

Projektbericht | April 2022

Quantifizierung der Treibhausgasminderungs- potenziale möglicher klimaschutzpolitischer Maßnahmen in Bayern für das Jahr 2030

Studie im Auftrag der Fraktion BÜNDNIS 90/
DIE GRÜNEN im Bayerischen Landtag

Sascha Samadi

*Unter Mitarbeit von Claus Barthel,
Ulrich Jansen, Jacqueline Klingen,
Thorsten Koska, Stefan Lechtenböhrer,
Dietmar Schüwer und Nora Weber*

Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben wurde im Auftrag der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN im Bayerischen Landtag durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

Wuppertal Institut (2022). *Quantifizierung der Treibhausgasminderungspotenziale möglicher Klimaschutzpolitischer Maßnahmen in Bayern für das Jahr 2030*. Bericht. Wuppertal.

Projektlaufzeit: November 2021 – März 2022

Autor:

Dr. Sascha Samadi, Senior Researcher im Forschungsbereich Sektoren und Technologien, Abteilung Zukünftige Energie- und Industriesysteme,
E-Mail: sascha.samadi@wupperinst.org

Weitere Mitarbeitende:

Dr. Claus Barthel, Ulrich Jansen, Jacqueline Klingen, Thorsten Koska,
Prof. Dr. Stefan Lechtenböhmer, Dietmar Schüwer und Nora Weber

Herausgeberin:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
www.wupperinst.org

Ansprechperson:

Dr. Sascha Samadi
Abteilung Zukünftige Energie- und Industriesysteme
sascha.samadi@wupperinst.org
Tel. +49 202 2492-107

Wuppertal, April 2022

Dieses Werk steht unter der Lizenz „Creative Commons Attribution 4.0 International“ (CC BY 4.0).
Der Lizenztext ist abrufbar unter: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen	4
Tabellenverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	8
1 Einleitung	9
2 Methodisches Vorgehen	11
3 Quantifizierung der Maßnahmen	15
3.1 Windenergie und Fotovoltaik	15
3.1.1 Verbesserung der Rahmenbedingungen für den Windenergieausbau	15
3.1.2 PV-Anlagen auf einem Teil der Anmoor- und Niedermoorflächen	18
3.1.3 Ausschöpfung des Windkraftpotenzials in den Staatswäldern	20
3.1.4 Solarpflicht für Gewerbegebäude	22
3.1.5 Solarpflicht für Wohngebäude	25
3.2 Mobilität	28
3.2.1 Verdopplung des ÖPNV und des Rad- und Fußverkehrsanteils	28
3.2.2 Steigerung des Schienen-Güterverkehrs auf einen Anteil von 40 %	32
3.2.3 Einführung eines Tempolimits von 130 km/h auf Autobahnen	34
3.2.4 Elektrifizierung der nicht elektrifizierten Schienenstrecken zu 95 %	38
3.2.5 Reaktivierung geeigneter Schienenstrecken bis 2030	41
3.3 Gebäudewärme und Effizienz	46
3.3.1 Energetische Sanierung des vermieteten Wohngebäudebestands	46
3.3.2 Ausbau erneuerbarer Energien in der Fernwärmeerzeugung	51
3.3.3 Nutzung des industriellen Abwärmepotenzials	54
3.3.4 Konsequente energetische Inspektion von Klimaanlageanlagen größer 12 kW	56
3.3.5 Neubauten im KfW-40-Standard	59
3.4 Landwirtschaft und Landnutzung	63
3.4.1 Reduktion der Tierbestände	63
3.4.2 Wiedervernässung der Moore	66
3.4.3 Weitgehende Vergärung anfallender Gülle in Biogasanlagen	69
3.4.4 Halbierung des Einsatzes von mineralischem Dünger bis 2030	72
3.5 Öffentliche Hand	75
3.5.1 Ambitionierte energetische Sanierung von Schulgebäuden	75
3.5.2 Ambitionierte energetische Sanierung der Liegenschaften	78
3.5.3 Ambitionierte energetische Sanierung von Hochschulen	81
3.5.4 Anschaffung von Elektro-Pkw für den staatlichen Fuhrpark	84
4 Zusammenfassung und Einordnung der Einsparpotenziale	87
5 Anhang	95
6 Literaturverzeichnis	98

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

Abkürzungen

AEE	Agentur für Erneuerbare Energien
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
bpb	Bundeszentrale für politische Bildung
BWE	Bundesverband WindEnergie e.V.
dena	Deutsche Energie Agentur GmbH
DEPI	Deutsches Pelletinstitut
Destatis	Statistisches Bundesamt
DGE	Deutsche Gesellschaft für Ernährung e. V.
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
dt.	Deutsch
DUH	Deutsche Umwelthilfe
DWD	Deutscher Wetterdienst
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GuD	Gas und Dampf
IWU	Institut Wohnen und Umwelt GmbH
LiKi	Länderinitiative Kernindikatoren
LNfz	Leichtes Nutzfahrzeug
MIV	Motorisierter Individualverkehr
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
Pers.-verkehr	Personenverkehr
Pkw	Personenkraftwagen
PV	Fotovoltaik
StMELF	Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
StMWi	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie
THG	Treibhausgas
UBA	Umweltbundesamt
VLS	Vollaststunden
WEA	Windenergieanlagen

Einheiten und Symbole

%	Prozent
°C	Grad Celsius
a	annum (Jahr)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -Äq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
g	Gramm
GW	Gigawatt
GWh	Gigawattstunde
h	Stunde
ha	Hektar
kg	Kilogramm
km	Kilometer
km ²	Quadratkilometer
kt	Kilotonne
kWh	Kilowattstunde
kW _p	Kilowatt Peak
m ²	Quadratmeter
Mio.	Million
Mrd.	Milliarde
Mt	Megatonne
MW	Megawatt
MW _p	Megawatt Peak
NGF	Nettogrundfläche
pkm	Personenkilometer
t	Tonne
Tkm	Tonnenkilometer
TWh	Terrawattstunde

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1	Übersicht wichtiger Elemente der methodischen Vorgehensweise zur Quantifizierung der THG-Minderungspotenziale-----	14
Tab. 3-1	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer umfassenden Verbesserung der Rahmenbedingungen für den Windenergieausbau -----	15
Tab. 3-2	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale der Errichtung von PV-Anlagen auf einem Teil der Anmoor- und Niedermoorflächen	18
Tab. 3-3	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer Ausschöpfung des Windkraftpotenzials in den Bayerischen Staatswäldern-----	20
Tab. 3-4	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer Solarpflicht für Gewerbegebäude-----	22
Tab. 3-5	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer Solarpflicht auch für Wohngebäude (nur zusätzliche Einsparung gegenüber einer Solarpflicht für Gewerbegebäude)-----	25
Tab. 3-6	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer Verdopplung des ÖPNVs und des Anteils des Rad- und Fußverkehrs -----	28
Tab. 3-7	Anteile verschiedener Verkehrsmittel und des Fußverkehrs an den gesamten Personenkilometern in Bayern im Jahr 2017 und nach der hier getroffenen Annahme im Jahr 2030-----	29
Tab. 3-8	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer Steigerung des Schienen-Güterverkehrs auf einen Anteil von 40 % -----	32
Tab. 3-9	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer Einführung eines Tempolimits von 130 km/h auf bayerischen Autobahnen -----	34
Tab. 3-10	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale der Elektrifizierung der bislang nicht elektrifizierten Schienenstrecken zu 95 % -----	38
Tab. 3-11	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer Reaktivierung geeigneter Schienenstrecken bis 2030 -----	41
Tab. 3-12	Streckenverlauf und Streckenlänge der hier angenommenen Reaktivierungen von Schienenstrecken in Bayern bis 2030 -----	42
Tab. 3-13	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale beschleunigter und fokussierter energetischer Sanierungen des vermieteten Wohngebäudebestands-----	46
Tab. 3-14	Angenommene vermietete Gebäudenutzfläche und angenommener Nutzenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser in Bayern für die Gebäudeeffizienzklassen E, F, G und H-----	47
Tab. 3-15	Angesetzte Emissionsfaktoren der Energieträger sowie Energieträgeranteile in der Wärmebereitstellung der betrachteten Gebäude vor und nach den Sanierungen	48
Tab. 3-16	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer deutlich verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien in der Fernwärmeerzeugung -----	51
Tab. 3-17	Anteile der durch zusätzliche erneuerbare Fernwärme verdrängten Energieträger im Jahr 2030 in der mittleren Abschätzung und deren jeweilige Emissionsfaktoren -----	52
Tab. 3-18	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer weitgehenden Nutzung des industriellen Abwärmepotenzials -----	54
Tab. 3-19	Anteile der durch Abwärme verdrängten Energieträger im Jahr 2030 in der mittleren Abschätzung und deren jeweilige Emissionsfaktoren-----	55
Tab. 3-20	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer konsequenten energetischen Inspektion von Klimaanlage mit einer Leistung von über 12 kW -----	56

