung bei großen, kommerziellen, landwirtschaftlichen Betrieben in den USA in den Jahren 2010 und 2017 kalkuliert.¹³ Diese Wachstumsrate wurde genutzt, da die Marktdurchdringung der Technologie in den USA höher ist als in Europa, und da größere landwirtschaftliche Betriebe eher dazu neigen, diese Technologie zu implementieren.¹⁰ Daher wurden diese Betriebe als Best-Practice-Beispiel für die Marktdurchdringungsrate herangezogen. Dieser Vergleich ist möglich, da die teilflächenspezifische Düngung und Kalkung für einen durchschnittlichen landwirtschaftlichen Betrieb¹⁴ rentabel sein kann.^{15,16,17} Somit haben landwirtschaftliche Betriebe in Deutschland einen monetären Anreiz, den Anwendungsfall umzusetzen.

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

2. Intelligente Nutztierhaltungssysteme (1/2)

CO₂e-Projektionen

Für die differenzierte Betrachtung der möglichen Emissionsprognosen im Jahr 2030 wurden drei CO₂e-Projektionen erstellt.

- Hohe CO₂e-Projektion: Die hohe CO₂e-Projektion von 25,85 MT CO₂e basiert auf einer Prognose des deutschen Viehbestandes im Jahr 2030 und einem konstanten Emissionsfaktor. Der Viehbestand umfasst für diese Analyse Schweine, Rinder, Schafe und Ziegen. Zur Berechnung des projizierten Viehbestandes im Jahr 2030 wurde einer Wachstumsrate angewandt. Diese Wachstumsrate wurde aus dem Viehbestand der Jahre 2017 und 2023¹⁻⁴ ermittelt. Der verwendete Emissionsfaktor wurde anhand der Emissionen aus der enterischen Fermentation und der Lagerung von Wirtschaftsdünger im Jahr 2022⁵ sowie des Viehbestandes im Jahr 2023 berechnet.
- Mittlere CO₂e-Projektion: Zur Kalkulation der mittleren CO₂e-Projektion (22,08 MT CO₂e) wird ein Mittelwert der hohen und niedrigen CO₂e-Projektionen berechnet, um einen ausgewogenen Ausblick auf die möglichen Emissionen im Jahr 2030 zu geben.
- Niedrige CO₂e-Projektion: Bei der niedrigen CO₂e-Projektion von 33,50 MT CO₂e wurden die vom Projektionsbericht 2023 des Umweltbundesamts projizierten Emissionen aus der enterischen Fermentation und der Lagerung von Wirtschaftsdünger im Jahr 2030 im MMS übernommen.⁶

CO₂e-Einsparpotenziale

Das Netto-Einsparpotenzial ergibt sich aus dem Brutto-Einsparpotenzial minus den Fußabdruck der angewendeten Technologie. Das Brutto-Einsparpotenzial ergibt sich aus der Multiplikation von CO₂e-Projektion, Reduktionspotenzial und Marktdurchdringungsdelta. Das Marktdurchdringungsdelta ist die Differenz der Marktdurchdringung 2030 und Marktdurchdringung 2023. Beispielhaft für die hohe CO₂e-Projektion und die Standard-Digitalisierungsgeschwindigkeit:

Netto CO₂e-Einsparpotenzial = 1,95 MT CO₂e – 0,03 MT CO₂e = 1,92 MT CO₂e → 6% CO₂e-Einsparpotenzial

Brutto CO₂e-Einsparpotenzial = 33,50 MT CO₂e x 25% x (41% – 18%) = 1,95 MT CO₂e.

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

2. Intelligente Nutztierhaltungssysteme (2/2)

Reduktionspotenziale

Das Reduktionspotenzial umfasst die Reduktion von Emissionen durch Präzisionsfütterung sowie die Reduktion von Emissionen durch Tierüberwachung. Um die Emissionsreduktion durch Präzisionsfütterung zu ermitteln, wurden fünf Datenpunkte aus vier unterschiedlichen Studien^{1,2,3,4} gemittelt. Da drei dieser Datenpunkte^{2,3,4} nur die Reduktion der Emissionen aus der enterischen Fermentation untersuchten, wurden diese mit dem Anteil dieser Emissionen an den Nutztieremissionen multipliziert. Ein Datenpunkt untersuchte die Reduktion an Gülleemissionen³, und wurden daher mit dem Anteil der Wirtschaftsdüngerlagerung multipliziert. Die Anteile der Emissionen aus der enterischen Fermentation und der Gülle wurden aus CO₂e-Projektionen für 2030 kalkuliert. Somit wurde sichergestellt, dass das Reduktionspotenzial des Anwendungsfalls nur den relevanten Teil der Projektion betrifft.

Um die Emissionsreduktion durch Tierüberwachung zu ermitteln, wurde der Durchschnitt aus zwei Studien genommen, die die Emissionsreduktion durch die Anwendung von 'Precision Livestock Farming' untersuchten.^{5,6}

Marktdurchdringungsraten

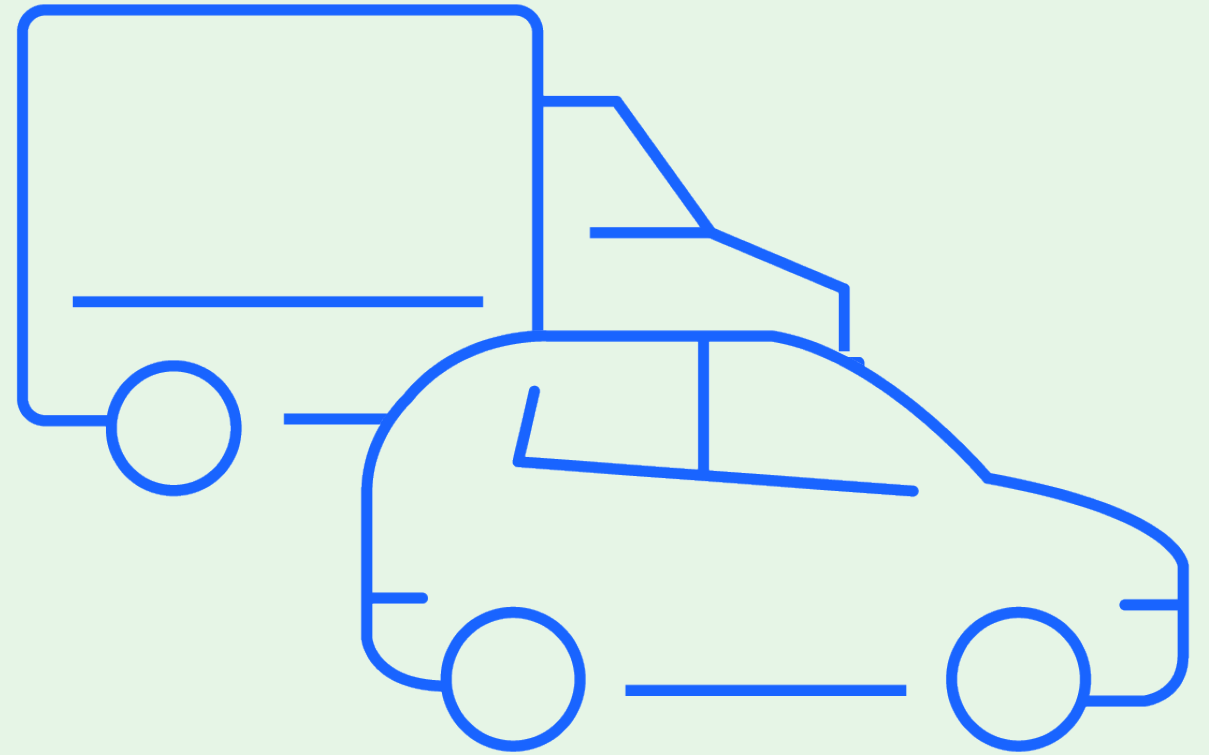
Die Marktdurchdringung ist definiert als der Anteil der Landwirtinnen und Landwirte, die Tiermanagement- und Überwachungssysteme implementiert haben.

- **2023:** Zur Kalkulation der Marktdurchdringung im Jahr 2023 wurde ein Mittelwert von vier Datenpunkten aus zwei Studien verwendet.^{7,8}
- **2030 Standard:** Zur Kalkulation der projizierten Marktdurchdringung im Jahr 2030 bei einer Standard-Digitalisierung wurde eine Wachstumsrate auf die heutige Marktdurchdringung angewandt. Die verwendete Wachstumsrate ist die des Markts für Tierüberwachungssysteme in Deutschland.⁹

- **2030 Beschleunigt:** Zur Berechnung der projizierten Marktdurchdringung im Jahr 2030 bei einer beschleunigten Marktdurchdringung wurde eine Wachstumsrate auf die aktuelle Marktdurchdringung angewandt. Die verwendete Wachstumsrate stammt aus dem globalen Markt für Melkautomatisierungssysteme.¹⁰ Melkautomatisierungssysteme sind eine der ersten Präzisionstechnologien, die für die Nutztierhaltung entwickelt wurden¹¹ und werden heute als etablierte Technologie betrachtet.¹² Die Präzisionsfütterung und Melkautomatisierungssysteme sind beide wichtige Bestandteile der Präzisionsnutztierhaltung und werden daher in akademischen Kreisen oft zusammen erwähnt.¹¹ Zudem können diese Technologien gemeinsam eingesetzt werden.¹¹ Da diese Technologien eng miteinander verwandt sind, die Melkautomatisierungssysteme aber weiter entwickelt sind als die Präzisionsfütterung, wurde die Annahme getroffen, dass die beschleunigte Marktdurchdringung der Präzisionsfütterung der der Melkautomatisierungssysteme folgen wird.

8.5

Verkehr



Zusammenfassung der Anwendungsfälle (1/2)

CO ₂ e-Projektion und Digitalisierungsgeschwindigkeit	Anwendungsfall	CO ₂ e-Projektion 2030	CO ₂ e-Einsparpotenzial (brutto)	CO ₂ e-Einsparpotenzial (netto)	Rel. netto CO ₂ e-Einsparpotenzial (vs. Projektion)	Rel. netto CO ₂ e-Einsparpotenzial (vs. Klimalücke)	CO ₂ e-Fußabdruck der Technologie	Spezifisches Reduktionspotenzial	Marktdurchdringung 2023	Marktdurchdringung 2030	
		In MT	In MT	In MT	In Prozent	In Prozent	In MT CO ₂ e	In Prozent	In Prozent	In Prozent	
CO ₂ e-Projektion: Hoch	Standard Digitalisierung	Gesamt	174,06	3,86	3,47	2,0%	1,1%	0,39			
		Ride-Sharing	92,30	0,0018	0,0017	0,002%		0,0001	20%	0,01%	0,02%
		Car-Sharing	18,60	0,0018	0,0017	0,009%		0,0002	17%	0,35%	0,41%
		Digitale Pkw-Routenoptimierung	92,02	2,37	2,21	2,4%	0,7%	0,16	22%	70%	82%
		Digitales öffentliches Verkehrsnetz	92,30	0,31	0,21	0,2%	0,1%	0,10	5%	18%	25%
		Digitale Lkw-Routenoptimierung	63,16	1,18	1,05	1,7%	0,3%	0,13	21%	37%	46%
	Beschleunigte Digitalisierung	Gesamt	174,06	10,27	9,13	5,2%	3,0%	1,13			
		Ride-Sharing	92,30	0,0072	0,0067	0,007%		0,0005	20%	0,01%	0,05%
		Car-Sharing	18,60	0,0307	0,0282	0,152%		0,0026	17%	0,35%	1,35%
		Digitale Pkw-Routenoptimierung	92,02	5,00	4,66	5,1%	1,5%	0,35	22%	70%	95%
		Digitales öffentliches Verkehrsnetz	92,30	1,18	0,83	0,9%	0,3%	0,35	5%	18%	43%
Digitale Lkw-Routenoptimierung	63,16	4,05	3,61	5,7%	1,2%	0,43	21%	37%	68%		
CO ₂ e-Projektion: Mittel	Standard Digitalisierung	Gesamt	168,86	3,73	3,49	2,1%	1,1%	0,24			
		Ride-Sharing	87,90	0,0017	0,0016	0,002%		0,0001	20%	0,01%	0,02%
		Car-Sharing	18,04	0,0018	0,0014	0,008%		0,0004	17%	0,35%	0,41%
		Digitale Pkw-Routenoptimierung	87,63	2,26	2,16	2,5%	0,7%	0,10	22%	70%	82%
		Digitales öffentliches Verkehrsnetz	87,90	0,29	0,23	0,3%	0,1%	0,06	5%	18%	25%
		Digitale Lkw-Routenoptimierung	62,92	1,17	1,09	1,7%	0,4%	0,08	21%	37%	46%
	Beschleunigte Digitalisierung	Gesamt	168,86	9,95	9,25	5,5%	3,0%	0,70			
		Ride-Sharing	87,90	0,0069	0,0066	0,007%		0,0003	20%	0,01%	0,05%
		Car-Sharing	18,04	0,0298	0,0227	0,126%		0,0072	17%	0,35%	1,35%
		Digitale Pkw-Routenoptimierung	87,63	4,76	4,55	5,2%	1,5%	0,21	22%	70%	95%
		Digitales öffentliches Verkehrsnetz	87,90	1,12	0,91	1,0%	0,3%	0,21	5%	18%	43%
Digitale Lkw-Routenoptimierung	62,92	4,03	3,77	6,0%	1,2%	0,26	21%	37%	68%		

Zusammenfassung der Anwendungsfälle (2/2)

CO ₂ e-Projektion und Digitalisierungsgeschwindigkeit	Anwendungsfall	CO ₂ e-Projektion 2030	CO ₂ e-Einsparpotenzial (brutto)	CO ₂ e-Einsparpotenzial (netto)	Rel. netto CO ₂ e-Einsparpotenzial (vs. Projektion)	Rel. netto CO ₂ e-Einsparpotenzial (vs. Klimalücke)	CO ₂ e-Fußabdruck der Technologie	Spezifisches Reduktionspotenzial	Marktdurchdringung 2023	Marktdurchdringung 2030	
		In MT	In MT	In MT	In Prozent	In Prozent	In MT CO ₂ e	In Prozent	In Prozent	In Prozent	
CO ₂ e-Projektion: Niedrig	Standard Digitalisierung	Gesamt	158,74	3,49	3,41	2,1%	1,1%	0,09			
		Ride-Sharing	82,82	0,0016	0,0016	0,002%		0,0000	20%	0,01%	0,02%
		Car-Sharing	17,48	0,0017	0,0010	0,006%		0,0007	17%	0,35%	0,41%
		Digitale Pkw-Routenoptimierung	82,55	2,13	2,10	2,5%	0,7%	0,04	22%	70%	82%
		Digitales öffentliches Verkehrsnetz	82,82	0,27	0,25	0,3%	0,1%	0,02	5%	18%	25%
		Digitale Lkw-Routenoptimierung	58,45	1,09	1,06	1,8%	0,3%	0,03	21%	37%	46%
	Beschleunigte Digitalisierung	Gesamt	158,74	9,33	9,07	5,7%	2,9%	0,26			
		Ride-Sharing	82,82	0,006	0,006	0,008%		0,0001	20%	0,01%	0,05%
		Car-Sharing	17,48	0,029	0,017	0,098%		0,0118	17%	0,35%	1,35%
		Digitale Pkw-Routenoptimierung	82,55	4,49	4,41	5,3%	1,4%	0,08	22%	70%	95%
		Digitales öffentliches Verkehrsnetz	82,82	1,06	0,98	1,2%	0,3%	0,08	5%	18%	43%
		Digitale Lkw-Routenoptimierung	58,45	3,74	3,65	6,2%	1,2%	0,09	21%	37%	68%

Übersicht über die Anwendungsfälle, Hebel und adressierbare Emissionen

1. Vernetzter Individualverkehr

Das Einsparpotenzial des vernetzten Individualverkehrs wird aus zwei Wirkungshebeln errechnet. Zur Kalkulation des Einsparpotenzials des Anwendungsfalls wurde das Einsparpotenzial der Hebel separat kalkuliert und aufaddiert.

Hebel	Anwendungen des Hebels	Adressierbare Emissionsprojektionen
Ride-Sharing	Geteilte Routen	Emissionen aus der Pkw-Fahrleistung
Car-Sharing	Geteilte Pkws	Emissionen aus der Produktion von Pkws

2. Digitales Verkehrsnetz und -optimierung

Das Einsparpotenzial der Verkehrssteuerung und -optimierung wird aus zwei Wirkungshebeln errechnet. Zur Kalkulation des Einsparpotenzials des Anwendungsfalls wurde das Einsparpotenzial der Hebel separat kalkuliert und auf addiert.

Hebel	Anwendungen des Hebels	Adressierbare Emissionsprojektionen
Digitales öffentliches Verkehrsnetz	Umstieg vom Pkw auf öffentliche Verkehrsmittel	Emissionen aus der Pkw-Fahrleistung
Digitale Pkw-Routenoptimierung	Effizientere Routenplanung und -ausführung	Emissionen aus der Pkw-Fahrleistung (exklusive Reduktion durch Ride-Sharing und dem vernetzten öffentlichen Verkehrsnetz)

3. Digitale Routen- und Frachtoptimierung im Lkw-Güterverkehr

Das Einsparpotenzial der digitalen Routen- und Frachtoptimierung im Lkw-Verkehr wird aus einem Wirkungshebel errechnet.

Hebel	Anwendungen des Hebels	Adressierbare Emissionsprojektionen
Digitale Routen- und Frachtoptimierung im Lkw-Verkehr	Reduktion von Fahrstrecken, Tonnenkilometern; Erhöhung von Fahrzeugauslastungen	Emissionen aus der Lkw-Fahrleistung

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

1. Vernetzter Individualverkehr – Ride-Sharing (1/2)

CO₂e-Projektionen

Die Emissionsprojektionen für das Jahr 2030 wurden für drei CO₂e-Projektionen berechnet. Die CO₂e-Projektionen basieren auf den Emissionen aus der Fahrleistung von Personenkraftwagen mit Verbrennungsmotor (konventionelle Pkws) und Elektro-Pkws (E-Pkws) in Deutschland.

- Hohe CO₂e-Projektion: Die hohe CO₂e-Projektion von 92,30 MT CO₂e basiert auf der Annahme, dass die Anteile der Fahrleistung von konventionellen und E-Pkws dieselben sind wie heute. In dieser CO₂e-Projektion ist der Anteil von E-Pkws am niedrigsten der drei CO₂e-Projektionen. Die CO₂e-Projektion der Emissionen stammt aus der projizierten Fahrleistung von konventionellen Pkws und E-Pkws in Deutschland sowohl wie Emissionsfaktoren pro Kilometer je Pkw-Art.
 - Die projizierten Anteile von konventionellen und E-Pkws an der Pkw-Fahrleistung basieren auf den projizierten Anteilen von konventionellen und E-Pkws am Pkw-Bestand Ende 2030. Hier wurde die Annahme getroffen, dass der Anteil dieser Fahrzeugarten an den jährlichen Neuzulassungen konstant bleibt. Zur Kalkulation der projizierten Neuzulassungen von konventionellen Pkws pro Jahr wurden die gesamten projizierten Neuzulassungen im Jahr¹ mit dem Anteil von konventionellen Pkws an den Neuzulassungen 2022² multipliziert. Diese Anzahl an neuzugelassenen konventionellen Pkws wurden dann zu dem Bestand konventioneller Pkws addiert. Von dieser Zahl wurde der Anteil von Pkws die jährlich außer Betrieb gesetzt werden³ abgezogen, um den Bestand am Ende des Jahres zu kalkulieren. Diese Kalkulation wurde für jedes Jahr bis Ende 2030 durchgeführt. Die gleiche Kalkulationslogik wurde für E-Pkws angewendet.
 - Zur Kalkulation der Projektion der Fahrleistung aus konventionellen Pkws wurde die erwartete gesamte Jahresfahrleistung im Jahr 2030 von dem UBA¹ mit dem kalkulierten Anteil von konventionellen Pkws am Pkw-Bestand multipliziert. Die gleiche Kalkulation wurde für E-Pkws ausgeführt.
- Zur Kalkulation des Emissionsfaktors für konventionelle Pkws wurde zuerst der Anteil von Pkws mit Diesel- und Benzinmotoren an der Fahrleistung von konventionellen Pkws kalkuliert (Stand 2022).⁴ Es wurde angenommen, dass dieser Anteil bis 2030 unverändert bleibt. Der jeweilige Anteil wurde mit den CO₂e-Emissionen pro Kilometer je Antriebsart⁵ multipliziert. Es wurde angenommen, dass dieser Emissionsfaktor bis 2030 gleich bleibt.
- Zur Kalkulation des Emissionsfaktors für E-Pkws wurde der Stromverbrauch (kWh/km) von E-Pkws⁶ mit den CO₂e-Emissionen pro Kilowattstunde von der hohen CO₂e-Projektion aus dem Energiesektor (siehe Annahmen Energiesektor, Kapitel 8.1) multipliziert. Es wurde angenommen, dass der spezifische Stromverbrauch von E-Pkws bis 2030 gleich bleibt.
- Mittlere CO₂e-Projektion: Zur Kalkulation der mittleren CO₂e-Projektion (87,90 MT CO₂e) wird die Fahrleistung von konventionellen und E-Pkws auf Basis von den Mittelwerten der Anteile der Fahrzeugarten an dem Pkw-Bestand der hohen und niedrigen CO₂e-Projektionen berechnet. Der Emissionsfaktor für konventionelle Pkws ist der gleiche wie in der hohen CO₂e-Projektion. Zur Kalkulation des Emissionsfaktors für E-Pkws wurden die Emissionen pro Kilowattstunde aus der mittleren CO₂e-Projektion des Energiesektors genutzt.
- Niedrige CO₂e-Projektion: Die niedrige CO₂e-Projektion von 82,82 MT CO₂e basiert auf der Annahme, dass der Anteil der Fahrleistung von konventionellen Pkws und E-Pkws im gleichen Verhältnis steht wie der von dem UBA projizierte Anteil von konventionellen Pkws und E-Pkws am Pkw-Bestand Ende 2030.¹ Der Emissionsfaktor für konventionelle Pkws ist der gleiche wie in der hohen CO₂e-Projektion. Zur Kalkulation des Emissionsfaktors für E-Pkws wurden die Emissionen pro Kilowattstunde aus der niedrigen CO₂e-Projektion des Energiesektors genutzt.

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

1. Vernetzter Individualverkehr – Ride-Sharing (2/2)

CO₂e-Einsparpotenziale

Das Netto-Einsparpotenzial ergibt sich aus dem Brutto-Einsparpotenzial minus den Fußabdruck der angewendeten Technologie. Das Brutto-Einsparpotenzial ergibt sich aus der Multiplikation von der CO₂e-Projektion, Reduktionspotenzial und Marktdurchdringungsdelta. Das Marktdurchdringungsdelta ist die Differenz der Marktdurchdringung 2030 und Marktdurchdringung 2023. Beispielhaft für die hohe CO₂e-Projektion und die Standard-Digitalisierungsgeschwindigkeit:

Netto CO₂e-Einsparpotenzial = 2,77 KT CO₂e – 0,02 KT CO₂e = 2,75 KT CO₂e

Brutto CO₂e-Einsparpotenzial = 92,3 MT CO₂e x 20% x (0,02% – 0,01%) = 2,77 KT CO₂e

Reduktionspotenzial

Das Reduktionspotenzial umfasst die Reduktion der Fahrleistung von Pkws in Deutschland. Es ergibt sich aus dem Mittelwert von drei Studien.^{1,2,3}

Marktdurchdringungsraten

Die Marktdurchdringung ist definiert als Anteil der Personenkilometer in Deutschland, die durch Ride-Sharing erfüllt werden.

- **2023:** Die Marktdurchdringung wurde aus einer Studie der Expertenkommission Forschung und Innovation des Fraunhofer Instituts⁴ herangezogen.
- **2030 Standard:** Die projizierte Marktdurchdringung im Jahr 2030 für die Standard-Digitalisierung basiert auf dem Anteil der Personenkilometer in Deutschland, die durch Ride-Sharing im Jahr 2030 in der hohen CO₂e-Projektion derselben Studie der Expertenkommission Forschung und Innovation des Fraunhofer Instituts⁴ erfüllt werden. Diese CO₂e-Projektion ist ein Referenzszenario des Markthochlaufs bis 2030 ohne weitere Maßnahmen oder Veränderung im Angebot des Ride-Sharings.

- **2030 Beschleunigt:** Die projizierte Marktdurchdringung im Jahr 2030 für die beschleunigte Digitalisierung basiert auf dem Anteil der Personenkilometer in Deutschland, die durch Ride-Sharing im Jahr 2030 in der hohen CO₂e-Projektion derselben Studie der Expertenkommission Forschung und Innovation des Fraunhofer Instituts⁴ erfüllt werden. In dieser CO₂e-Projektion wird ein extremer Markthochlauf von Ride-Sharing modelliert. Dieser Markthochlauf kommt aus einem dynamischen Fahrzeugangebot und einem deutlich sinkenden Preis für Ride-Sharing sowohl wie die Umfeldfaktoren „Pkw-Abgaben“ (steigende Preise der Pkw-Nutzung wie City-Maut und Parkgebühren) und „Umwelt Preise“ (Internalisierung von Umweltkosten durch einen CO₂-Preis, Benzinsteuern usw.).

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

2. Vernetzter Individualverkehr – Car-Sharing (1/2)

CO₂e-Projektionen

Die Emissionsprojektionen für das Jahr 2030 wurden für drei CO₂e-Projektionen berechnet. Die CO₂e-Projektionen basieren auf den Emissionen aus der Produktion von konventionellen Pkws und E-Pkws in Deutschland.