Tab. 3-21	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale der Einführung des KfW-40-Standards als Mindeststandard im Neubau-----	59
Tab. 3-22	Annahmen zum (hauptsächlichen) Heizträger in neu errichteten Gebäuden in Abhängigkeit vom energetischen Standard der Gebäude-----	60
Tab. 3-23	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer Reduktion der Tierbestände in Bayern -----	63
Tab. 3-24	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer weitgehenden Wiedervernässung bayerischer Moore -----	66
Tab. 3-25	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer weitgehenden Vergärung anfallender Gülle in Biogasanlagen-----	69
Tab. 3-26	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer Halbierung des Einsatzes und der Herstellung von mineralischem Dünger bis 2030-----	72
Tab. 3-27	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer ambitionierten Sanierung bayerischer Schulgebäude bis 2030-----	75
Tab. 3-28	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer ambitionierten energetischen Sanierung bayerischer Liegenschaften bis 2030---	78
Tab. 3-29	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer ambitionierten energetischen Sanierung bayerischer Hochschulen bis 2030-----	81
Tab. 3-30	Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer konsequenten Anschaffung von Elektro-Pkw für den staatlichen Fuhrpark -----	84
Tab. 4-1	Minderungen des Erdgasbedarfs im Jahr 2030 bei Umsetzung der Maßnahmen (basierend auf mittleren Abschätzungen; zusätzlich zur Trendentwicklung; Annahme von Erdgas-Grenzkraftwerk) (in TWh/a)-----	93
Tab. 5-1	Vergleich der THG-Einsparungen der Maßnahmen (mittlere Abschätzung, zusätzlich zur Trendentwicklung) nach Methodik der Quantifizierung von erzeugtem oder eingespartem Strom (in Mt CO ₂ -Äq.) -----	95
Tab. 5-2	Vergleich der THG-Einsparungen der Maßnahmen (mittlere Abschätzung, zusätzlich zur Trendentwicklung) zwischen Verursacherbilanz und Quellenbilanz, in Mt CO ₂ -Äq. -----	96
Tab. 5-3	Vergleich der THG-Einsparungen der Maßnahmen (mittlere Abschätzung) zwischen Nettoeinsparung (ohne Minderungen der Referenzentwicklung) und Bruttoeinsparung (inkl. Minderungen der Referenzentwicklung), in Mt CO ₂ -Äq. --	97

Abbildungsverzeichnis

Abb. 4-1	Erwartete THG-Minderungen der untersuchten Maßnahmen im Bereich „Windenergie und Fotovoltaik“ im Jahr 2030 zusätzlich zu den Minderungen in einer Trendentwicklung (in Mt CO ₂ -Äq. pro Jahr) -----	87
Abb. 4-2	Erwartete THG-Minderungen der untersuchten Maßnahmen im Bereich „Mobilität“ im Jahr 2030 zusätzlich zu den Minderungen in einer Trendentwicklung (in Mt CO ₂ -Äq. pro Jahr)-----	88
Abb. 4-3	Erwartete THG-Minderungen der untersuchten Maßnahmen im Bereich „Gebäudewärme und Effizienz“ im Jahr 2030 zusätzlich zu den Minderungen in einer Trendentwicklung (in Mt CO ₂ -Äq. pro Jahr) -----	88
Abb. 4-4	Erwartete THG-Minderungen der untersuchten Maßnahmen im Bereich „Landwirtschaft und Landnutzung“ im Jahr 2030 zusätzlich zu den Minderungen in einer Trendentwicklung (in Mt CO ₂ -Äq. pro Jahr) -----	89
Abb. 4-5	Erwartete THG-Minderungen der untersuchten Maßnahmen im Bereich „Öffentliche Hand“ im Jahr 2030 zusätzlich zu den Minderungen in einer Trendentwicklung (in Mt CO ₂ -Äq. pro Jahr)-----	89
Abb. 4-6	Potenzielle THG-Minderungen im Jahr 2030 der untersuchten Maßnahmen im Vergleich zur notwendigen jährlichen THG-Einsparung zwischen 2018 und 2030 nach aktuellem bayerischen Klimaziel (in Mt CO ₂ -Äq. pro Jahr) -----	91

1 Einleitung

Nach Zielsetzung der Bayerischen Staatsregierung soll Bayern bis 2040 klimaneutral werden. Als Zwischenziel für das Jahr 2030 wurde von der Staatsregierung eine Reduktion der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) um 65 % gegenüber dem Niveau von 1990 festgelegt. Um diese Ziele erreichen zu können, wird in den kommenden Jahren gegenüber der Vergangenheit ein deutlich schnellerer Rückgang der Emissionen realisiert werden müssen. So sind die THG-Emissionen des Freistaats in den 28 Jahren zwischen 1990 und 2018 lediglich um 13 % gesunken. In den zwölf Jahren von 2018 bis 2030 müssen sie zur Erreichung des 2030-Ziels hingegen um 60 % sinken.

Vor diesem Hintergrund hat die Landtagsfraktion von BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN in Bayern Ende 2021 das Wuppertal Institut beauftragt, das THG-Minderungspotenzial von 23 Klimaschutzmaßnahmen für das Zieljahr 2030 abzuschätzen. Bei der Quantifizierung des Potenzials wird angenommen, dass die Maßnahmen kurzfristig (also z. B. im Laufe des Jahres 2022) umgesetzt bzw. initiiert werden.

Die Maßnahmen werden in dieser Studie in die folgenden fünf Bereiche eingeordnet:

- Windenergie und Fotovoltaik (fünf Maßnahmen)
- Gebäudewärme und Effizienz (fünf Maßnahmen)
- Mobilität (fünf Maßnahmen)
- Landwirtschaft und Landnutzung (vier Maßnahmen)
- Öffentliche Hand (vier Maßnahmen)

Bei den 23 Klimaschutzmaßnahmen handelt es sich zum Teil um konkrete politische Vorhaben, die in Form gesetzlicher Regelungen erlassen werden könnten (wie z. B. die Einführung eines schärferen Effizienz-Mindeststandards im Neubau), in vielen Fällen handelt es sich aber um Zielsetzungen, die nicht direkt durch eine einzelne gesetzliche Anpassung umgesetzt werden können (wie z. B. die Steigerung des Anteils des Schienengüterverkehrs auf 40 % bis zum Jahr 2030).¹ Für die Realisierung dieser Zielsetzungen dürfte eine Kombination verschiedener landespolitischer Maßnahmen und Initiativen sowie Anpassungen von Rahmenbedingungen notwendig sein. Häufig wird dabei auch eine Unterstützung durch Maßnahmen anderer politischer Ebenen – nicht zuletzt der Bundesebene – von Bedeutung sein.

Im folgenden Kapitel 2 wird zunächst die grundsätzliche Methodik erläutert, mit der die THG-Minderungspotenziale abgeschätzt werden. In Kapitel 3 wird anschließend das Minderungspotenzial für jede einzelne Maßnahme quantifiziert und es wird beschrieben, wie das Potenzial abgeleitet wurde. Dabei wird in Hinblick auf die von der Auftraggeberin vorgegebenen Zielsetzungen davon ausgegangen, dass diese Ziele bis 2030 auch erreicht werden.² Das abschließende Kapitel 4 fasst die ermittelten Einsparpotenziale zusammen und ordnet sie ein.

¹ Im Rahmen der vorliegenden Studie werden dennoch zwecks Vereinfachung alle von der Auftraggeberin vorgelegten Maßnahmen und Zielsetzungen als „Maßnahmen“ bezeichnet.

² Nicht Gegenstand der vorliegenden Studie sind hingegen Analysen, auf welche Weise (d. h. mit welchen konkreten politischen Instrumenten) die Umsetzung dieser Maßnahmen bzw. die Realisierung der Zielsetzungen erreicht werden kann.

Bei der Interpretation der Ergebnisse der vorliegenden Studie ist zu beachten, dass das Ziel der Studie in erster Linie ist, ein besseres Verständnis der ungefähren Größenordnung der THG-Minderungspotenziale der betrachteten Maßnahmen zu erlangen. Präzisere Abschätzungen der jeweiligen Einsparpotenziale würden aufwändigere Analysen erfordern. So werden im Rahmen dieser Studie beispielsweise infolge eingeschränkter Datenverfügbarkeiten häufig vereinfachte Annahmen getroffen, um für Deutschland vorliegende Werte auf Bayern herunterzubrechen. Zudem konnten im Rahmen der vorliegenden Studie keine Modellierungen beispielsweise des Energiesystems durchgeführt werden. Entsprechende Modellierungen können zu einem besseren Verständnis der genauen Wirkungen und Wechselwirkungen einzelner Maßnahmen beitragen.

Ebenfalls ist darauf hinzuweisen, dass in der vorliegenden Studie lediglich das THG-Minderungspotenzial der vorgeschlagenen Maßnahmen analysiert wird. Die mit der Umsetzung der Maßnahmen verbundenen Kosten aber auch deren zusätzliche – über den Klimaschutz hinausgehende – Nutzen (wie z. B. reduzierte Lärmbelastung von weniger motorisiertem Individualverkehr, verbesserte Gesundheit durch weniger Fleischkonsum etc.) werden im Rahmen der vorliegenden Studie nicht untersucht.