- Hohe CO₂e-Projektion: Die hohe CO₂e-Projektion von 17,56 MT CO₂e basiert auf der Annahme, dass die Anteile des Pkw-Bestandes Ende 2030 von konventionellen Pkws und E-Pkws dieselben sind wie heute. In dieser CO₂e-Projektion ist der Anteil von E-Pkws am niedrigsten der drei CO₂e-Projektionen. Die CO₂e-Projektion der Emissionen resultiert (1) aus dem projizierten Pkw-Bestand von konventionellen Pkws und E-Pkws in Deutschland sowie (2) aus den Emissionen, die bei der Produktion (pro Pkw-Art) eines Pkws emittiert werden.
 - Zur Kalkulation der projizierten Anteile von konventionellen und E-Pkws am Pkw-Bestand Ende 2030 wurde die Annahme getroffen, dass der Anteil dieser Fahrzeugarten an den jährlichen Neuzulassungen konstant bleibt. Zur Kalkulation der projizierten Neuzulassungen von konventionellen Pkws pro Jahr wurden die gesamten projizierten Neuzulassungen im Jahr¹ mit dem Anteil von konventionellen Pkws an den Neuzulassungen 2022² multipliziert. Diese Anzahl an neuzugelassenen konventionellen Pkws wurden dann zu dem Bestand konventioneller Pkws addiert. Von dieser Zahl wurde der Anteil von Pkws die jährlich außer Betrieb gesetzt werden³ abgezogen, um den Bestand am Ende des Jahres zu kalkulieren. Diese Kalkulation wurde für jedes Jahr bis Ende 2030 durchgeführt. Die gleiche Kalkulationslogik wurde für E-Pkws angewendet.
 - Zur Kalkulation des Emissionsfaktors der Produktion von konventionellen Pkws wurden die Emissionen, die bei der Produktion eines konventionellen Pkws ausgestoßen werden⁴, durch die durchschnittliche Lebensdauer eines modernen Fahrzeugs in Westeuropa dividiert.⁵ Die gleiche Kalkulation wurde für E-Pkws ausgeführt.^{4,5} Da die Produktion von E-Pkws mehr Emissionen ausstößt als die Produktion von konventionellen Pkws ist die CO₂e-Projektion für 2030 für Car-Sharing in der hohen CO₂e-Projektion am niedrigsten.
 - Zur Kalkulation des Emissionsfaktors für E-Pkws wurde der Stromverbrauch (kWh/km) von E-Pkws⁶ mit den CO₂e-Emissionen pro Kilowattstunde von der hohen CO₂e-Projektion aus dem Energiesektor (siehe Annahmen Energiesektor, Kapitel 8.1) multipliziert. Es wurde angenommen, dass der Stromverbrauch von E-Pkws bis 2030 gleich bleibt.
- Mittlere CO₂e-Projektion: Zur Kalkulation der mittleren CO₂e-Projektion (18,08 MT CO₂e) wird ein Mittelwert der Anteile von konventionellen und E-Pkws an dem Pkw-Bestand von der hohen und niedrigen CO₂e-Projektion berechnet, um einen ausgewogenen Ausblick auf die möglichen Emissionen im Jahr 2030 zu geben. Die Emissionsfaktoren für konventionelle Pkws und E-Pkws sind die gleichen wie in der hohen CO₂e-Projektion.
- Niedrige CO₂e-Projektion: Die niedrige CO₂e-Projektion von 18,60 MT CO₂e basiert auf den projizierten Anteilen von konventionellen Pkws und E-Pkws des Pkw-Bestandes Ende 2030 von dem UBA-Projektionsbericht 2030.¹ Die Emissionsfaktoren für konventionelle Pkws und E-Pkws sind die gleichen wie in der hohen CO₂e-Projektion.

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

2. Vernetzter Individualverkehr – Car-Sharing (2/2)

CO₂e-Einsparpotenziale

Das Netto-Einsparpotenzial ergibt sich aus dem Brutto-Einsparpotenzial minus den Fußabdruck der angewendeten Technologie. Das Brutto-Einsparpotenzial ergibt sich aus der Multiplikation von Emissionsprojektion, Reduktionspotenzial und Marktdurchdringungsdelta. Das Marktdurchdringungsdelta ist die Differenz der Marktdurchdringung 2030 und Marktdurchdringung 2023. Beispielhaft für die hohe CO₂e-Projektion und die Standard-Digitalisierungsgeschwindigkeit:

Netto CO₂e-Einsparpotenzial = 1,84 KT CO₂e – 0,13 KT CO₂e = 1,71 KT CO₂e

Brutto CO₂e-Einsparpotenzial = 18,60 MT CO₂e x 16,5% x (0,41% – 0,35%) = 1,84 KT CO₂e

Reduktionspotenzial

Das Reduktionspotenzial umfasst die Reduktion des Pkw-Besitzes bei Nutzerinnen und Nutzern von Car-Sharing und inkludiert die Erhöhung des Pkw-Bestands durch die kürzere Lebensdauer von Car-Sharing Pkws. Die Reduktion des Pkw-Besitzes ergibt sich aus dem Mittelwert von fünf Studien.¹⁻⁵ Diese Zahl wurde mit der Erhöhung des Pkw-Bestands durch die kürzere Lebensdauer von Car-Sharing Pkws multipliziert, welche aus der durchschnittlichen Lebensdauer von Car-Sharing Pkws kalkuliert wurde⁶.

Marktdurchdringungsraten

Die Marktdurchdringung ist definiert als Anteil der Personenkilometer in Deutschland, die durch Car-Sharing erfüllt werden.

- **2023:** Die Marktdurchdringung wurde aus einer Studie der Expertenkommission Forschung und Innovation des Fraunhofer Instituts⁷ herangezogen.

- **2030 Standard:** Die projizierte Marktdurchdringung im Jahr 2030 für die Standard-Digitalisierung basiert auf dem Anteil der Personenkilometer in Deutschland, die durch Car-Sharing im Jahr 2030 in der hohen CO₂e-Projektion derselben Studie der Expertenkommission Forschung und Innovation des Fraunhofer Instituts⁷ erfüllt werden. Diese CO₂e-Projektion ist ein Referenzszenario des Markthochlaufs bis 2030 ohne weitere Maßnahmen oder Veränderung im Angebot des Car-Sharings.
- **2030 Beschleunigt:** Die projizierte Marktdurchdringung im Jahr 2030 für die beschleunigte Digitalisierung basiert auf dem Anteil der Personenkilometer in Deutschland, die durch Car-Sharing im Jahr 2030 in der hohen CO₂e-Projektion derselben Studie der Expertenkommission Forschung und Innovation des Fraunhofer Instituts⁷ erfüllt werden. In dieser CO₂e-Projektion wird ein starker Markthochlauf von Car-Sharing modelliert. Dieser Markthochlauf resultiert aus einem dynamischen Fahrzeugangebot und einem deutlich sinkenden Preis für Car-Sharing sowie den Faktoren „Pkw-Abgaben“ (steigende Preise der Pkw-Nutzung wie City-Maut und Parkgebühren) und „Umweltpreise“ (Internalisierung von Umweltkosten durch einen CO₂-Preis, Benzinsteuer usw.).

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

3. Digitales Verkehrsnetz und -optimierung – digitales öffentliches Verkehrsnetz (1/2)

CO₂e-Projektionen

Die Emissionsprojektionen für das Jahr 2030 wurden für drei CO₂e-Projektionen berechnet. Die CO₂e-Projektionen basieren auf den Emissionen aus der Fahrleistung von konventionellen und E-Pkws in Deutschland. Die Kalkulationen dieser CO₂e-Projektionen sind dieselben wie für Ride-Sharing. Eine detaillierte Erklärung dieser Kalkulationen finden Sie in der Zusammenfassung der Berechnungen für Ride-Sharing.

- Hohe CO₂e-Projektion: Die hohe CO₂e-Projektion von 92,30 MT CO₂e basiert auf der Annahme, dass die Anteile der Pkw-Neuzulassungen von konventionellen Pkws und E-Pkws dieselben sind wie heute.
- Mittlere CO₂e-Projektion: Zur Kalkulation der mittleren CO₂e-Projektion (87,90 MT CO₂e) wird ein Mittelwert der Anteile von konventionellen und E-Pkws an dem Pkw-Bestand der hohen und niedrigen CO₂e-Projektionen berechnet.
- Niedrige CO₂e-Projektion: Die niedrige CO₂e-Projektion von 82,82 MT CO₂e basiert auf den projizierten Anteilen von konventionellen Pkws und E-Pkws des Pkw-Bestandes Ende 2030 von dem UBA-Projektionsbericht 2030.¹

CO₂e-Einsparpotenzial:

Das Netto-Einsparpotenzial ergibt sich aus dem Brutto-Einsparpotenzial minus den Fußabdruck der angewendeten Technologie. Das Brutto-Einsparpotenzial ergibt sich aus der Multiplikation von der CO₂e-Projektion, Reduktionspotenzial und Marktdurchdringungsdelta. Das Marktdurchdringungsdelta ist die Differenz der Marktdurchdringung 2030 und Marktdurchdringung 2023. Beispielhaft für die niedrige CO₂e-Projektion und die Standard-Marktdurchdringungsrate:

Netto CO₂e-Einsparpotenzial = 0,07 MT CO₂e – 0,004 MT CO₂e = 0,069 MT CO₂e

Brutto CO₂e-Einsparpotenzial = 82,82 MT CO₂e x 5,3% x (17,4% – 15,8%) = 0,073 MT CO₂e

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

3. Digitales Verkehrsnetz und -optimierung – digitales öffentliches Verkehrsnetz (2/2)

Reduktionspotenzial

Das Reduktionspotenzial umfasst die Reduktion der Fahrleistung von Pkws in Deutschland. Ein Mittelwert von zwei Studien^{1,2} wurde kalkuliert und mit einer Abschätzung des Anteils des Wachstums im öffentlichen Verkehr, der durch digitale Technologien entsteht³, multipliziert.

Marktdurchdringungsraten

Die Marktdurchdringung der Digitalisierung im öffentlichen Verkehrsnetz wird über den Erfolgsindikator ermittelt, inwiefern Bürgerinnen und Bürger in Deutschland öffentliche Verkehrsmittel wie Busse, Züge und ähnliche Transportmittel nutzen. Letztlich muss sich eine erfolgreiche Digitalisierung auch in der Akzeptanz und in der Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel niederschlagen.

- **2023:** Auf Basis der BMDV-Zahlen in „Verkehr in Zahlen 2023/2024“ wurde anhand einer Trendextrapolation zwischen 2014-2022 der Anteil beförderter Personen, die Eisenbahnverkehre, öffentliche Straßenpersonenverkehre und inländische Flugverkehre genutzt haben, mit ca. 18% berechnet.⁴ In dieser Trendextrapolation wurden Corona-Pandemie-bedingte Abweichungen für die Jahre 2020/2021 geglättet.
- **2030 Standard:** Für das Jahr 2030 wird prognostiziert, dass 25% der beförderten Personen den Eisenbahnverkehr, öffentlichen Straßenpersonenverkehr sowie inländische Flugverkehre in Anspruch nehmen werden. Diese Prognose basiert auf einer Trendextrapolation, die das Verkehrsaufkommen der Jahre 2014 bis 2022 zugrunde legt, wie im BMDV-Bericht „Verkehr in Zahlen 2023/2024“ aufgeführt. Dabei wurden Schwankungen, die durch die Corona-Pandemie in den Jahren 2020 und 2021 entstanden sind, ebenfalls angeglichen.⁴

- **2030 Beschleunigt:** Für die beschleunigte Marktdurchdringung wurde eine internationale Trendstudie für 2035 herangezogen, die u.a. auf Basis führender Länder und Städte den weltweiten Mobilitätssplit für 2035 prognostiziert.⁵ Auf Basis dieser Studie wurde eine vereinfachte Trendextrapolation vorgenommen und für die beschleunigte Digitalisierung eine Marktdurchdringung von 43% abgeleitet. Diese Prognose inkludiert neben den o.g. Verkehrsmitteln auch Verkehrskonzepte der Mikromobilität. Ein Katalysator für die beschleunigte Marktdurchdringung in Deutschland ab 2024 kann die neue Richtlinie zur Einführung intelligenter Verkehrssysteme des Europäischen Parlaments und des Rates sein.⁶

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

4. Verkehrsteuerung und -optimierung – Digitale Routenoptimierung im Pkw-Verkehr (1/2)

CO₂e-Projektionen

Die Emissionsprojektionen für das Jahr 2030 wurden für drei CO₂e-Projektionen berechnet. Die CO₂e-Projektionen basieren auf den Emissionen aus der Fahrleistung von konventionellen und E-Pkws in Deutschland. Die CO₂e-Projektionen inkludieren die Reduktion der Fahrleistung durch Ride-Sharing und dem vernetzten öffentlichen Verkehrsnetz.