2 Methodisches Vorgehen

Die vorliegende Studie quantifiziert das THG-Minderungspotenzial von 23 Klimaschutzmaßnahmen. Die Einsparpotenziale der einzelnen Maßnahmen werden dabei für das Jahr 2030 angegeben, d. h. es erfolgt insbesondere keine Berechnung der kumulativen Emissionseinsparungen der Maßnahmen von der Gegenwart bis zum Jahr 2030 oder auch von Einsparungen über das Jahr 2030 hinaus. Zum einen begründet sich der Fokus auf das Jahr 2030 durch die Bedeutung dieses Jahres für die Klimaschutzpolitik; so gibt es sowohl auf landespolitischer als auch auf bundes- und europapolitischer Ebene konkrete THG-Minderungsziele für dieses Jahr. Zum anderen würde die Berechnung kumulativer Emissionseinsparungen detaillierte Annahmen zu den genauen Umsetzungszeitpunkten der Maßnahmen sowie Analysen zu den wahrscheinlichen zeitlichen Verläufen von deren Wirkungen erfordern, was über den Rahmen der Möglichkeiten der vorliegenden Studie hinausgeht.

Im Fokus der vorliegenden Arbeit stehen die THG-Einsparungen, die im Jahr 2030 insgesamt durch eine Maßnahme erreicht werden können, unabhängig davon, wo diese Einsparungen anfallen bzw. bilanziert werden. Gleichzeitig wird jedoch für jede Maßnahme zusätzlich abgeschätzt, wie hoch die Emissionseinsparungen in Bayern selbst sein könnten, d. h. welche Einsparungen auch in der bayerischen THG-Quellenbilanz (gemäß Territorialprinzip) wirksam werden.

In der vorliegenden Studie wird in erster Linie auf die *Nettoeinsparungen* der Maßnahmen fokussiert. Bei den Nettoeinsparungen werden diejenigen Einsparungen, die auch ohne Umsetzung der Maßnahmen in einer Referenzentwicklung zu erwarten wären, von den Bruttoeinsparungen abgezogen.³ So ist bis 2030 beispielsweise ein gewisser – wenn auch langsamer – weiterer Windenergie-Ausbau in Bayern auch ohne Änderungen der landespolitischen Bedingungen für den Windenergieausbau zu erwarten, so dass nicht 100 % des infolge förderlicherer Rahmenbedingungen zu erwartenden Ausbaus auf entsprechende gesetzliche Änderungen zurückgeführt werden können. Durch die Ausweisung der Nettoeinsparungen kann das tatsächliche THG-Minderungspotenzial *zusätzlicher* politischer Maßnahmen zur Zielerreichung dargestellt werden. Auch wenn auf die Nettoeinsparungen fokussiert wird, werden dennoch die Bruttoeinsparungen in den Ausführungen zu den einzelnen Maßnahmen in Kapitel 3 erwähnt. Zudem werden in Tabelle 5-3 im Anhang für jede Maßnahme die Unterschiede zwischen Brutto- und Nettoeinsparungen aufgeführt.

Während für die Quantifizierung des THG-Minderungspotenzial der einzelnen Maßnahmen im jeweils adressierten Bereich (z. B. beim Ausbau der Windenergie in Bayern) angenommen wird, dass ohne Umsetzung der Maßnahme eine Weiterentwicklung des Trends zu erwarten ist, wird für die Entwicklung des gesamten Energiesystems in Deutschland angenommen, dass die aktuellen klimapolitischen Ziele der Bundesregierung bis 2030 realisiert werden. Annahmen zur Entwicklung des Gesamtsystems sind an vielen Stellen notwendig, um das Minderungspotenzial von

³ Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die im Rahmen dieser Studie angesetzten Referenzentwicklungen bei den einzelnen Maßnahmen Fortschreibung der Trends der letzten Jahre sind. D. h., dass insbesondere mögliche zusätzliche Wirkungen von bereits angekündigten landes- oder bundespolitischen Maßnahmen nicht als Teil der Referenzentwicklungen berücksichtigt werden.

Maßnahmen für das Jahr 2030 quantifizieren zu können. So wird zum Beispiel bei der Abschätzung des Potenzials der Einführung eines Tempolimits auf deutschen Autobahnen angenommen, dass es bis 2030 zu einer deutlichen Erhöhung der Anzahl der Elektroautos sowie zu einer gewissen Verlagerung des Personenverkehrs auf öffentliche Verkehrsmittel kommen wird, um die bundespolitischen Ziele zur Minderung der THG-Emissionen im Verkehrssektor erreichen zu können.

Als Orientierung für Eckdaten des Energiesystems im Jahr 2030, die – weitgehend – in Einklang mit den aktuellen energie- und klimapolitischen Zielen des Bundes stehen, wird insbesondere auf das Szenario KN2045 zurückgegriffen, das von Prognos, Öko-Institut und Wuppertal Institut im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende erarbeitet und 2021 veröffentlicht wurde (Prognos et al. 2021).⁴ Weitere wichtige Annahmen für die Quantifizierung der Maßnahmen, die nicht aus dieser Szenariostudie entnommen werden konnten, wurden entweder aus weiteren Literaturquellen gewonnen oder selbst getroffen.

Hinsichtlich der Systemgrenze bei der Berücksichtigung von THG-Emissionsänderungen werden neben den direkten Änderungen der Emissionen durch eine Maßnahme (z. B. weniger CO₂-Ausstoß durch geringeren Kraftstoffbedarf infolge einer Verlagerung von Teilen des Personenverkehrs auf den öffentlichen Verkehr) auch die indirekten Änderungen der Emissionen durch veränderte Nachfrage nach Strom und Fernwärme (z. B. erhöhter Strombedarf durch zusätzlichen schienengebundenen Verkehr infolge der Verlagerung von Personenverkehr auf den öffentlichen Verkehr) berücksichtigt. Dabei fließen auch die auf Grundlage aktueller Studien abgeschätzten Vorketten-Emissionen fossiler Energieträger in die Quantifizierungen ein. Aufgrund einer unvollständigen Datenlage sowie einer insgesamt als relativ gering eingeschätzten Relevanz fließen hingegen die Vorketten-Emissionen physischer Anlagen (z. B. von Windenergieanlagen oder Gaskraftwerken) sowie von Infrastrukturen (z. B. von Oberleitungen für die Elektrifizierung von Schienenstrecken) nicht in die Quantifizierungen der THG-Einsparpotenziale ein.

Auch mögliche Wechselwirkungen einzelner Klimaschutzmaßnahmen mit dem europäischen Emissionshandel werden in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt bzw. nicht abgeschätzt.⁵ Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Maßnahmen selbst werden hingegen im zusammenfassenden Kapitel 4 bei der Darstellung der Gesamtwirkung der Einsparpotenziale der betrachteten Maßnahmen berücksichtigt. So würde beispielsweise die erfolgreiche Umsetzung der Maßnahme einer

⁴ Dabei ist darauf hinzuweisen, dass in diesem Szenario einzelne der energiepolitischen Ziele, die von der neuen Bundesregierung im Koalitionsvertrag neu formuliert wurden, nicht erreicht werden. So beträgt der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch in diesem Szenario im Jahr 2030 „nur“ 69 %, d. h. es werden nicht die seitens der neuen Bundesregierung verfolgten 80 % realisiert.

⁵ Im Hinblick auf Maßnahmen, wie dem Ausbau erneuerbarer Energien im Stromsystem, die zu Emissionsminderungen in denjenigen Sektoren führen, die unter den europäischen Emissionshandel fallen, wird teilweise argumentiert, dass diese Emissionsminderungen an anderen Stellen wieder durch Mehremissionen kompensiert würden. Denn schließlich gebe es im europäischen Emissionshandel eine feste Emissionsobergrenze. Minderungen von Emissionen an einer Stelle würden folglich – aufgrund freiwerdender Emissionszertifikate und einhergehender sinkender Zertifikatspreise am Markt – zu Mehremissionen an anderer Stelle im System führen. Dieser Auffassung zufolge brauchen und sollten in den vom Emissionshandel erfassten Sektoren keine über das Instrument des Emissionshandels hinausgehende Emissionsminderungsmaßnahmen umgesetzt werden. Diese Auffassung wird hier allerdings nicht bzw. nur eingeschränkt geteilt, unter anderem weil der durch zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen induzierte dämpfende Effekt auf den Preis der Emissionszertifikate die politische Durchsetzbarkeit von relativ ambitionierten Obergrenzen im EU-Emissionshandel wahrscheinlicher machen dürfte und somit dennoch ein positiver Effekt von solchen zusätzlichen Maßnahmen für den Klimaschutz plausibel erscheint.

Verlagerung großer Teile des Personenverkehrs auf den öffentlichen Verkehr das Potenzial der Emissionsminderungen eines Tempolimits verringern. Aufgrund solcher Wechselwirkungen liegt das Gesamteinsparpotenzial aller Maßnahmen niedriger als die einfache Summe der THG-Einsparungen der Einzelmaßnahmen.

Hinsichtlich der Bewertung der THG-Wirkung von Maßnahmen, die zusätzlichen Strom aus erneuerbaren Energien bereitstellen, den Strombedarf senken oder zusätzliche Stromnachfrage (zur Verdrängung fossiler Energieträger) erzeugen, wird hier auf die Methode der Betrachtung eines Grenzkraftwerks zurückgegriffen. Entsprechend der aktuellen bundespolitischen Zielsetzungen wird dabei für 2030 davon ausgegangen, dass dann keine (wesentliche) Stromerzeugung mehr durch Kohlekraftwerke erfolgt und dass stattdessen erdgasbetriebene Kraftwerke die Residuallast (d. h. die nicht durch erneuerbare Energien gedeckte Last) abdecken. Es wird also davon ausgegangen, dass 2030 zusätzliche erneuerbare Stromerzeugung und eingesparte Strommengen die Stromerzeugung in erdgasbetriebenen Kraftwerken reduzieren, während zusätzlicher Strombedarf durch entsprechende Kraftwerke bedient wird. Dahinter steckt die Annahme, dass bestehende Erneuerbare-Energien-Anlagen aufgrund ihrer niedrigen variablen Kosten stets in vollem Umfang genutzt werden und zusätzlicher Strombedarf daher – solange noch kein zu 100 % auf erneuerbaren Energien beruhendes Stromsystem besteht – stets eine zusätzliche Stromerzeugung in einem fossil betriebenen Kraftwerk auslösen wird.

Das Ansetzen eines Erdgaskraftwerks als Grenzkraftwerk erscheint für eine isolierte Betrachtung der im Jahr 2030 tatsächlich zu erwartenden Wirkung einzelner Maßnahme auf die THG-Emissionen als eine plausible – wenn auch vereinfachte – Annahme. (Eine umfassende Energiesystemmodellierung für eine präzisere Abschätzung der Wirkungen im Stromsystem im Jahr 2030 infolge der Umsetzung einzelner Maßnahmen kann im Rahmen der vorliegenden Studie nicht geleistet werden.)

Eine alternative Methode zur Quantifizierung von Änderungen der Stromerzeugung und des Strombedarfs ist die Verwendung eines Emissionsfaktors, der dem Strommix – in diesem Fall des Jahres 2030 – entspricht. Befürworter*innen dieser Methode sehen es nicht als gerechtfertigt an, für zusätzliche Stromnachfrage nur die relativ „dreckigen“ Grenzkraftwerke anzusetzen, anstatt dieser zusätzlichen Stromnachfrage auch eine anteilige Deckung durch die bestehenden Erneuerbare-Energien-Anlagen zuzugestehen.

Letztlich lassen sich Pro- und Kontra-Argumente für beide Methoden der Emissionszuschreibung von erneuerbar erzeugtem Strom oder veränderter Stromnachfrage finden. In der vorliegenden Studie wird, wie erwähnt, die Methode der Betrachtung eines Grenzkraftwerks gewählt, mit der Annahme eines Erdgas-GuD-Grenzkraftwerks mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 57 %. Es wird jedoch im Anhang in Tabelle 5-1 dargestellt, wie sich die mittleren THG-Minderungspotenziale der einzelnen Maßnahmen ändern würden, wenn statt dem Erdgas-Grenzkraftwerk der erwartete durchschnittliche Strommix des Jahres 2030 (80 % erneuerbare Energien, 20 % Erdgas) für den Emissionsfaktor des Stroms angesetzt werden würde.

Das THG-Einsparpotenzial und die wesentlichen zugrunde liegenden Annahmen zur Berechnung dieses Potenzials werden in Kapitel 3 für jede der Maßnahmen zunächst in einer Tabelle zusammenfassend dargestellt und anschließend in Textform

ausführlich beschrieben. Dabei werden die zentralen Annahmen aufgeführt und die wesentlichen verwendeten Literaturquellen zitiert. Zudem wird den mit einer solchen Quantifizierung einhergehenden Unsicherheiten durch die Ableitung einer Spannweite der zu erwartenden Emissionseinsparungen Rechnung getragen. So wird für jede Maßnahme eine untere, mittlere und obere Abschätzung der für das Jahr 2030 zu erwartenden Emissionseinsparung abgeleitet. Die mittlere Abschätzung stellt dabei die „beste“ Abschätzung („best guess“) dar, die unteren und oberen Abschätzungen können als wahrscheinliche Unter- und Obergrenzen der THG-Einsparpotenziale der jeweiligen Maßnahmen angesehen werden.

Im abschließenden Kapitel 0 erfolgt eine Zusammenfassung und Einordnung der Einsparpotenziale. Dabei werden die identifizierten Potenziale miteinander verglichen. Auch ihre kumulierte Wirkung im Vergleich zu den insgesamt bis 2030 notwendigen Einsparpotenzialen zur Erreichung des Klimaschutzziels der bayerischen Landesregierung für 2030 (Reduktion der THG-Emissionen um 65 % gegenüber 1990) wird verdeutlicht. Im Anhang werden zudem die Auswirkungen unterschiedlicher methodischer Ansätze zur Bestimmung des Minderungspotenzials (Grenzkraftwerk ggü. Strommix, Verursacherbilanzierung ggü. Quellenbilanzierung, Netto- ggü. Bruttowirkung) dargestellt.

Tab. 2-1 fasst die wesentlichen Elemente der methodischen Vorgehensweise zur Quantifizierung der THG-Minderungspotenziale der verschiedenen Maßnahmen in der vorliegenden Studie zusammen.

Tab. 2-1 Übersicht wichtiger Elemente der methodischen Vorgehensweise zur Quantifizierung der THG-Minderungspotenziale

- Ermittlung des Einsparpotenzials (ausschließlich) für das Jahr 2030
- Fokus auf *insgesamt* vermiedenen Emissionen (Verursacherprinzip)
- Fokus auf zusätzliche (*Netto-*) Emissionsminderungen (über Referenzentwicklung hinaus)
- Vereinfachte Abschätzungen der Referenzentwicklungen (Trendfortschreibungen)
- Annahme für das Gesamtenergiesystem: Klimapolitische Ziele für 2030 werden erreicht
- Vorketten-Emissionen fossiler Energieträger berücksichtigt
- Vorketten-Emissionen physischer Anlagen und Infrastrukturen nicht berücksichtigt
- Mögliche Wechselwirkungen im Rahmen des Emissionshandels nicht berücksichtigt
- Erdgas-Grenzkraftwerk angesetzt bei Änderungen der Stromnachfrage & -erzeugung
- Erwartete Emissionsminderung als Spannweiten (niedrig, mittel, hoch) abgeschätzt

3 Quantifizierung der Maßnahmen

3.1 Windenergie und Fotovoltaik

3.1.1 Verbesserung der Rahmenbedingungen für den Windenergieausbau

Tab. 3-1 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer umfassenden Verbesserung der Rahmenbedingungen für den Windenergieausbau

	Niedrig	Mittel	Hoch
Anzahl der zwischen Mitte 2022 und Mitte 2030 jährlich durchschnittlich neu installierten WEA in Bayern	60	120	190
Durchschnittliche Nennleistung der neu errichteten WEA in Bayern (in MW pro Anlage)	4,5	5,0	5,5
Durchschnittliche jährliche Volllaststunden der neu errichteten Anlagen	2250	2400	2500
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	1716	4241	8025

Mittlere Abschätzung:

Für die Quantifizierung dieser Maßnahme wird angenommen, dass es ab Mitte 2022 zu einer Abschaffung der 10-H-Regelung und einer auch darüberhinausgehenden Verbesserung der landes- und bundespolitischen Rahmenbedingungen für den Ausbau der Windenergie an Land kommen wird. Es wird hier unterstellt, dass dadurch bis 2030 wieder ein Windenergie-Ausbau erreicht werden kann (in Bezug auf die Anzahl der neu errichteten Anlagen), wie er im Schnitt auch in den Jahren von 2013 bis 2017 realisiert wurde (120 Anlagen pro Jahr, StMWi 2021).⁶ Dabei wird zusätzlich angenommen, dass die durchschnittliche Nennleistung einer zwischen 2022 und 2030 errichteten Windenergieanlage 5 MW betragen wird.

Zu berücksichtigen ist, dass in der Realität aufgrund der Vorlaufzeiten eine Änderung der rechtlichen Rahmenbedingungen nicht unmittelbar zu einem deutlichen Anstieg der Neuinstallationen führen wird, so dass v. a. in der zweiten Hälfte des Jahrzehnts ein höherer durchschnittlicher jährlicher Zubau notwendig sein wird als die genannten 120 Anlagen. Vor dem Hintergrund, dass 2014 über 150 Anlagen zugebaut wurden (Bayerische Staatsregierung o. J.), erscheint die Zielerreichung dennoch realistisch, insbesondere wenn sie tatsächlich auf Bundes- und Landesebene durch weitere förderliche Rahmenbedingungen für den Windenergieausbau an Land flankiert wird.

Zur Einordnung: Der unter dieser Annahme realisierte durchschnittliche Windenergieausbau in Bayern zwischen 2022 und 2030 entspricht rund 7 % des in Deutschland zwischen 2022 und 2030 notwendigen Ausbaus. Für den in Deutschland notwendigen Ausbau wird eine in Deutschland installierte Kapazität von Onshore-Anlagen im Jahr 2030 von 100 GW unterstellt. Diese wird nach BMWK (2022)

⁶ In den Jahren nach 2017 haben ökonomischen Analysen des DIW zufolge die Auswirkungen der 10-H-Regelung zu einem Rückgang des Windenergie-Ausbaus in Bayern um mindestens 60 und bis zu 90 % geführt (Stede und May 2019).

mindestens notwendig sein, um zusammen mit dem im Koalitionsvertrag vorgesehenen Ausbau der Windenergieanlagen auf dem Meer und der PV-Anlagen den für 2030 vorgesehenen Erneuerbaren-Anteil von 80 % realisieren zu können. (Bayern hat aktuell einen Anteil von knapp 5 % an der in Deutschland installierten Onshore-Windenregiekapazität (BWE 2022).

Unter der Annahme, dass die in Bayern neu errichteten Onshore-Anlagen 2400 Volllaststunden realisieren werden (basierend auf Rehfeldt und Kruse (2020), können im Jahr 2030 rund 11,5 TWh Strom aus diesen Anlagen erzeugt werden.