- Hohe CO₂e-Projektion: Die hohe CO₂e-Projektion von 92,22 MT CO₂e basiert auf der Annahme, dass die Anteile von konventionellen und E-Pkws an den Neuzulassungen konstant bleibt. Für diese CO₂e-Projektion wurden von den projizierten Jahresfahrleistungen im Jahr 2030 pro Pkw-Art (Siehe Kalkulationslogik von der hohen CO₂e-Projektion von Ride-Sharing) die Reduktionen an der Fahrleistung durch Ride-Sharing und dem vernetzten öffentlichen Verkehrsnetz von der hohen CO₂e-Projektion dieser Anwendungsfälle abgezogen.
- Mittlere CO₂e-Projektion: Zur Kalkulation der mittleren CO₂e-Projektion (87,83 MT CO₂e) wurde die gleiche Berechnungslogik angewendet wie bei der hohen CO₂e-Projektion.
- Niedrige CO₂e-Projektion: Zur Kalkulation der niedrigen CO₂e-Projektion (82,75 MT CO₂e) wurde die gleiche Berechnungslogik angewendet wie bei der hohen CO₂e-Projektion.

CO₂e-Einsparpotenzial

Das Netto-Einsparpotenzial ergibt sich aus dem Brutto-Einsparpotenzial minus den Fußabdruck der angewendeten Technologie. Das Brutto-Einsparpotenzial ergibt sich aus der Multiplikation von der CO₂e-Projektion, Reduktionspotenzial und Marktdurchdringungsdelta. Das Marktdurchdringungsdelta ist die Differenz der Marktdurchdringung 2030 und Marktdurchdringung 2023. Beispielhaft für die niedrige CO₂e-Projektion und die Standard-Marktdurchdringungsrate:

Netto CO₂e-Einsparpotenzial = 2,13 MT CO₂e – 0,03 MT CO₂e = 2,10 MT CO₂e

Brutto CO₂e-Einsparpotenzial = 82,75 MT CO₂e x 22% x (82% – 70%) = 2,13 MT CO₂e

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

4. Verkehrsteuerung und -optimierung – Digitale Routenoptimierung im Pkw-Verkehr (2/2)

Reduktionspotenzial

Das Reduktionspotenzial umfasst die Reduktion der Fahrleistung von Pkws in Deutschland. Es ergibt sich aus dem Mittelwert von vier Studien.¹⁻⁴

Marktdurchdringungsraten

Die Marktdurchdringung ist definiert als Anteil der Personen in Deutschland mit Fahrerlaubnis die Navigationssysteme mit Live-Traffic Informationen nutzen.⁵

- **2023:** Die Marktdurchdringung basiert auf Daten aus einer Bitkom-Umfrage. Aus der Umfrage stammen zwei Datenpunkte: der Anteil von Personen die Mobile Apps zur Navigation nutzen und der Anteil von Personen die feste Navigationsgeräte nutzten. Der Anteil der Personen mit festen Navigationsgeräten wurde reduziert, da nicht alle festen Navigationsgeräte Live-Traffic Information enthalten. Da Pkws seit circa 14 Jahren feste Navigationssysteme mit Live-Traffic Information haben⁶, wurde der Anteil von Personen die feste Navigationsgeräte nutzen mit dem Anteil von Pkws (nicht älter als 14 Jahre) multipliziert.⁷
- **2030 Standard:** Die projizierte Marktdurchdringung im Jahr 2030 für die Standard-Digitalisierung basiert auf der Trendextrapolation der o.g. zwei Schätzparameter. Bei den Pkws wurden zusätzlich die prognostizierten Neuzulassungen und Abmeldungen bis 2030 berücksichtigt.⁸
- **2030 Beschleunigt:** Die projizierte Marktdurchdringung im Jahr 2030 für die beschleunigte Digitalisierung basiert auf der Annahme, dass Navigationssysteme die volle Marktdurchdringung erreichen. Diese wird in akademischen Kreisen als 95% definiert.⁹

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

5. Digitale Routen- und Frachtoptimierung im Lkw-Güterverkehr (1/2)

CO₂e-Projektionen

Für die differenzierte Betrachtung der möglichen Emissionsprognosen im Jahr 2030 wurden drei CO₂e-Projektionen erstellt.

Die CO₂e-Projektionen basieren auf den Emissionen aus der Fahrleistung von Lastkraftwagen folgender drei Gewichtsklassen gemäß Kraftfahrt-Bundesamt: bis zulässigem Gesamtgewicht (1) bis 2,8t, (2) zwischen 2,8–3,5t sowie (3) zwischen 3,5t bis 20t und mehr.¹

Nach Antriebsart der Lkws werden für die Projektionen zwei Typen unterschieden: (1) Verbrennungsmotoren (konventionelle Diesel-Lkws) und (2) Elektro-Lkws (E-Lkws).

Die Berechnung der Emissionen ist bei den Antriebsarten unterschiedlich: Bei Diesel-Lkws kann der durchschnittliche Emissionsfaktor pro Tonnenkilometer i.H.v. 118 g CO₂e pro Tonnenkilometer (tkm) herangezogen werden.² Bei E-Lkws erfolgt die Emissionsberechnung über den Energieverbrauch in Kilowattstunde (kWh) multipliziert mit den CO₂e-Projektions-spezifischen CO₂e-Emissionen pro Kilowattstunde. Für E-Lkws werden durchschnittlich 110 kWh/100 km herangezogen.³

Weitere Inputparameter für die Berechnung der CO₂e-Projektionen sind (1) die gemäß UBA angenommene Güterverkehrsnachfrage i.H.v. 532,9 Mrd. Tonnenkilometern in 2030 sowie (2) die berechnete Gesamtverkehrsstrecke von durchschnittlich 224 Mrd. Kilometern in 2030 (unter der Annahme einer durchschnittlichen Fahrzeugkapazität von 4,3t pro Fahrzeug (ermittelten aus der heutigen, gemäß Kraftfahrt-Bundesamt, bestandsbasierten gewichteten Gewichtsklassenverteilung und einer durchschnittlichen Fahrzeugauslastung von 55%) – $[532,9 \text{ Mrd. tkm} / 4,32 \text{ t} / 0,55 = 225 \text{ Mrd. km}]$.^{4,1}

Aus den o.g. und pro Projektion weiter differenzierten Inputparametern wurden folgende CO₂e-Projektionen entwickelt:

- Hohe CO₂e-Projektion: Zusätzlich zu den o.g. Inputparametern wird die heutige Verteilung der Antriebsarten angenommen: 99% Diesel-Lkws, 1% E-Lkws. Hieraus ergibt sich die hohe CO₂e-Projektion i.H.v. 63,16 MT CO₂e.
- Mittlere CO₂e-Projektion: Zusätzlich zu den o.g. Inputparametern wird aus den beiden Projektionen hoch und niedrig der Mittelwert der Verteilung der Antriebsarten angenommen, um einen moderaten Ausbau der E-Lkws zu simulieren: 94% Diesel-Lkws, 6% E-Lkws. Hieraus ergibt sich die mittlere CO₂e-Projektion i.H.v. 62,92 MT CO₂e.
- Niedrige CO₂e-Projektion: Zusätzlich zu den o.g. Inputparametern wird die vom UBA für 2030 projizierte Verteilung der Antriebsarten angenommen: 89% Diesel-Lkws, 11% E-Lkws. Hieraus ergibt sich die niedrige CO₂e-Projektion i.H.v. 58,45 MT CO₂e.

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

5. Digitale Routen- und Frachtoptimierung im Lkw-Güterverkehr (2/2)

CO₂e Reduktionspotenzial

Das spezifische Reduktionspotenzial bezieht sich auf die Verringerung von Fahrstrecken und Tonnenkilometern durch den Einsatz der im Sektorkapitel beschriebenen digitalen Lösungen. Das Reduktionspotenzial von 21% wurde nach Untersuchung mehrerer wissenschaftlicher Arbeiten und Branchenpublikationen sowie Befragungen von Expertinnen und Experten hergeleitet.^{1,2}

Marktdurchdringungsraten

Die Marktdurchdringung wird als Prozentsatz der Unternehmen definiert, die digitale Routen- und Frachtoptimierung zur Verringerung von Fahrstrecken und Tonnenkilometern implementieren. Für alle drei Marktdurchdringungsraten, wurden Daten aus verschiedenen Studien konsolidiert. In Fällen, in denen die Marktdurchdringungsraten für verschiedene Zieljahre vorliegen, wurde ein Modell des linearen Wachstums verwendet, um kohärente und finale Schätzungen der Marktdurchdringung zu erzielen.

- **2023:** Für die aktuelle Marktdurchdringung wurden Branchenbefragungen herangezogen. Zusätzlich wurden Experteninterviews geführt, um die Marktdurchdringung für 2023 zu validieren. Die Analyse der Marktdurchdringung hat die verschiedenen Größen von Lkw einbezogen, da diese einen erheblichen Einfluss darauf haben. In Flotten, die hauptsächlich (über 50 Prozent) aus schweren Lkw bestehen, verwenden 87 Prozent der Unternehmen Telematiksysteme. Im Gegensatz dazu setzen 26 Prozent der Unternehmen, deren Flotten überwiegend aus Leicht-Lkws bestehen, Telematiksysteme ein.³

- **2030 Standard:** Um die Standard-Marktdurchdringungsrate für 2030 zu ermitteln, wurden aus Marktanalysen historische Wachstumsraten zwischen 1,8–3,3% für Deutschland herangezogen und ein lineares Wachstumsmodell angewendet.⁴
- **2030 Beschleunigt:** Um die beschleunigte Marktdurchdringungsrate für 2030 zu ermitteln, wurden aus Marktanalysen globale Wachstumsraten zwischen 7,6–10,5% für Lkw Telematiksysteme herangezogen und ein lineares Wachstumsmodell angewendet.^{5,6}

8.6

Fußabdruck der digitalen Technologien

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

Fußabdruck der digitalen Technologien (Allgemein)

Generelle Anmerkungen

Die Berechnungen zum Fußabdruck der digitalen Technologien folgen einer Business-As-Usual Einschätzung der Emissionsentwicklung im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) für 2030. Die Daten aus den herangezogenen Studien und Statistiken basieren primär auf historische Zahlen und wurden in dieser Analyse kombiniert und extrapoliert. CO₂e-Emissionen aus Training und Nutzung von generativer KI (GenAI) sind nicht in die Berechnung des Fußabdrucks eingeflossen. Hauptgrund: Aktuelle Studien heben zwar deren großes Potenzial für die Zukunft hervor, gehen allerdings nicht ausreichend auf die Auswirkungen von GenAI auf den Energiebedarf und die CO₂e-Emissionen bis 2030 ein.

Berechnungsumfang

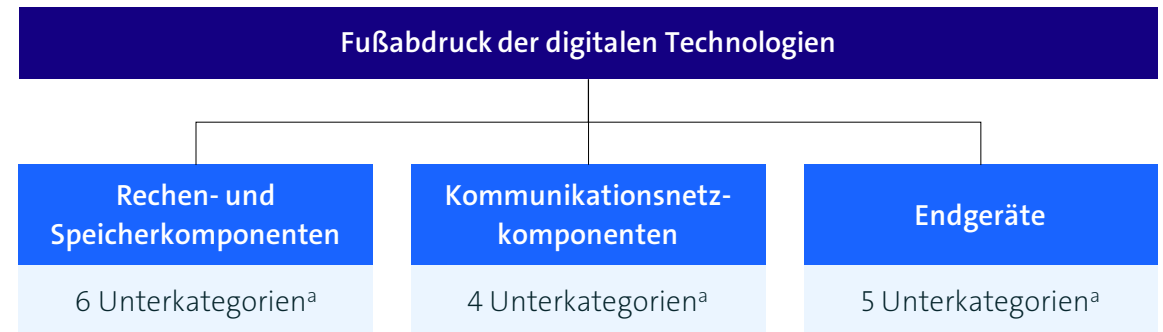
Für die Berechnungen der CO₂e-Emissionen, die durch digitale Technologien entstehen, wurden zwei Arten des IT-Fußabdrucks betrachtet:

1. Fußabdruck durch Nutzung: Hier wurden die CO₂e-Emissionen betrachtet, die in Deutschland durch die Nutzung von digitalen Technologien entstehen, wie zum Beispiel die Emissionen durch den Gebrauch von IoT-Sensoren in vernetzten Gebäuden.
2. Fußabdruck durch Nutzung und Herstellung: Zusätzlich zu den CO₂e-Emissionen durch die Nutzung wurden hier auch die Emissionen der Herstellung betrachtet. Bei den IoT-Sensoren in vernetzten Gebäuden wären das entsprechend die Emissionen der Rohstoffe sowie die Emissionen während der Produktion durch z.B. Stromverbrauch.

Berechnungslogik

In der Berechnung des IT-Fußabdrucks wurde analog zu den Berechnungen der CO₂e-Einsparpotenziale nach den zwei Digitalisierungsgeschwindigkeiten differenziert. Demnach wurde sowohl ein Fußabdruck für die Standard-Digitalisierung als auch für die beschleunigte Digitalisierung berechnet. Die gesamten CO₂e-Emissionen der digitalen Technologien setzen sich aus den Emissionen der drei IKT-Kategorien

1. Rechen- und Speicherkomponenten,
2. Kommunikationsnetzkomponenten und
3. Endgeräte zusammen, die sich wiederum in weitere Unterkategorien^a einteilen lassen.



Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

Fußabdruck der digitalen Technologien (Nutzung 1/3)

Berechnungsschritte

1. Projektion des Strombedarfs in 2030: Gemäß Projektionsbericht 2023 des Umweltbundesamts wird für 2030 in Deutschland ein Netto-Stromverbrauch von 548,4 TWh prognostiziert.¹
2. Projektion des IKT-Strombedarfs in 2030: Auf Basis mehrerer Studien wurde der Strombedarfe der IKT für 2030 ermittelt. Die Strombedarfe bzw. Verbräuche wurden dabei sowohl insgesamt als auch differenziert für folgende fünf Bereiche ermittelt: Rechenzentren², Telekommunikationsnetze³, IKT am Arbeitsplatz, in der Öffentlichkeit sowie in der Gebäudeautomatisierung und -vernetzung.^{3,4} Exkludiert wurde der IKT-Strombedarf in Haushalten, zu denen beispielsweise private Fernseher oder Displays gehören. In den fünf Bereichen aus der Studie wurden dann die betrachteten Verbräuche der Technologien, z.B. 5G Zugangsnetz, den drei entsprechenden IKT-Kategorien^a zugeordnet und über die fünf Bereiche hinweg aufsummiert. Um die Varianz der Energieverbräuche abzubilden, wurden jeweils eine niedrige und eine hohe Prognose für die Verbrauchswerte berechnet.
3. Anteile des IKT-Strombedarfs in 2030: In den drei Kategorien 1) Rechen- und Speicherkomponenten, 2) Kommunikationsnetzkomponenten und 3) Endgeräte wurden die prozentualen Anteile des Strombedarfs der IKT (Schritt 2) am Gesamtbedarf in Deutschland (Schritt 1) für die niedrige und hohe Prognose berechnet. Für die weiterführende Berechnung wurde die Likely Prognose genutzt. Die Likely Prognose ist nicht die mittlere Prognose, da die Varianzen bei der niedrigen und hohen Prognose unterschiedlich sind.

Anteile IKT-Strombedarfs am Gesamtbedarf in 2030

IKT-Kategorie ^b	Niedrige Prognose ^c	Hohe Prognose ^c	Likely Prognose ^{c,d}
1. Rechen- und Speicherkomponenten	3,3%	5,0%	4,1%
2. Kommunikationsnetzkomponenten	2,0%	3,1%	2,5%
3. Endgeräte	0,3%	1,1%	0,7%
Gesamt	5,6%	9,1%	7,4%

Anmerkungen: a) Rechen- und Speicherkomponenten, Kommunikationsnetzkomponenten und Endgeräte; b) Für eine detaillierte Auflistung der Unterkategorien siehe [Seite 86](#); c) Zur besseren Lesbarkeit wurden gerundete Werte verwendet; d) Die Likely Prognose ist nicht die mittlere Prognose, da die Varianzen bei der niedrigen und hohen Prognose unterschiedlich sind.

Quellen: 1) [Umweltbundesamt \(2023i\)](#); 2) [Bitkom \(2023b\)](#); 3) [TAB \(2022\)](#); 4) [BMWK \(2015\)](#).

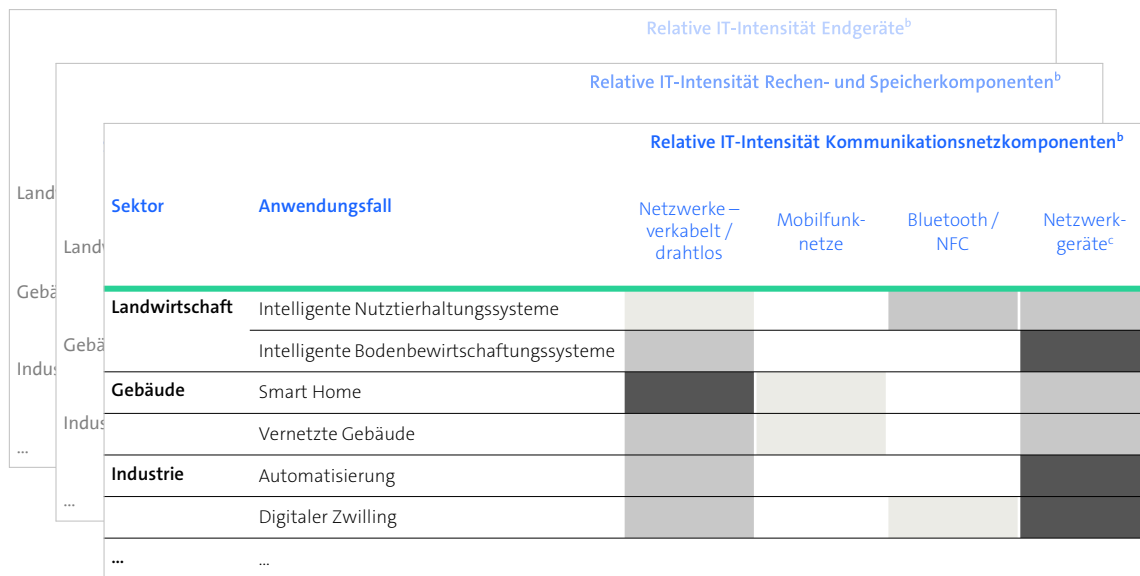
Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

Fußabdruck der digitalen Technologien (Nutzung 2/3)

Berechnungsschritte

4. Relative IT-Intensität der Anwendungsfälle: Alle Anwendungsfälle der fünf Sektoren wurden nach ihrer relativen IT-Intensität in den drei Kategorien^a bewertet. Dazu wurde für jeden Anwendungsfall eingeschätzt, ob die IT-Unterkategorie^b im Anwendungsfall zum Einsatz kommt und wie intensiv. Über die Anzahl und Intensität der betrachteten Unterkategorien im Verhältnis zu deren Gesamtanzahl pro Kategorie wurde die relative Intensität ermittelt.

IT-Intensität auf Ebene der IT-Unterkategorien



IT-Intensität auf Ebene der IT-Kategorien

Sektor	Anwendungsfall	IT-Intensität		
		Kommunikationsnetzkomponenten	Rechen- und Speicherkomponenten	Endgeräte
Landwirtschaft	Intelligente Nutztierhaltungssysteme	75%	75%	57%
	Intelligente Bodenbewirtschaftungssysteme	50%	100%	86%
Gebäude	Smart Home	75%	63%	86%
	Vernetzte Gebäude	75%	63%	86%
Industrie	Automatisierung	50%	63%	81%
	Digitaler Zwilling	...%	...%	...%

illustrativ

■ Hohe Intensität ■ Mittlere Intensität ■ Niedrige Intensität

illustrativ

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

Fußabdruck der digitalen Technologien (Nutzung 3/3)

Berechnungsschritte

5. Anwendungsfall-spezifische Fußabdrücke: Mithilfe der prozentualen Anteile pro Kategorie^a (Schritt 3) und den zuvor ermittelten IT-Intensitäten pro Unterkategorie^b (Schritt 4) wird ein spezifischer CO₂e-Fußabdruck für jeden Anwendungsfall ermittelt. Dieser bezieht die Marktdurchdringungen der Anwendungsfälle (Standard- und beschleunigte Digitalisierung) und, abhängig von der CO₂e-Projektion, auch die unterschiedlichen Stromverbräuche und Stromemissionsfaktoren^c mit ein.
6. Gesamtfußabdruck der Nutzung: Der gesamte CO₂e-Fußabdruck durch Nutzung digitaler Technologien umfasst die Summe aller Anwendungsfall-spezifischen Fußabdrücke in allen drei IKT-Kategorien^a. Die Ergebnisse sind sowohl abhängig von der Höhe der CO₂e-Projektion (hoch/mittel/niedrig) als auch der Digitalisierungsgeschwindigkeit (Standard- und beschleunigte Digitalisierung).

Zusammenfassung der Berechnungen, Annahmen und Anmerkungen

Fußabdruck der digitalen Technologien (Nutzung und Herstellung)

Berechnungsschritte

1. Emissionsverteilung über den Lebenszyklus: Zwei Studien bilden die Grundlage für eine Einschätzung der prozentuale Emissionsverteilungen in den drei IKT-Kategorien^a über den gesamten Lebenszyklus hinweg (Rohmaterialien, Produktion, Transport, Nutzung und End-of-Life). Die ermittelten Emissionen der Nutzung dienen dann als Basis, um über die folgenden Vergleichswerte die sogenannten „embodied“ CO₂e-Emissionen zu berechnen.^{1,2}
2. Emissionsfaktor für importierte Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT): Bei der Berechnung der Emissionen, die durch die Herstellung entstehen, wurden die Emissionsfaktoren für die führenden Zulieferländer der IKT, China, Taiwan, USA, Südkorea und Japan, bestimmt. Dies geschah auf Basis des jeweiligen Energiemixes, wie von der Internationalen Energieagentur erfasst. Die Emissionsfaktoren für das Jahr 2030 wurden durch Trendextrapolation für jedes Land errechnet und anschließend entsprechend der Importintensität gewichtet. Das Ergebnis war ein durchschnittlicher Emissionsfaktor von 435 g CO₂e/kWh.
3. Gesamtfußabdruck der Nutzung und Herstellung: Die CO₂e-Emissionen der Nutzung dienen dabei als Berechnungsgrundlage, um mithilfe der prozentualen CO₂e-Verteilung den gesamten CO₂e-Fußabdruck für Nutzung und Herstellung über alle Anwendungsfälle hinweg zu ermittelt. Als Grundlage dafür dient unter anderem die Aufteilung der Emissionsverteilung je IKT-Kategorie^a über den gesamten Lebenszyklus hinweg (Schritt 1). Die Endergebnisse sind sowohl abhängig von der Höhe der CO₂e-Projektion (hoch/mittel/niedrig) als auch der Digitalisierungsgeschwindigkeit (Standard- und beschleunigte Digitalisierung).

IKT-Kategorie ^a	Emissionsanteil Nutzung			Emissionsanteil „Embodied“		
	Niedrige Prognose	Höhere Prognose	Durchschnittswert ^c	Niedrige Prognose	Höhere Prognose	Durchschnittswert ^c
1. Rechen- und Speicherkomponenten	70%	90%	80%	10%	30%	20%
2. Kommunikationsnetzkomponenten	50%	70%	60%	30%	50%	40%
3. Endgeräte	5%	20%	13%	80%	95%	88%

Anmerkungen: a) Rechen- und Speicherkomponenten, Kommunikationsnetzkomponenten und Endgeräte; b) Eine detaillierte Auflistung der Unterkategorien befinden sich auf [Folie 86](#).

Quellen: 1) [GeSi & Carbon Trust \(2017\)](#); 2) [Huawei \(2022\)](#).

8.7

Quellenverzeichnis

Quellenverzeichnis

- ABB. (2022). ABB investiert in Gebäudetechnologie-Start-up BrainBox AI [Pressemeldung]. <https://new.abb.com/news/de/detail/95301/abb-investiert-in-gebaudetechnologie-start-up-brainbox-ai>
- ABI Research. (2023). 4 Smart Building Case Studies Making the World More Sustainable. <https://go.abiresearch.com/hubfs/Blog%20PDFs/smart-building-case-studies.pdf>
- ACEEE. (2018). Energy impacts of smart home technologies. <https://www.aceee.org/sites/default/files/publications/researchreports/a1801.pdf#:~:text=Smart%20thermostats%20have%20proved%20to%20reduce%20HVAC%20energy,and%2010%25%20in%20cooling%20costs%20can%20be%20expected>
- 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
- Agrarheute. (2022). Precision Farming: Für welche Betriebe sich die Investition lohnt. <https://www.agrarheute.com/technik/ackerbautechnik/precision-farming-fuer-welche-betriebe-investition-lohnt-589049>
- AIT. (2022). CO₂ Einsparungspotenziale im Gebäudebereich. https://www.ait.ac.at/fileadmin/mc/energy/downloads/CO2-Einsparungspotenziale_im_Gebaeudebereich_-_Langfassung.pdf
- Alaa, M., Zaidan, A. A., Zaidan, B. B., Talal, M. & Kiah, L. M. (2017). A review of smart home applications based on Internet of Things. *Journal of Network and Computer Applications*, 97, 48–65. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.08.017>
- Altair Engineering Inc. (2022). 2022 Digital twin global survey report. https://altair.com/docs/default-source/pdfs/altair_dt-global-survey-report_web.pdf?sfvrsn=457856ab_9
- Andretta, I., Pomar, C., Rivest, J., Pomar, J. & Radünz, J. (2016). Precision feeding can significantly reduce lysine intake and nitrogen excretion without compromising the performance of growing pigs. *Animal*, 10(7), 1137–1147. <https://doi.org/10.1017/s1751731115003067>
- Architekturblatt. (2021). Wege zur Klimaneutralität im Gebäudebereich. <https://www.architekturblatt.de/wege-zur-klimaneutralitaet-im-gebaeudebereich/>
- Aussat, Y., Rosmanis, A., & Keshav, S. (2022). A power-efficient self-calibrating smart lighting system. *Energy and Buildings*, 259, 111874. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111874>
- Babangida, L., Perumal, T., Mustapha, N. & Yaakob, R. (2022). Internet of things (IoT) based activity recognition strategies in smart homes: A review. *IEEE*, 22(9). <https://ieeexplore.ieee.org/document/9740207>
- BAFA. (2021). Informationsblatt CO₂-Faktoren. https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2021.pdf?blob=publicationFile&v=5
- Barenji, A. V., Liu, X., Guo, H. & Li, Z. (2020). A digital twin-driven approach towards smart manufacturing: Reduced energy consumption for a robotic cell. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 34(7–8), 844–859. <https://doi.org/10.1080/0951192x.2020.1775297>
- BDEW. (2016). Metastudie Smart Grid. https://www.bdew.de/media/documents/Metastudie_Smart-Grid-Abschlussbericht.pdf
- BDEW. (2022). Grundlagenpapier Primärenergiefaktoren. https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20221124_BDEW-Grundlagenpapier_PEF_final.pdf
- Becker, H., Ciari, F., & Axhausen, K. W. (2018). Measuring the car ownership impact of free-floating car-sharing – a case study in Basel, Switzerland. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 65, 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.08.003>

- Berlin.de. (2023). Ridesharing in Berlin. <https://www.berlin.de/tourismus/infos/verkehr/sharing/ridesharing/>
- 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>
- BfJ. (2019). Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) Anlage 1 (zu den §§ 4 und 5) Sektoren. https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/anlage_1.html
- Bharat Book Bureau. (2021). Germany building automation systems market (2021-2027). 3bmarketresearch. <https://3bmarketresearch.wordpress.com/2021/12/22/germany-building-automation-systems-market-2021-2027/>
- Bieser, J. & Coroamă, V. C. (2020). Direkte und indirekte Umwelteffekte der Informations- und Kommunikationstechnologie. Sustainability Management Forum | Nachhaltigkeitsmanagementforum, 29(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00550-020-00502-4>
- Bitkom. (2020). Schon 8 von 10 Landwirten setzen auf digitale Technologien. <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Schon-8-von-10-Landwirten-setzen-auf-digitale-Technologien>
- Bitkom. (2021a). Klimaeffekte der Digitalisierung. https://www.bitkom.org/sites/main/files/2021-10/20211010_bitkom_studie_klimaeffekte_der_digitalisierung.pdf
- Bitkom. (2021b). Klimaschutz und Energieeffizienz durch digitale Gebäudetechnologien. https://www.bitkom.org/sites/main/files/2021-11/211111_st_klimaschutz-und-energieeffizienz.pdf
- Bitkom. (2022a). Stau in den Sommerferien: Navi-Apps gewinnen an Bedeutung. <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Stau-Sommerferien-Navi-Apps-gewinnen-Bedeutung>
- Bitkom. (2022b). Industrie 4.0 – so digital sind Deutschlands Fabriken. <https://www.bitkom.org/sites/main/files/2023-01/221125StudieIndustrie-40-1.pdf>
- Bitkom. (2023a). Mehr als 30 Millionen Deutsche nutzen Smart Home Anwendungen. Presseinformation 31.08.2023. <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Mehr-als-30-Millionen-Deutsche-nutzen-Smart-Home-Anwendungen>
- Bitkom. (2023b). Rechenzentren in Deutschland – Aktuelle Marktentwicklungen. <https://www.bitkom.org/sites/main/files/2023-05/BitkomStudieRechenzentreninDeutschland2023.pdf>
- BMDV. (2023). Verkehr in Zahlen 2023/2024 – 52. Jahrgang. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/verkehr-in-zahlen23-24-pdf.pdf?__blob=publicationFile
- BMEL. (2020). Understanding Farming. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/EN/Publications/UnderstandingFarming.pdf?__blob=publicationFile
- BMJ & BfJ. (2019). Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf>
- BMUV. (2022). Wie gefährlich ist Feinstaub? <https://www.bmuv.de/faq/wie-gefaehrlich-ist-feinstaub#:~:text=Je%20kleiner%20ein%20Partikel%20ist,aerodynamischen%20Durchmesser%20der%20Partikel%20eingeteilt.>
- BMWK. (2015). Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwicklung-des-ikt-bedingten-strombedarfs-in-deutschland-abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- BMWK. (2022a). SINTEG Ergebnisse. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/Sinteg/interaktive-ergebnisuebersicht.html>
- BMWK. (2022b). SINTEG. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/sinteg.html>
- BMWK. (2023a). Intelligente Netze. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/intelligente-netze.html>

- BMWK. (2023b). Infografik gesetzlicher Smart-Meter-Rolloutfahrplan. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/infografik-smart-meter-rolloutfahrplan.html>
- BNW. (2023). TUM-Langzeitstudie: Ökolandbau schützt Klima. <https://www.bnw-bundesverband.de/tum-langzeitstudie-oekolandbau-schuetzt-klima>
- 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>
- Brandi, S., Coraci, D., Borello, D., & Capozzoli, A. (2021). Energy management of a residential heating system through deep reinforcement learning. *Smart innovation, systems and technologies* (S. 329–339). https://doi.org/10.1007/978-981-16-6269-0_28
- BSI. (2023). Kooperative Intelligente Verkehrssysteme (C-ITS). https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Informationen-und-Empfehlungen/Automotive/Kooperative_Intelligente_Verkehrssysteme/Kooperative_Intelligente_Verkehrssysteme.html
- Bundesnetzagentur. (2023). Monitoringbericht 2023. <https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/MonitoringberichtEnergie2023.pdf>
- Bundesregierung. (2023). Ein Plan fürs Klima. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/tipps-fuer-verbraucher/klimaschutzgesetz-2197410>
- Bundesverband Carsharing. (2007). Definition carsharing. https://carsharing.de/images/stories/pdf_dateien/carsharing-definition_2007-03-28.pdf
- Bundesverband Carsharing. (2023a). CarSharing entlastet Umwelt und Verkehr. <https://carsharing.de/alles-ueber-carsharing/umweltbilanz/carsharing-entlastet-umwelt-verkehr>
- Bundesverband Carsharing. (2023b). Was ist Carsharing? <https://carsharing.de/alles-ueber-carsharing/ist-carsharing/ist-carsharing>
- 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. <https://search.worldcat.org/title/1136962920>
- Chamberlain, K. (2023). Smart grid case studies: Cities revitalized by smart grid development. *BroadbandNow Research*. <https://broadbandnow.com/report/smart-grid-case-studies-local-economies/>
- 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/hortsci.15491-20>
- Chiu, C. L., Liao, T., Chen, C. & Kao, S. (2022). AIOT precision feeding management system. *Electronics*, 11(20), 3358. <https://doi.org/10.3390/electronics11203358>
- Cogato, A., Brščić, M., Marinello, F. & Pezzuolo, A. (2020). A 20-Year analysis of the evolution of automatic milking systems: Processes, technologies and livestock environment. *Proceedings*, 73(1). <https://doi.org/10.3390/IECA2020-08825>
- Cohn, N. (2009). Real-time traffic information and navigation. *Transportation Research Record*, 2129(1), 129–135. <https://doi.org/10.3141/2129-15>
- Corsini, L., Gocke, A., Kurth, T. & Wagner, K. (2015). *Crop farming 2030*. BCG. <https://www.bcg.com/publications/2015/crop-farming-2030-reinvention-sector>
- DBFZ. (2023). Optionen zum Einsatz fester Biomasse in dekarbonisierten Wärmenetzen (SmartBioGrid). https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB159_SmartBioGrid_Endbericht.pdf
- Dena. (2022). *Dena Gebäudereport 2023*. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/dena_Gebaeudereport_2023.pdf

- DESTATIS. (2021). Industrie 4.0: Roboter und 3D-Drucker immer weiter verbreitet. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/04/PD21_180_52911.html
- DESTATIS. (2022). Ausstattung privater Haushalte mit smarten Geräten und Systemen Deutschland. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Ausstattung-Gebrauchsgueter/Tabellen/a-smarte-geraete-systeme-d-lwr.html>
- DESTATIS. (2023a). Bruttoinlandsprodukt (BIP) in Deutschland von 1991 bis 2022 (in Milliarden Euro) [Grafik]. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1251/umfrage/entwicklung-des-bruttoinlandsprodukts-seit-dem-jahr-1991/>
- DESTATIS. (2023b). Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen des Bundes [Datensatz]. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=statistikTabellen&selectionname=81000#abreadcrumb>
- Deter, A. (2021). Dünger einsparen dank teilflächenspezifischer Düngung funktioniert. top agrar. <https://www.topagrar.com/acker/news/duenger-einsparen-dank-teilflaechenspezifischer-duengung-funktioniert-12673225.html>
- Deutscher Bundestag. (2022). Düngemittel im ökologischen Landbau. <https://www.bundestag.de/resource/blob/916760/3198bef0f56aa9711decfb4d41d64059/WD-5-098-22-pdf-data.pdf>
- Deutscher Bundestag. (2023a). Entwurf eines zweiten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/tipps-fuer-verbraucher/klimaschutzgesetz-2197410>
- Deutscher Bundestag. (2023b). Gesetz zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende. <https://dip.bundestag.de/vorgang/gesetz-zum-neustart-der-digitalisierung-der-energiewende/296240>
- DHL Group. (2020). Greenplan - The best Way: Logistikexperten führen leistungsfähigen Algorithmus zur individuellen Routenoptimierung ein. <https://group.dhl.com/de/presse/pressemitteilungen/2020/greenplan-the-best-way-logistikexperten-fuehren-leistungsfahigen-algorithmus-zur-individuellen-routenoptimierung-ein.html>
- Dicker, R. (2021). Google Maps 101: Die Rolle künstlicher Intelligenz. The Keyword Deutschland. <https://blog.google/intl/de-de/produkte/suchen-entdecken/google-maps-101-kuenstliche-intelligenz/>
- Dilax. (2023). Automatische Fahrgastzählung (AFZ): Sensoren & Systeme. <https://www.dilax.com/de/produkte/automatische-fahrgastzaehlung-afz>
- Doll, C. & Krauss, K. (2022). Nachhaltige Mobilität und innovative Geschäftsmodelle. Econstor. <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/251364/1/1795367806.pdf>
- Dreger, S. (2021). Starter oder schon Transformer - wie verankert ist der digitale Zwilling in der Energie- & Versorgungsindustrie? Capgemini. <https://www.capgemini.com/de-de/insights/blog/digitaler-zwilling-energie-versorgungsindustrie/>
- eco e.V. (2023). Join the Solution - studie - Eco. <https://www.eco.de/jointhesolution/jts-studie/>
- EIA. (2022). Electricity net consumption in Germany from 2000 to 2021 (in terawatt-hours) [Grafik]. <https://www.statista.com/statistics/383650/consumption-of-electricity-in-germany/>
- Energylight. (2022). Projekt «SensoLight» Messbericht Wohnsiedlung «Rütihof, Zürich». <https://www.energylight.ch/dam/jcr:d2b60800-c3d7-49ff-8d0e-db9c4e3a2c67/sensolight-messbericht-ru-tihof-2022-05-20.pdf>
- Energylight. (2023a). Wohnsiedlung Rütihof, Zürich (-94%). <https://www.energylight.ch/projekte/ruetihof-zuerich.html>

- Energylight. (2023b). 94Prozent Strom sparen mit intelligenter Beleuchtung. <https://www.energylight.ch/dam/jcr:ba7e13de-fe71-4d95-b2d8-652fb5e239f1/etrends-2-2023-ruetihof-nevalux--bericht.pdf>
- Ericsson, E., Larsson, H. & Brundell-Freij, K. (2006). Optimizing route choice for lowest fuel consumption – potenzial effects of a new driver support tool. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 14(6), 369–383. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2006.10.001>
- European Commission. (2017). Mini-paper – Precision livestock farming. https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/default/files/fg18_mp_precision_livestock_farming_2017_en.pdf
- European Commission. (2020). Benchmarking smart metering deployment in the EU-28 : Final report. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b397ef73-698f-11ea-b735-01aa75ed71a1/language-en?WT_mc_id=Searchresult&WT_ria_c=37085&WT_ria_f=3608&WT_ria_ev=search
- Eurostat. (2023a). Goats population - annual data [Datensatz]. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/APRO_MT_LSGOAT/default/table?lang=en
- Eurostat. (2023b). Number of bovine animals [Datensatz]. <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tag00016/default/table?lang=en>
- Eurostat. (2023c). Number of pigs [Datensatz]. <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tag00018/default/table?lang=en>
- Eurostat. (2023d). Number of sheep [Datensatz]. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tag00017_custom_8087625/default/table?lang=en
- EV Database. (2023). Energy consumption of full electric vehicles [Datensatz]. <https://ev-database.org/cheatsheet/energy-consumption-electric-car>
- Expertenrat für Klima. (2022). Zweijahresgutachten 2022. https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2022/11/ERK2022_Zweijahresgutachten.pdf
- Fafoutellis, P., Mantouka, E. G. & Vlahogianni, E. I. (2020). Eco-Driving and its impacts on fuel efficiency: An overview of technologies and data-driven methods. Sustainability, 13(1), 226. <https://doi.org/10.3390/su13010226>
- 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>
- FIS. (2022). Technische Maßnahmen zur Verringerung der Feinstaubbelastung. <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/327337/?clsId0=276654&clsId1=276658&clsId2=276924&clsId3=0>
- Fischer, K. (2020). Landwirtschaft: Diese digitalen Technologien sind im Einsatz. agrarheute. <https://www.agrarheute.com/technik/welche-digitalen-technologien-einsatz-573533>
- Franco, A., Misericocchi, L., & Testi, D. (2021). A method for optimal operation of HVAC with heat pumps for reducing the energy demand of large-scale non residential buildings. Journal of Building Engineering, 43, 103175. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103175>
- Fraunhofer IBP. (2022). The energy saving potential of an intelligent heating control system. <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/en/documents/ibp-report/579.pdf>
- Fraunhofer ISE. (2016). Stromerzeugung in Deutschland - Erneuerbare Energien erreichten 2015 einen Anteil von rund 35%. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2016/stromerzeugung-in-deutschland-erneuerbare-energien-erreichten-2015-einen-anteil-von-rund-35-prozent.html#:~:text=Die%20Windenergie%20produzierte%20im%20Jahr,erstmal%20die%20Produktion%20aus%20Braunkohlekraftwerken>
- FVB. (2018). Licht-Vereinbarung: Bis 2025 Stromverbrauch für Licht halbieren. <https://fvb.ch/de/downloads/lichtvereinbarung-von-davos/medienmitteilung-vom-14-september-2018.pdf>