Es wird hier angenommen, dass dieser erneuerbare Strom im Jahr 2030 die Stromerzeugung aus Erdgaskraftwerken ersetzt (s. Erläuterung in Kapitel 2) und dadurch pro kWh 353 g CO₂ vermieden werden. Hinzu kommen vermiedene Vorketten-Emissionen von 45 g CO₂-Äq. pro kWh.

In der Summe kann diese Maßnahme im Jahr 2030 die THG-Emissionen um 4576 kt CO₂-Äq. reduzieren. Wird angenommen, dass (entsprechend des Windenergie-Zubaus in Bayern der Jahre 2018 bis 2020) bis 2030 im Referenzfall nur 24 MW pro Jahr zugebaut werden, beträgt im Jahr 2030 die zusätzliche Emissionsminderung dieser Maßnahme, die also über die Emissionsminderung der Trendentwicklung hinausgeht, **4241 kt CO₂-Äq.**

Aufgrund der engen Verbindungen im Stromsystem wird ein Großteil (Schätzung: rund 90 %) dieser Emissionsminderungen in Erdgaskraftwerken außerhalb Bayerns realisiert. Dahinter steckt zum einen die Annahme, dass der gegenwärtige Anteil der installierten konventionellen Kraftwerkskapazität (fossile Kraftwerke plus Atomkraftwerke) in Bayern (11 %, Bundesnetzagentur 2021) an der gesamten ins deutsche Stromnetz einspeisenden Kapazität bis 2030 konstant bleiben wird. Zum anderen liegt die Annahme zugrunde, dass eine zusätzliche Einspeisung erneuerbarer Energien konventionelle Kraftwerkserzeugung geografisch gleichmäßig verdrängt.

Niedrige Abschätzung:

Für die niedrige Abschätzung wird angenommen, dass infolge des Wegfalls der 10-H-Regelung und der Umsetzung weiterer förderlicher Bedingungen für den Ausbau der Windenergie an Land zwischen 2022 und 2030 im Durchschnitt die Hälfte der zwischen 2013 und 2017 im Schnitt pro Jahr installierten Onshore-Anlagen zugebaut werden kann (60 Anlagen pro Jahr). Dies könnte insbesondere der Fall sein, falls es eine unzureichende Anzahl an geeigneten und in der Bevölkerung vor Ort ausreichend akzeptierten Standorten geben sollte. Zusätzlich werden für diese niedrige Abschätzung gegenüber der mittleren Abschätzung eine etwas geringere durchschnittliche Nennleistung der Anlagen (4,5 MW) sowie niedrigere Volllaststunden (2250) angenommen.

Bei sonst gleichen Annahmen könnten dann im Jahr 2030 in der Summe durch diese Maßnahme – über die Einsparungen in der Trendentwicklung hinaus – noch **1716 kt CO₂-Äq.** vermieden werden.

Hohe Abschätzung:

Für die höhere Abschätzung wird angenommen, dass es durch den Wegfall der 10-H-Regelung und die Einführung weiterer förderlicher landes- und bundespolitischer Rahmenbedingungen für die Windenergie an Land zwischen 2022 und 2030 zu

einem Zubau der Onshore-Windenergiekapazität kommen wird, der einem „angemessenen“ Anteil Bayerns an dem bis 2030 bundesweit benötigten Onshore-Zubau entspricht. Dabei wird entsprechend der Angaben in BMWK (2022) angenommen, dass zwischen 2022 und 2030 bundesweit im Schnitt brutto rund 8 GW an Onshore-Windenergieanlagen installiert werden müssen.

Der „angemessene“ Anteil Bayerns an diesem Zubau wird über zwei aktuelle Studien abgeschätzt, die jeweils einen kostenoptimalen Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland modellieren. In der Studie vom DIW (Göke et al. 2021) beträgt der Anteil Bayerns an der insgesamt in Deutschland installierten Onshore-Kapazität in einem klimaneutralen Energiesystem 18 %. In einer Studie im Auftrag des Bundesverbands Erneuerbare Energien (Fraunhofer ISE 2021) beträgt der entsprechende Anteil hingegen 8 %. Hier wird der Mittelwert dieser beiden Studien (13 %) herangezogen. Dies würde bedeuten, dass zwischen 2022 und 2030 in Bayern pro Jahr im Schnitt (brutto) rund 1 GW an Anlagenkapazität zugebaut werden müsste, was etwa 190 Anlagen entsprechen würde, sofern für die durchschnittliche Größe der neuen Anlagen 5,5 MW angesetzt werden.

Auch hier ist darauf hinzuweisen, dass ein entsprechender jährlicher Zubau von Windenergie-Anlagen an Land aufgrund der notwendigen Planungs- und Realisierungszeiträume in den nächsten rund zwei bis drei Jahren sicherlich nicht realisiert werden kann. Ein entsprechend höherer durchschnittlicher Zubau wird in der zweiten Hälfte des laufenden Jahrzehnts notwendig sein.

Bei sonst gleichen Annahmen könnten in diesem Fall im Jahr 2030 in der Summe – und über die Einsparungen in der Trendentwicklung hinaus – **8025 kt CO₂-Äq.** vermieden werden.

3.1.2 PV-Anlagen auf einem Teil der Anmoor- und Niedermoorflächen

Tab. 3-2 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale der Errichtung von PV-Anlagen auf einem Teil der Anmoor- und Niedermoorflächen

	Niedrig	Mittel	Hoch
Anmoor- und Niedermoorflächen in Bayern (in ha)	197.700	197.700	197.700
Anteil der Moorflächen, auf denen bis 2030 PV-Anlagen installiert werden können	3 %	5 %	10 %
Installierbare PV-Leistung pro ha (in MW _p)	1,0	1,0	1,0
Durchschnittliche jährliche VLS der neu installierten PV-Anlagen (inkl. Korrekturfaktor wegen Zwischenspeicherung und Abregelung)	900	900	900
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	1734	3148	6682

Mittlere Abschätzung:

Für die mittlere Abschätzung des Potenzials von Maßnahmen zur deutliche Attraktivierung der Errichtung von PV-Anlagen auf bayerischen Anmoor- und Niedermoorflächen wurde in Absprache mit dem Auftraggeber beschlossen, bis 2030 von einer fünfprozentigen Abdeckung der entsprechenden Flächen mit PV-Anlagen auszugehen. Die Anmoor- und Niedermoorflächen in Bayern machen zusammen knapp 200.000 ha aus. Ein Anteil von 5 % an diesen Flächen würde bedeuten, dass bis 2030 auf knapp 10.000 ha PV-Anlagen errichtet werden.

Bei aktuellen PV-Anlagen kann von einer Kapazität pro ha von 1 MW_p ausgegangen werden (Fraunhofer ISE 2022), wodurch bis 2030 knapp 10.000 MW_p auf Moorflächen errichtet werden könnten. Es werden zunächst für diese Anlagen Volllaststunden im Jahr 2030 in Höhe von 1000 angenommen. Diese Volllaststunden werden für die hier vorgenommene Quantifizierung des THG-Einsparpotenzials aber um 10 % reduziert (auf 900 Stunden), da für das Jahr 2030 in Bayern bei einem hier grundsätzlich angenommenen starken PV-Zubau mit gewissen energetischen Verlusten der PV-Stromerzeugung zu rechnen ist. Diese Verluste werden sich hauptsächlich in den Sommermonaten infolge von notwendigen Zwischenspeicherungen (v. a. in Batterien) und teilweise auch Abregelungen in besonders sonnenreichen Stunden ergeben (Koch et al. 2020). Unter diesen Annahmen beträgt der erwartete Stromertrag im Jahr 2030 rund 8,9 TWh.

Unter der Annahme, dass dieser erneuerbare Strom im Jahr 2030 die Stromerzeugung aus Erdgaskraftwerken ersetzt (s. Erläuterung in Kapitel 2), wird eine CO₂-Vermeidung pro kWh von 353 g abgeleitet. Hinzu kommen vermiedene Vorketten-Emissionen von 45 g CO₂-Äq. pro kWh.

In der Summe kann diese Maßnahme die Emissionen um 3534 kt CO₂-Äq. im Jahr 2030 reduzieren. Wird angenommen, dass im Referenzfall zwischen 2022 und 2030

im Schnitt 120 MW/a auf bayerischen Moorflächen zugebaut werden, beträgt 2030 die zusätzliche Emissionsminderung dieser Maßnahme **3148 kt CO₂-Äq.**⁷

Aufgrund der engen Verbindungen im Stromsystem wird ein Großteil (Schätzung: rund 90 %) dieser Emissionsminderungen in Erdgaskraftwerken außerhalb Bayerns realisiert werden.