- 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>
- GBCA. (2023). The Sydney Opera House: A world leading sustainability performance. <https://new.gbca.org.au/case-studies/building/the-sydney-opera-house-a-world-leading-sustainability-performance/>
- GeSI. (2015). ICT Solutions for 21st Century Challenges. https://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report.pdf
- GeSi & Carbon Trust. (2017). ICT Sector guidance built on the GHG protocol product life cycle accounting and reporting standard. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-03/GHGP-ICTSG - ALL Chapters.pdf>
- Göggerle, T. (2020). Precision-Farming: Teilflächenspezifisch Düngen - so starten Sie. <https://www.agrarheute.com/technik/ackerbautechnik/precision-farming-teilflaechenspezifisch-duengen-so-starten-569971>
- GRDC. (2012). Variable-rate application fact sheet. https://grdc.com.au/_data/assets/pdf_file/0026/207791/grdc-fs-variablerate-application.pdf.pdf
- Greenplan. (2023a). Tageszeitabhängige Geschwindigkeitsprofile. <https://greenplan.de/de/time-dependent-speed-profiles/>
- Greenplan. (2023b). Greenplan aus operativer Perspektive. <https://greenplan.de/de/greenplan-from-the-operational-point-of-view/>
- Greenplan. (2023c). Effiziente Tourenplanung als effektiver Klimaschutz. <https://greenplan.de/de/avoiding-any-unnecessarily-driven-kilometer-means-less-co2/>
- GreyViews. (2022). Livestock monitoring market segmentation analysis from (2022-2029). *GlobeNewswire*. <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/05/10/2439568/0/en/Livestock-Monitoring-Market-Size-by-Offering-Hardware-Software-and-Services-Livestock-Type-Cattle-Poultry-Swine-Equine-and-Others-Application-Milk-Harvesting-Management-Heat-Detect.html>
- 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(6), 1327–1350. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09723-5>
- Heineke, K., Laverty, N., Möller, T., Ziegler, F. (2023). The future of mobility. *McKinsey Quarterly* <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/automotive%20and%20assembly/our%20insights/the%20future%20of%20mobility/the-future-of-mobility.pdf>
- Held, M., Rosat, N., Georges, G., Pengg, H. & Boulouchos, K. (2021). Lifespans of passenger cars in Europe: Empirical modelling of fleet turnover dynamics. *European Transport Research Review*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00464-0>
- Hilty, L., & Bieser, J. (2017). Opportunities and risks of digitalization for climate protection in Switzerland. *Zurich Open Repository and Archive*. https://www.zora.uzh.ch/id/eprint/141128/1/Study_Digi-talization_Climate_Protection_Oct2017.pdf
- Hohag, R. (2022). Ridesharing: Vor- und Nachteile. *BCD travel*. <https://www.bcdtravel.com/de/blog/rideshare-and-sustainability-pros-and-cons-for-managed-travel-programs/>
- Honeywell. (2019). Sydney opera house intelligent evolution. https://buildings.honeywell.com/content/dam/honeywell-building-technology/en-us/documents/SL-53-2589_SOH-CS-US_0819_V4.pdf
- Huang, X., Huei, P. (2018). Eco-routing based on a data driven fuel consumption model. *arXiv*. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1801/1801.08602.pdf>

- Huawei. (2022). Sustainability Report. <https://www-file.huawei.com/-/media/corp2020/pdf/sustainability/sustainability-report-2022-en.pdf>
- IDC. (2022). Intelligent process automation in Deutschland 2022. CGI. <https://www.cgi.com/sites/default/files/2022-06/intelligent-process-automation-deutschland-2022-idc-executive-brief.pdf>
- IEA. (2021). Comparative life-cycle greenhouse gas emissions of a mid-size BEV and ICE vehicle. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/comparative-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-a-mid-size-bev-and-ice-vehicle>
- Ingram, E. (2020). How to extend the lifetime of wind turbines. Renewable Energy World. <https://www.renewableenergyworld.com/om/how-to-extend-the-lifetime-of-wind-turbines/#gref>
- Intellias. (2023). Big-data and transportation: Use cases for urban planning. <https://intellias.com/big-data-and-transportation-use-cases-urban-planning/>
- Interroll. (2020). Umfrage: Produktionsunternehmen in Deutschland mit Nachholbedarf bei automatisierten Materialflusssystemen. <https://www.interroll.com/de/news-events/pressemitteilungen/mitteilung/umfrage-produktionsunternehmen-in-deutschland-mit-nachholbedarf-bei-automatisierten-materialflusssystemen/>
- IÖW. (2023). Erfassung und Bewertung des Energiesparpotenzials von digitalen Anwendungen im Strom- und Wärmebereich. https://www.ioew.de/fileadmin/user_upload/BILDER_und_Downloaddateien/Publikationen/2023/Detective_Abschlussbericht.pdf
- IPCC. (2014). Technology-specific cost and performance parameters. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf
- Iris Sensing. (2023). Intelligente Verkehrssysteme: die Zukunft des öffentlichen Nahverkehrs. <https://www.iris-sensing.com/de/news/artikel/intelligente-verkehrssysteme-die-zukunft-des-oeffentlichen-nahverkehrs/>
- Isler, K. (2023). Smart Mobility: Wie Unternehmen von vernetzten Verkehrssystemen in Smart Cities profitieren. hagel IT Services. https://www.hagel-it.de/it-insights/smart-mobility-wie-unternehmen-von-vernetzten-verkehrssystemen-in-smart-cities-profitieren.html#Definition_von_Smart_Mobility_und_vernetzten_Verkehrssystemen
- ITS. (2012). Navigation systems with eco-routing features can improve fuel economy by 15 percent. <https://www.itskrs.its.dot.gov/its/benecost.nsf/ID/3ee078df857f563585257a71006a5790>
- Jalali, R., Koohi-Fayegh, S., El-Khatib, K., Hoornweg, D. & Li, H. (2017). Investigating the potential of ridesharing to reduce vehicle emissions. Urban Planning, 2(2), 26–40. <https://doi.org/10.17645/up.v2i2.937>
- John A., Clark, C. Freeman, M., Kerrisk, K., Garcia, S. & Halachmi, I. (2016). Review: Milking robot utilization, a successful precision livestock farming evolution. Animal, 10(9), 1484-1492. <https://doi.org/10.1017/S1751731116000495>
- Kaplan, O. (2022). Was ist Telematik? Verizon Connect. <https://www.verizonconnect.com/de/ressourcen/artikel/was-ist-telematik/>
- Kapoor, M. (2023). IoT in automotive industry: IoT-enabled smart cars and connected vehicles. CognitiveClouds. <https://www.cognitiveclouds.com/insights/iot-in-automotive-industry>
- Karimipour, H., Tam, V., Le, K. N., Burnie, H. (2021). Routing on-road heavy vehicles for alleviating greenhouse gas emissions. Cleaner Engineering and Technology, 5, 100325. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100325>
- KBA (2023a). Neuzulassungen nach Umwelt-Merkmalen (FZ 14) [Datensatz]. https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz14_n_uebersicht.html

- KBA (2023b). Personenkraftwagen am 1. Januar 2023 nach ausgewählten Merkmalen. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz_Bestand/2023/2023_b_jahresbilanz_tabellen.html?nn=3532350&fromStatistic=3532350&yearFilter=2023&fromStatistic=3532350&yearFilter=2023
- KBA (2023c). Verkehr in Kilometern (VK), Zeitreihe 2014-2022. https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/vk_inlaenderfahrleistung_node.html
- KBA (2023d). Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken, 1. Januar 2023. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/ZulassungsbezirkeGemeinden/zulassungsbezirke_node.html
- Kolleck, A. (2021). Does car-sharing reduce car ownership? Empirical evidence from Germany. *Sustainability*, 13(13), 1-17. <https://ideas.repec.org/a/gam/jsusta/v13y2021i13p7384-d586967.html>
- Kuhnert, H. (2023). Aktuelle Trends der deutschen Ökobranche. Thünen. <https://www.thuenen.de/de/themenfelder/oekologischer-landbau/aktuelle-trends-der-deutschen-oekobranche#:~:text=Die%20%C3%B6kologisch%20bewirtschaftete%20landwirtschaftliche%20Fl%C3%A4che,4%20%25%20unter%20dem%20von%202021>
- Kunkel, S. & Tyfield, D. (2021). Digitalisation, sustainable industrialisation and digital rebound – asking the right questions for a strategic research agenda. *Energy Research & Social Science*, 82, 102295. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102295>
- Lee, Z. E. & Zhang, K. M. (2022). Unintended consequences of smart thermostats in the transition to electrified heating. *Applied Energy*, 322, 119384. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119384>
- Linco. (2023). Shared Rides, secured journeys: Guiding the safety of car-sharing with GPS tracking solutions. <https://linco.eu/news/car-sharing/>
- Loder, A., Cantner, F., Dahmen, V. & Bogenberger, K. (2023). Germany's Newest Fare: The Deutschlandticket - First Insights on Funding and Travel Behavior. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/373647040_Germany%27s_Newest_Fare_The_Deutschlandticket_-_First_Insights_on_Funding_and_Travel_Behavior?channel=doi&linkId=64f5cb484c70687b8ed00f11&showFulltext=true
- Loonstra. (2012). Benefits of VRA technology for potato production based on Mole soil maps. *Agricultural and Food Sciences*. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20133223189#>
- Lovarelli, D., Leso, L., Bonfanti, M., Porto, S. M., Barbari, M. & Guarino, M. (2023). Climate change and socio-economic assessment of PLF in dairy farms: Three case studies. *Science of The Total Environment*, 882, 163639. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163639>
- Mailach, B. & Oschatz, B. (2017). Kurzstudie Energieeinsparungen digitale Heizung. Dresden: ITG-Dresden. Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie. https://www.bdh-industrie.de/fileadmin/user_upload/Studien/energieeinsparungen_digitale_heizung_2017_01_12.pdf
- 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
- Manager Magazin. (2021). Diese Carsharing-Dienste sollten Sie kennen. <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/carsharing-anbieter-von-share-now-we-share-bis-stadtmobil-im-vergleich-a-d1e2d2d4-ce0b-4dc3-87c3-58a1aab303f3>
- 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>
- Mazura, Z. (2023). Präsenzabhängige LED-Lichtsteuerung. elektro.net. https://www.elektro.net/file/show/122549/51ea57/DE_2023_5_50-51_ISS1_BK.pdf

- Meyerhoff, J. K. Rehdanz, S. Sundt. (2020). Consumers' Willingness to Accept Time-of-Use Tariffs for Shifting Electricity Demand. MDPI Energies. https://www.mdpi.com/1996-1073/13/8/1895?type=check_update&version=2
- Mirzakhani-fachi, 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>
- Mitropoulos, L., Kortsari, A. & Aifadopoulou, G. (2021). A systematic literature review of ride-sharing platforms, user factors and barriers. European Transport Research Review, 13, 61. <https://doi.org/10.1186/s12544-021-00522-1>
- Moadab, N. H., Olsson, T., Fischl, G., & Aries, M. M. (2021). Smart versus conventional lighting in apartments - Electric lighting energy consumption simulation for three different households. Energy and Buildings, 244, 111009. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111009>
- Müller, D., Osterhage, T., Richarz, J., Beckhölter, T., Remy, S., Gundlach, A., & Henn, S. (2020). Energietechnik 4.0. Handbuch Industrie 4.0: Recht, Technik, Gesellschaft, 879-902. https://doi.org/10.1007/978-3-662-58474-3_45
- Musulini. (2020). Personal car use to decline 10% by 2030: study. Smart Cities Dive. <https://www.smartcitiesdive.com/news/kantar-mobility-study-personal-car-use-to-decline-10-by-2030-study/572051/>
- Nagabandi, N. (2023). How 3D printing can dramatically reduce carbon emissions in the manufacturing industry. Manufacturing Tomorrow. <https://www.manufacturingtomorrow.com/story/2023/05/how-3d-printing-can-dramatically-reduce-carbon-emissions-in-the-manufacturing-industry/20720/>
- NREL. (2017a). Quantifying adoption rates and energy savings over time for advanced manufacturing technologies. <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/70138.pdf>
- NREL. (2017b). Researchers at NREL find fewer failures of PV panels and different degradation modes in systems installed after 2000. <https://www.nrel.gov/news/program/2017/failures-pv-panels-degradation.html>
- Pardo, G. O., Del Prado, A., Álvarez, J. F., Yáñez-Ruiz, D. R. & Belanche, A. (2022). Influence of precision livestock farming on the environmental performance of intensive dairy goat farms. Journal of Cleaner Production, 351, 131518. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131518>
- 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>
- Precedence Research. (2023). Livestock monitoring market. <https://www.precedenceresearch.com/livestock-monitoring-market>
- PTV Group. (2023). Künstliche Intelligenz im Verkehrswesen. <https://www.ptvgroup.com/de/anwendungsfaelle/k%C3%BCnstliche-intelligenz-verkehrswesen#kiimverkehrswesen>
- Rang, T. (2022). Spritsparend und klimafreundlicher unterwegs – mit Google Maps. The Keyword Deutschland. <https://blog.google/intl/de-de/produkte/suchen-entdecken/kraftstoffsparende-routen-google-maps/>
- Rat der Europäischen Union. (2023). Rat nimmt Rahmen zur Förderung der Einführung intelligenter Verkehrssysteme an. Pressemitteilung 23.10.2023. <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/10/23/council-adopts-new-framework-to-boost-the-roll-out-of-intelligent-transport-systems/>
- Research and Markets. (2023). Variable rate technology (VRT): Global strategic business report. <https://www.researchandmarkets.com/reports/4806368/variable-rate-technology-vrt-global-strategic>
- Rodier, C., Alemi, F. & Smith, D. (2016). Dynamic Ridesharing: Exploration of potential for reduction in vehicle miles traveled. Transportation Research Record, 2542(1), 120–126. <https://doi.org/10.3141/2542-15>

- Rossi, S. (2023). Best performer at Sydney Opera House is HVAC. Climate Control News. <https://www.climatecontrolnews.com.au/news/latest/best-performer-at-sydney-opera-house-is-hvac>
- Ruch, C., Lu, C., Sieber, L. & Frazzoli, E. (2021). Quantifying the efficiency of ride sharing. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 22(9), 5811–5816. <https://doi.org/10.1109/tits.2020.2990202>
- 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>
- Schlund, S., Clauß, K. & Papa, M. (2023). Studie zum Robotereinsatz in der österreichischen Industrie: Wirtschaftlicher Einfluss von Industrierobotern in österreichischen produzierenden Unternehmen. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8116615>
- Schmidt, P. (2020). The effect of car sharing on car sales. International Journal of Industrial Organization, 71, 102622. <https://doi.org/10.1016/j.ijindorg.2020.102622>
- 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>
- Silva, B., Gonçalves, M. & de Lima Domingos, R. (2023). Präzisionsfütterung für Hochleistungsschweine (1/2). 3drei3. https://www.3drei3.de/artikel/prazisionsfutterung-fur-hochleistungsschweine-1-2_3702/
- Sozzi, M., Kayad, A., Gobbo, S., Cogato, A., Sartori, L. & Marinello, F. (2021). Economic comparison of satellite, plane and UAV-acquired NDVI images for site-specific nitrogen application: Observations from Italy. Agronomy, 11(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy11112098>
- Späti, K. (2022). Economics and policy of precision agriculture: The case of variable rate fertilization in Switzerland [PhD dissertation]. ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000600987>
- Statista Market Insights. (2023). Smart Home - Germany. <https://www.statista.com/outlook/dmo/smart-home/germany>
- Sumalee, A. & Ho, H. (2018). Smarter and more connected: future intelligent transportation system. IATSS Research, 42(2), 67–71. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2018.05.005>
- Sydney Opera House. (2019). Environmental action plan 2020-23. https://www.sydneyoperahouse.com/sites/default/files/collaborodam_assets/environmental-action-plan-2020-23.pdf
- Sydney Opera House. (2023). Environmental sustainability. <https://www.sydneyoperahouse.com/about-us/in-the-community/environmental-sustainability>
- TAB. (2022). Energieverbrauch der IKT-Infrastruktur – Endbericht zum TA-Projekt Nr. 198. https://www.tab-beim-bundestag.de/projekte_energieverbrauch-der-ikt-infrastruktur.php
- Thompson, N. M., Bir, C., Widmar, D. A. & Mintert, J. R. (2018). Farmer perceptions of precision agriculture technology benefits. Journal of Agricultural and Applied Economics, 51(1), 142–163. <https://doi.org/10.1017/aae.2018.27>
- TUB. (2022). Entwicklung von Strategien und Lösungen zur Ausschöpfung zukünftiger Flexibilitätspotenziale vollelektrischer Haushalte, Gewerbe, Industrien und Elektromobilität. https://www.tu-braunschweig.de/fileadmin/Redaktionsgruppen/Institute_Fakultaet_5/Elenia/Forschung/Forschungsprojekte/flexess/dokumente/flexess_AP_1_2_Potenzialanalyse.pdf
- TÜV Süd. (2023). Gebäudeautomation. <https://www.tuvsud.com/de-de/branchen/real-estate/technische-gebaeudeausruestung-und-aufzuege/gebaeudeautomation>

- UBA. (2016). Rebound-Effekte: Empirische Ergebnisse und Handlungsstrategien.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rebound-effekte_empirische_ergebnisse_und_handlungsstrategien_hintergrundpapier.pdf
- UBA. (2020). Klimaschutz geht auch mit Benzinern – Diesel überschätzt.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klimaschutz-geht-auch-benzinern-diesel>
- UBA. (2021a). Treibhausgasminderung um 70 Prozent bis 2030: So kann es gehen!
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/21_12_29_uba_pos_treibhausgas_minderung_um_70prozent_bf.pdf
- UBA. (2021b). Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Güterverkehr.
https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/emissionsdaten#verkehrsmittelvergleich_g%C3%BCterverkehr_tabelle
- UBA. (2023a). Altfahrzeugverwertung und Fahrzeugverbleib.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib#altfahrzeuge-2020-niedrigste-anzahl-seit-beginn-der-aufzeichnungen-in-2004>
- UBA. (2023b). Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgas-Emissionen.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas#klimagase-aus-der-viehhaltung>
- UBA. (2023c). Datenanhang mit Kernindikatoren zum Projektionsbericht 2023 [Datensatz].
<https://www.umweltbundesamt.de/dokument/datenanhang-kernindikatoren-projektionsbericht-2023>
- UBA. (2023d). Dekarbonisierung von Energieinfrastrukturen.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_08-2023_dekarbonisierung_von_energieinfrastrukturen.pdf
- UBA. (2023e). Emissionsübersichten in den Sektoren des Bundes-Klimaschutzgesetzes.
<https://www.umweltbundesamt.de/dokument/emissionsuebersichten-in-den-sektoren-des-2>
- UBA. (2023f). 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. (2023g). Erkenntnisse zu Umweltwirkungen von Smart Metern.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06_cc_34-2021_umweltwirkungen_smart_meter.pdf
- UBA. (2023h). Indikator: Anteil Erneuerbare am Bruttostromverbrauch.
<https://www.umweltbundesamt.de/indikator-anteil-erneuerbare-am>
- UBA. (2023i). Projektionsbericht 2023 für Deutschland.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11740/publikationen/2023_08_21_climate_change_39_2023_projektionsbericht_2023_0.pdf
- UBA. (2023j). Treibhausgas-Emissionen in Deutschland.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung>
- UBA. (2023k). Treibhausgasminderungsziele Deutschlands.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands#internationale-vereinbarungen-weisen-den-weg>
- VCÖ. (2016). Mobilität als soziale Frage.
<https://vcoe.at/themen/mobilitaet-als-soziale-frage>

- VCÖ. (2023). E-Lkw als zukunftsfähige Lösung für den Straßengüterverkehr. <https://vcoe.at/grafiken/detail/gueterverkehr>
- VDI/VDE. (2022). Klimafreundliche Nutzfahrzeuge. <https://www.vdi.de/ueberuns/presse/publikationen/details/klimafreundliche-nutzfahrzeuge>
- Vilisto. (2022). Intelligente Heizkörperthermostate an WISAG Standorten. <https://www.vilisto.de/wisag-standorte-ausgestattet-intelligente-thermostate/>
- Vine, S. L. & Polak, J. (2019). The impact of free-floating carsharing on car ownership: Early-stage findings from London. *Transport Policy*, 75, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.02.004>
- Vogt, M., Buchholz, C. J., Thiede, S., & Herrmann, C. (2022). Energy efficiency of heating, ventilation and air conditioning systems in production environments through model-predictive control schemes: The case of battery production. *Journal of Cleaner Production*, 350, 131354. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131354>
- Volvo Trucks. (2022). Pressemitteilung: Volvo Trucks schwere elektrische Lkw auf dem Prüfstand. <https://www.volvotrucks.de/de-de/news/press-releases/2022/jan/volvos-heavy-duty-electric-truck-is-put-to-the-test-excels-in-both-range-and-energy-efficiency.html>
- WEF. (2022). The global lighthouse network playbook for responsible industry transformation. https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Lighthouse_Network_Playbook_for_Responsible_Industry_Transformation_2022.pdf
- WEF. (2023). How manufacturers can use digital twins for sustainability. <https://www.weforum.org/agenda/2023/05/digital-twins-manufacturing-sustainability/>
- Wind Europe. (2021). Wind energy digitalisation towards 2030. <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-digitalisation-towards-2030/>
- Wittich, H. (2022). Spritspar-Routen für Deutschland. *auto motor und sport*. <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/mobilitaetsservices/neu-bei-google-maps-spritspar-routen-fuer-deutschland/>
- WRI & WBCSD. (2004). Greenhouse Gas Protocol: a Corporate Accounting and Reporting Standard. Revised Edition. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>
- Zhou, F., Zheng, Z., Whitehead, J., Perrons, R. K., Washington, S. & Page, L. (2020). Examining the impact of car-sharing on private vehicle ownership. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 138, 322–341. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.06.003>
- Zimmermann, B. (2019). Elektromobilität im Schwerlastverkehr. Hochschule Fulda. https://www.wirtschaftsverkehr-frm.de/wp-content/uploads/2019/05/07_HS-Fulda.pdf

Impressum

Herausgeber

Bitkom e.V.
Albrechtstraße 10
10117 Berlin

Durchgeführt von:

**accenture**

Ansprechpartner

Niklas Meyer-Breitkreutz | Bereichsleiter Nachhaltigkeit & Umwelt
T 030 27576-403 | n.meyer-breitkreutz@bitkom.org

Copyright

Bitkom 2024

Diese Publikation stellt eine allgemeine unverbindliche Information dar. Die Inhalte spiegeln die Auffassung im Bitkom zum Zeitpunkt der Veröffentlichung wider.

Obwohl die Informationen mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt wurden, besteht kein Anspruch auf sachliche Richtigkeit, Vollständigkeit und/oder Aktualität, insbesondere kann diese Publikation nicht den besonderen Umständen des Einzelfalles Rechnung tragen. Eine Verwendung liegt daher in der eigenen Verantwortung des Lesers. Jegliche Haftung wird ausgeschlossen. Alle Rechte, auch der auszugsweisen Vervielfältigung, liegen beim Bitkom.

Bitkom vertritt mehr als 2.200 Mitgliedsunternehmen aus der digitalen Wirtschaft. Sie generieren in Deutschland gut 200 Milliarden Euro Umsatz mit digitalen Technologien und Lösungen und beschäftigen mehr als 2 Millionen Menschen. Zu den Mitgliedern zählen mehr als 1.000 Mittelständler, über 500 Startups und nahezu alle Global Player. Sie bieten Software, IT-Services, Telekommunikations- oder Internetdienste an, stellen Geräte und Bauteile her, sind im Bereich der digitalen Medien tätig, kreieren Content, bieten Plattformen an oder sind in anderer Weise Teil der digitalen Wirtschaft. 82 Prozent der im Bitkom engagierten Unternehmen haben ihren Hauptsitz in Deutschland, weitere 8 Prozent kommen aus dem restlichen Europa und 7 Prozent aus den USA. 3 Prozent stammen aus anderen Regionen der Welt. Bitkom fördert und treibt die digitale Transformation der deutschen Wirtschaft und setzt sich für eine breite gesellschaftliche Teilhabe an den digitalen Entwicklungen ein. Ziel ist es, Deutschland zu einem leistungsfähigen und souveränen Digitalstandort zu machen.

Bitkom e. V.
Albrechtstraße 10
10117 Berlin
T 030 27576-0
bitkom@bitkom.org

[bitkom.org](https://www.bitkom.org)

bitkom