Dabei ist darauf hinzuweisen, dass aus Gründen des Klima- und Artenschutzes Wiedervernässungen der Moorflächen vor der Errichtung der PV-Anlagen durchgeführt werden sollten. Bei der hier vorgenommenen Abschätzung der THG-Emissionseinsparungen wird aber zwecks Verdeutlichung der unterschiedlichen Wirkungen des PV-Ausbaus auf der einen Seite und der Wiedervernässungen auf der anderen Seite nur die Wirkung der Stromerzeugung der errichteten PV-Anlagen berücksichtigt. Die THG-Emissionsminderungen, die durch eine Wiedervernässung von Moorflächen zu erwarten sind, werden in einer anderen Maßnahme abgeschätzt (s. Abschnitt 3.4.2).⁸

Niedrige Abschätzung:

Für die niedrige Abschätzung wird angenommen, dass lediglich 3 % der entsprechenden Moorflächen bis 2030 mit PV-Anlagen genutzt werden. Bei sonst gleichen Annahmen könnten die Emissionen in diesem Fall im Jahr 2030 – zusätzlich zu den Einsparungen in der Trendentwicklung – um **1734 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

Hohe Abschätzung:

Für die hohe Abschätzung wird angenommen, dass 10 % der entsprechenden Moorflächen bis 2030 mit PV-Anlagen genutzt werden. Bei sonst gleichen Annahmen könnten die Emissionen in diesem Fall im Jahr 2030 – zusätzlich zu den Einsparungen in der Trendentwicklung – um **6682 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

⁷ 120 MW_p entspricht der Größe der 2021 auf einer Moorfläche ans Netz gegangenen großen PV-Anlage „Solarpark Schornau“.

⁸ Sofern angenommen wird, dass die gesamte Moorfläche, auf der in dieser mittleren Annahme PV-Anlagen installiert werden, zusätzlich wiedervernässt wird, ließen sich im Jahr 2030 (bei einer unterstellten Einsparung von 20 t CO₂-Äq. pro Hektar durch eine Wiedervernässung) zusätzliche 198 kt CO₂-Äq. einsparen.

3.1.3 Ausschöpfung des Windkraftpotenzials in den Staatswäldern

Tab. 3-3 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer Ausschöpfung des Windkraftpotenzials in den Bayerischen Staatswäldern

	Niedrig	Mittel	Hoch
Noch erschließbare Standorte für WEA im bayerischen Staatswald	100	100	100
Durchschnittliche Anzahl der möglichen WEA pro Standort	2,5	3	4
Anteil der bis 2030 tatsächlich realisierbaren WEA an den grundsätzlich erschließbaren WEA im bayerischen Staatswald	40 %	60 %	80 %
Durchschnittliche Nennleistung der neu errichteten WEA im bayerischen Staatswald	4,5	5	5,5
Durchschnittliche jährliche Volllaststunden der neu installierten WEA	2250	2400	2500
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	402	858	1748

Mittlere Abschätzung:

Für die Abschätzung des Potenzials dieser Maßnahme wurde eine aktuelle Untersuchung des Bayerischen Wirtschaftsministeriums zugrunde gelegt, nach der es in Bayerischen Staatsforsten rund 100 Standorte gibt, die für die Errichtung neuer Windenergieanlagen in Frage kommen (StMWi 2021). Pro Standorte könnten „mehrere Windräder errichtet werden“ – laut einem Pressebericht (Storch 2021a) ist mit bis zu 5 Anlagen pro Standort zu rechnen. Für die mittlere Abschätzung wird angenommen, dass pro Standort im Schnitt drei Windenergieanlagen gebaut werden können. Zusätzlich wird angenommen, dass 60 % der 100 in Frage kommenden Standorte bis 2030 tatsächlich realisiert werden können. Dies berücksichtigt, dass es wahrscheinlich ist, dass einzelne Standorte nach näherer Untersuchung aus diversen Gründen doch nicht geeignet sind bzw. die Akzeptanz vor Ort unzureichend ist. Ebenfalls wird durch die 60 % berücksichtigt, dass aufgrund der nicht unerheblichen Planungszeiträume Windenergieanlagen an einzelnen Standorten erst nach 2030 erschlossen werden könnten.

Auf Grundlage dieser Annahmen ergibt sich, dass bis 2030 180 neue Anlagen im Staatswald errichtet werden. Für diese Anlagen wird eine durchschnittliche Leistung von 5 MW angenommen, d. h. bis 2030 werden 900 MW an Windenergieanlagen gebaut.

Ein solcher Zubau von im Schnitt 20 Anlagen pro Jahr zwischen 2022 und 2030 scheint bei entsprechenden politischen Rahmenbedingungen möglich, denn Mitte der 2010er Jahre wurden drei Jahre in Folge jeweils knapp 20 WEA im Bayerischen Staatswald errichtet (Bayerische Staatsforsten 2016, 2017, 2018).

Zusätzlich werden durchschnittliche jährliche Volllaststunden der neuen Anlagen von 2400 angenommen. Daraus ergibt sich eine Stromerzeugung der neu errichteten Anlagen im Jahr 2030 von knapp 2,2 TWh.

Unter der Annahme, dass die 2,2 TWh erneuerbarer Strom im Jahr 2030 die Stromerzeugung aus Erdgaskraftwerken ersetzen (s. Erläuterung in Kapitel 2), wird eine CO₂-Vermeidung pro kWh von 353 g abgeleitet. Hinzu kommen vermiedene Vorketten-Emissionen von 45 g CO₂-Äq. pro kWh.

In der Summe kann diese Maßnahme im Jahr 2030 die THG-Emissionen um 858 kt CO₂-Äq. reduzieren. Im Referenzfall wird vereinfacht angenommen, dass – entsprechend der Jahre (Mitte) 2018 bis (Mitte) 2021 – bis 2030 keine zusätzlichen Windenergieanlagen im Bayerischen Staatswald zugebaut werden würden (Bayerische Staatsforsten 2019, 2020, 2021). Entsprechend bleibt die zusätzliche THG-Vermeidung im Jahr 2030 bei **858 kt CO₂-Äq.**

Aufgrund der engen Verbindungen im Stromsystem wird ein Großteil (Schätzung: rund 90 %) dieser Emissionsminderungen in Erdgaskraftwerken außerhalb Bayerns realisiert werden.

Niedrige Abschätzung:

Für die niedrige Abschätzung wird angenommen, dass im Schnitt nur 2,5 Windenergieanlagen pro Standort zugebaut werden können und dass nur auf 40 % der in Frage kommenden Standorte bis 2030 auch Windenergieanlagen (fertig) errichtet werden. Für die durchschnittliche Nennleistung der neuen Anlagen werden zudem 4,5 MW angesetzt und die angenommenen VLS der neuen Anlagen auf 2250 reduziert.

Bei sonst gleichen Annahmen könnten in diesem Fall die THG-Emissionen um **402 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

Hohe Abschätzung:

Für die hohe Abschätzung wird angenommen, dass im Schnitt vier Windenergieanlagen pro Standort zugebaut werden können und dass bis 2030 auf 80 % der in Frage kommenden Standorte die Windenergieanlagen (fertig) errichtet werden. Für die durchschnittliche Nennleistung der neuen Anlagen werden zudem 5,5 MW angesetzt und die angenommenen VLS der neuen Anlagen auf 2500 erhöht.

Bei sonst gleichen Annahmen könnten in diesem Fall die THG-Emissionen um **1748 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

3.1.4 Solarpflicht für Gewerbegebäude

Tab. 3-4 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer Solarpflicht für Gewerbegebäude

	Niedrig	Mittel	Hoch
Anzahl der bis 2030 in Bayern jährlich im Durchschnitt neu errichteten Nicht-Wohngebäude	5170	5170	5170
Anteil der Gebäude (Neubau und Sanierung), auf denen keine Anlagen errichtet werden können/müssen	40 %	30 %	20 %
Durchschnittliche Größe pro Dachanlage (in kW _p)	25	40	60
Verfügbare und für PV-Anlagen geeignete Fläche auf bestehenden Nicht-Wohngebäuden (in km ²)	181	181	181
Jährliche Sanierungsrate der Dächer von Nicht-Wohngebäuden	1,5 %	2,0 %	2,5 %
Anteil der grundsätzlich geeigneten Dachfläche, der nach einer Dachsanierung pro Anlage tatsächlich genutzt wird	40 %	60 %	80 %
Durchschnittliche jährliche VLS der neu installierten PV-Dachanlagen (inkl. Korrekturfaktor wegen Zwischenspeicherung und Abregelung)	855	855	855
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	202	435	811

Mittlere Abschätzung:

In der mittleren Abschätzung für diese Maßnahme wird angenommen, dass 70 % der ab Mitte 2024 neu errichteten Nicht-Wohngebäude infolge der Solarpflicht mit einer PV-Dachanlage ausgestattet werden. Mitte 2024 wurde dabei gewählt, weil das bayerische Klimaschutzgesetz die Solarpflicht für gewerblich oder industriell genutzte Gebäude vorsieht, deren Baugenehmigung ab dem 1. Juli 2022 eingehen und für sonstige Nichtwohngebäude, wenn deren Baugenehmigungen ab dem 1. Januar 2023 gestellt werden und an dieser Stelle 18 bis 24 Monate für den Abwicklungszeitraum (Zeitraum zwischen gestellter Baugenehmigung und Fertigstellung des Gebäudes) unterstellt werden. Für 30 % der betroffenen Gebäude wird zudem angenommen, dass deren Dächer aus verschiedenen Gründen nicht für eine PV-Anlage geeignet sind und daher auf Grundlage der im Gesetz aufgeführten Ausnahmetatbestände keiner Solarpflicht unterliegen.

Für die restlichen 70 % der neu errichteten Gebäude wird angenommen, dass auf ihnen im Schnitt eine PV-Anlage mit einer Leistung von 40 kW_p installiert sein wird. Unter der Annahme, dass bis 2030 jedes Jahr im Schnitt 5170 Nicht-Wohngebäude neu errichtet werden (es wird in dem Zeitraum ein Rückgang des jährlichen Neubaus von Nicht-Wohngebäuden gegenüber 2020 von 25 % unterstellt; Angaben für das Jahr 2020 nach Bayerisches Landesamt für Statistik 2021a), folgt daraus eine jährliche neue PV-Leistung (ab Mitte 2024) von 145 MW_p. In der Summe werden bis Mitte 2030 somit rund 870 MW_p auf neu errichteten Nicht-Wohngebäuden zugebaut.

Für diese Anlagen werden zunächst jährlich 950 Volllaststunden angenommen. (Dabei werden etwas niedrigere Volllaststunden als bei PV-Freiflächenanlagen angenommen, da bei Dachanlagen eine optimale Modulausrichtung nicht immer möglich oder sinnvoll sein dürfte.) Diese Volllaststunden werden für die hier vorgenommene

Quantifizierung des THG-Einsparpotenzials aber um 10 % reduziert (auf 855 Stunden), da für das Jahr 2030 in Bayern bei einem hier grundsätzlich angenommenen starken PV-Zubau mit gewissen energetischen Verlusten der PV-Stromerzeugung zu rechnen ist. Diese Verluste werden sich hauptsächlich in den Sommermonaten infolge von notwendigen Zwischenspeicherungen (v. a. in Batterien) und teilweise auch Abregelungen in besonders sonnenreichen Stunden ergeben (Koch et al. 2020). Unter diesen Annahmen beträgt der erwartete Stromertrag im Jahr 2030 rund 740 GWh Strom.

Für die im Klimaschutzgesetz zusätzlich vorgesehene Verpflichtung der Installation von PV-Anlagen auf Dächern von Nicht-Wohngebäuden, bei denen eine vollständige Erneuerung der Dachhaut durchgeführt wird, wird zunächst die – auf Grundlage von Literaturangaben (Eggers et al. 2020; Fraunhofer IWES 2012) abgeschätzte – gesamte grundsätzlich für PV-Anlagen geeignete Dachfläche in Bayern auf Nicht-Wohngebäuden ermittelt. Diese wird auf rund 180 km² geschätzt. Zusätzlich wird angenommen, dass jedes Jahr im Schnitt 2 % dieser Dachflächen vollständig erneuert werden. Ferner wird angenommen, dass 30 % der zu sanierenden Dachflächen aus verschiedenen Gründen nicht für den Betrieb einer PV-Anlage geeignet sind (oder bereits eine PV-Anlage aufweisen) und folglich nicht unter die Solarpflicht fallen. Von den verbleibenden (sanierten) Dachflächen wird angenommen, dass im Schnitt 60 % der grundsätzlich für PV-Module geeigneten Flächen tatsächlich mit Modulen genutzt werden. Auf Grundlage dieser Annahmen ergibt sich 2030 eine zusätzliche PV-Stromerzeugung in Höhe von 0,65 TWh. In der Summe (Neubau plus Dachsanierungen) liegt die PV-Stromerzeugung infolge der Solarpflicht bei rund 1,4 TWh.

Unter der Annahme, dass dieser erneuerbare Strom im Jahr 2030 die Stromerzeugung aus Erdgaskraftwerken ersetzt (s. Erläuterung in Kapitel 2), wird eine CO₂-Vermeidung pro kWh von 353 g abgeleitet. Hinzu kommen vermiedene Vorketten-Emissionen von 45 g CO₂-Äq. pro kWh.

In der Summe kann diese Maßnahme im Jahr 2030 die Emissionen 554 kt CO₂-Äq. reduzieren. Aufgrund der engen Verbindungen im Stromsystem wird ein Großteil (Schätzung: rund 90 %) dieser Emissionsminderungen in Erdgaskraftwerken außerhalb Bayerns realisiert.

Im Referenzfall wird angenommen, dass auch ohne Solarpflicht auf 15 % der neu errichteten sowie neu dachsanierten Nicht-Wohngebäude eine PV-Anlage errichtet wird. Die zusätzliche THG-Vermeidung im Jahr 2030 läge dann bei **435 kt CO₂-Äq.**

Niedrige Abschätzung:

Für die niedrige Abschätzung wird angenommen, dass die durchschnittliche Anlagengröße auf neu errichteten Nicht-Wohngebäuden lediglich 25 MW_p beträgt. Zusätzlich wird angenommen, dass 40 % der neu errichteten Gebäude sowie der dachsanierten Gebäude unter die Ausnahmetatbestände fallen und keine PV-Anlage installieren. Bei den Dachsanierungen wird zudem lediglich eine durchschnittliche jährliche Sanierungsrate von 1,5 % angenommen. Der bei Umsetzung der PV-Pflicht auf den Dächern genutzte Anteil der grundsätzlich für PV-Module verfügbaren Fläche wird auf 40 % gesetzt. Bei sonst gleichen Annahmen könnten die THG-Emissionen in diesem Fall im Jahr 2030 – zusätzlich zu den Einsparungen in der Trendentwicklung – um **202 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

Hohe Abschätzung:

Für die hohe Abschätzung wird angenommen, dass die durchschnittliche Anlagengröße auf neu errichteten Nicht-Wohngebäuden 60 MW_p beträgt. Zusätzlich wird angenommen, dass lediglich 20 % der neu errichteten Gebäude sowie der dachsanier-ten Gebäude unter die Ausnahmetatbestände fallen und keine PV-Anlage installieren. Bei den Dachsanierungen wird zudem eine durchschnittliche jährliche Sanie-rungsrate von 2,5 % angenommen. Der bei Umsetzung der PV-Pflicht auf den Dä-chern genutzte Anteil der grundsätzlich für PV-Module verfügbaren Fläche wird auf 80 % gesetzt. Bei sonst gleichen Annahmen könnten die THG-Emissionen in diesem Fall im Jahr 2030 – zusätzlich zu den Einsparungen in der Trendentwicklung – um **811 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

3.1.5 Solarpflicht für Wohngebäude

Tab. 3-5 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer Solarpflicht auch für Wohngebäude (nur zusätzliche Einsparung gegenüber einer Solarpflicht für Gewerbegebäude)

	Niedrig	Mittel	Hoch
Anzahl der bis 2030 in Bayern jährlich im Durchschnitt neu errichteten Wohngebäude	17.814	17.814	17.814
Anteil der Gebäude (Neubau und Sanierung), auf denen keine Anlagen errichtet werden können/müssen	40%	30 %	20 %
Durchschnittliche Größe pro Dachanlage (in kW _p)	6	7,5	9
Verfügbare und für PV-Anlagen geeignete Fläche auf bestehenden Wohngebäuden (in km ²)	260	260	260
Jährliche Sanierungsrate der Dächer von Wohngebäuden	1,5 %	2,0 %	2,5 %
Anteil der grundsätzlich geeigneten Dachfläche, der nach einer Dachsanierung pro Anlage tatsächlich genutzt wird	40 %	60 %	80 %
Durchschnittliche jährliche VLS der neu installierten PV-Dachanlagen (inkl. Korrekturfaktor wegen Zwischenspeicherung und Abregelung)	855	855	855
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	179	379	623

Mittlere Abschätzung:

Für die Quantifizierung des Emissionsminderungspotenzials dieser Maßnahme wird auf Basis der Annahmen in Prognos et al. (2021) unterstellt, dass zwischen 2024 und 2030 die jährlich neu errichtete Anzahl an Wohngebäuden gegenüber 2020 um 30 % niedriger liegen wird. Damit würden – ausgehend von dem Wert für das Jahr 2020 (Bayerisches Landesamt für Statistik 2021a) – im Durchschnitt jährlich rund 17.800 neue Wohngebäude in Bayern errichtet. Die ab Anfang 2024 fertiggestellten Wohngebäude fallen dabei annahmegemäß unter die Solarpflicht. (Zugrunde liegt dabei die Annahme, dass die Abwicklungsdauer neuer Wohngebäude 18 Monate beträgt.) Es wird ferner angenommen, dass 30 % der neu errichteten Wohngebäude aus diversen Gründen nicht für eine PV-Anlage geeignet sind bzw. unter die im Entwurf eines Bayerischen Klimagesetzes der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN formulierten Ausnahmetatbestände fallen (Bayerischer Landtag 2021a). Auf die in Frage kommenden neuen Wohngebäude werden annahmegemäß PV-Anlagen mit einer durchschnittlichen Leistung von 7,5 kW_p installiert.

Auf Grundlage dieser Annahmen ergibt sich zwischen 2024 und 2030 ein PV-Zubau auf neu errichteten Wohngebäuden in Bayern von 608 MW_p. Für diese Anlagen werden zunächst jährlich 950 Volllaststunden angenommen. (Dabei werden etwas niedrigere Volllaststunden als bei PV-Freiflächenanlagen angenommen, da bei Dachanlagen eine optimale Modulausrichtung nicht immer möglich oder sinnvoll sein dürfte.) Diese Volllaststunden werden für die hier vorgenommene Quantifizierung des THG-Einsparpotenzials aber um 10 % reduziert (auf 855 Stunden), da für 2030 in Bayern bei einem hier angenommenen starken PV-Zubau mit gewissen energetischen Verlusten der PV-Stromerzeugung zu rechnen ist. Diese Verluste werden sich hauptsächlich in den Sommermonaten infolge von notwendigen Zwischenspeicherungen (v. a.

in Batterien) und teilweise auch Abregelungen in besonders sonnenreichen Stunden ergeben (Koch et al. 2020). Unter diesen Annahmen beträgt der erwartete Stromertrag der neuen Anlagen im Jahr 2030 rund 520 GWh Strom.

Für die Berechnung des zusätzlichen Potenzials von Dachsanierungen wird zunächst das aus der Literatur abgeleitete gesamte Potenzial der Dachflächen von Wohngebäuden in Bayern auf 260 km² abgeschätzt (Eggers et al. 2020; Fraunhofer IWES 2012). Zudem wird die jährliche Sanierungsrate von Dächern auf 2 % geschätzt. Von den auf dieser Grundlage relevanten Dachflächen wird angenommen, dass 30 % der Flächen auf Gebäuden sind, die aus verschiedenen Gründen nicht (gut) für eine PV-Anlage geeignet sind und dadurch unter die Ausnahmetatbestände fallen. Von der verbleibenden Dachfläche wird angenommen, dass 60 % tatsächlich mit PV-Modulen versehen werden. Dieser Faktor berücksichtigt, dass nicht immer die gesamte grundsätzlich für eine PV-Anlage geeignete Fläche auf Dächern genutzt wird (und dies auch im Gesetzentwurf nicht verlangt wird) und dass ein Teil der bestehenden Gebäude bereits über PV-Anlagen verfügt, die auch ohne Solarpflicht nach einer Dachsanierung vermutlich wieder errichtet werden würden.

Unter diesen Annahmen werden bis 2030 infolge von Dachsanierungen PV-Anlagen mit einer Leistung von gut 700 MW_p zugebaut. Diese Anlagen erzeugen bei angenommenen 855 VLS im Jahr 2030 (inkl. Korrekturfaktor) 608 GWh.

In der Summe (Neubau und Dachsanierungen) werden durch diese Maßnahme im Jahr 2030 gut 1,1 TWh PV-Strom erzeugt.

Unter der Annahme, dass dieser erneuerbare Strom im Jahr 2030 die Stromerzeugung aus Erdgaskraftwerken ersetzt (s. Erläuterung in Kapitel 2), wird eine CO₂-Vermeidung pro kWh von 353 g angenommen. Hinzu kommen vermiedene Vorketten-Emissionen von 45 g CO₂-Äq. pro kWh.

In der Summe kann diese Maßnahme im Jahr 2030 die THG-Emissionen um 448 kt CO₂-Äq. reduzieren. Aufgrund der engen Verbindungen im Stromsystem wird ein Großteil (Schätzung: rund 90 %) dieser Emissionsminderungen in Erdgaskraftwerken außerhalb Bayerns realisiert werden.

Im Referenzfall wird angenommen, dass auch ohne Solarpflicht auf 10 % der neu errichteten sowie neu dachsanierten Wohngebäude eine PV-Anlage errichtet wird. Die zusätzliche THG-Vermeidung im Jahr 2030 durch die Solarpflicht läge dann bei **379 kt CO₂-Äq.**

Niedrige Abschätzung:

Für die niedrige Abschätzung wird angenommen, dass die durchschnittliche Anlagengröße auf neu errichteten Wohngebäuden lediglich 6 MW_p beträgt. Zusätzlich wird angenommen, dass 40 % der neu errichteten Gebäude sowie der dachsanierten Gebäude unter die Ausnahmetatbestände fallen und keine PV-Anlage installieren. Bei den Dachsanierungen wird zudem lediglich eine durchschnittliche jährliche Sanierungsrate von 1,5 % angenommen. Der bei Umsetzung der PV-Pflicht auf den Dächern genutzte Anteil der grundsätzlich für PV-Module verfügbaren Fläche wird auf 40 % gesetzt. Bei sonst gleichen Annahmen könnten die THG-Emissionen in diesem Fall im Jahr 2030 – zusätzlich zu den Einsparungen in der Trendentwicklung – um **179 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

Hohe Abschätzung:

Für die hohe Abschätzung wird angenommen, dass die durchschnittliche Anlagengröße auf neu errichteten Wohngebäuden 9 MW_p beträgt. Zusätzlich wird angenommen, dass lediglich 20 % der neu errichteten Gebäude sowie der dachsaniierten Gebäude unter die Ausnahmetatbestände fallen und keine PV-Anlage installieren. Bei den Dachsanierungen wird zudem eine durchschnittliche jährliche Sanierungsrate von 2,5 % angenommen. Der bei Umsetzung der PV-Pflicht auf den Dächern genutzte Anteil der grundsätzlich für PV-Module verfügbaren Fläche wird auf 80 % gesetzt. Bei sonst gleichen Annahmen könnten die Emissionen in diesem Fall im Jahr 2030 – zusätzlich zu den Einsparungen in der Trendentwicklung – um **623 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

3.2 Mobilität

3.2.1 Verdopplung des ÖPNV und des Rad- und Fußverkehrsanteils

Tab. 3-6 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer Verdopplung des ÖPNVs und des Anteils des Rad- und Fußverkehrs

	Niedrig	Mittel	Hoch
Zurückgelegte Personenkilometer in Bayern im Jahr 2030 (in Mrd. km) (Annahme: Unverändert gegenüber 2017)	186	186	186
Anteil des öffentlichen Verkehrs an den Pkm im Jahr 2030 (in Klammern: Anteil im Jahr 2017)	36 % (18 %)	36 % (18 %)	36 % (18 %)
Anteil des Rad- und Fußverkehrs an den Pkm im Jahr 2030 (in Klammern: Anteil im Jahr 2017)	14 % (7 %)	14 % (7 %)	14 % (7 %)
Kraftstoffbedingte THG-Emissionen des MIV im Jahr 2030 (in CO ₂ -Äq. pro Pkm, inkl. Vorkettenemissionen)	64	71	78
Kraftstoffbedingte THG-Emissionen des ÖV im Jahr 2030 (in CO ₂ -Äq. pro Pkm, inkl. Vorkettenemissionen)	14	11	10
Rückgang des spezifischen Strombedarfs (pro Pkm) des schienengebundenen ÖV zwischen 2019 und 2030	15 %	20 %	25 %
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	1490	1906	2322

Mittlere Abschätzung:

Für die Quantifizierung dieser Maßnahme werden zunächst die insgesamt zurückgelegten Personenkilometer in Bayern im Jahr 2030 abgeschätzt. Da unseres Wissens nach für die derzeitige Anzahl der jährlichen Personenkilometer in Bayern keine Statistik vorliegt, wird dieser Wert abgeleitet, indem der Anteil Bayerns an der deutschen Bevölkerung (16 %) mit den in Deutschland insgesamt zurückgelegten Personenkilometer multipliziert wird (1173 Mrd. Pkm im Jahr 2017, Nobis 2019). Daraus ergeben sich 186 Mrd. Personenkilometer. Nach Prognos et al. (2021) werden die zurückgelegten Personenkilometer in Deutschland bis 2030 etwa konstant bleiben, daher nehmen wir auch für das Jahr 2030 186 Mrd. Personenkilometern in Bayern an.

Die folgende Tabelle zeigt, wie sich nach Nobis (2019) der Personenverkehr in Bayern im Jahr 2017 (bezogen auf die Personenkilometer) auf die verschiedenen Verkehrsmittel aufteilte und wie sich die Anteile bei erfolgreicher Umsetzung der hier diskutierten Maßnahme bis 2030 verändern würden. Dabei wird hinsichtlich des Ziels der Verdopplung des Anteils des Rad- und Fußverkehrs bis 2030 angenommen, dass der Anstieg überproportional auf den Radverkehr entfallen würde.

Tab. 3-7 Anteile verschiedener Verkehrsmittel und des Fußverkehrs an den gesamten Personenkilometern in Bayern im Jahr 2017 und nach der hier getroffenen Annahme im Jahr 2030

	2017 (Tatsächliche Anteile nach Nobis 2019)	2030 (Ziel nach der hier diskutier- ten Maßnahme)
Motorisierter Individualverkehr	76 %	50 %
Öffentlicher Verkehr	18 %	36 %
Radverkehr	4 %	10 %
Fußverkehr	3 %	4 %

Hinweis: Rundungsbedingt ergibt die Summe der Anteil für das Jahr 2017 nicht 100 % sondern 101 %.

Um das Emissionsminderungspotenzial der hier diskutierten Maßnahme zu quantifizieren, werden für das Jahr 2030 die Emissionen des Personenverkehrs in Bayern im Falle eines Modal Splits von 2017 mit den entsprechenden Emissionen im Falle einer Verschiebung des Modal Splits hin zu einer Verdopplung des ÖPNV-Verkehrs und des Anteils des Rad- und Fußverkehrs verglichen.

Dabei wird für die spezifischen Emissionen des motorisierten Individualverkehrs sowie des öffentlichen Verkehrs im Jahr 2030 auf die Werte für Pkw bzw. für den öffentlichen Verkehr aus der Studie von Prognos et al. (2021) zurückgegriffen. Zusätzlich zu den dort ausgewiesenen direkten Emissionen werden pauschal 20 % für Vorketten-Emissionen der Kraftstoffe hinzugefügt. Daraus ergeben sich spezifische Emissionen des motorisierten Individualverkehrs von 71 g/Pkm sowie des öffentlichen Verkehrs von 11 g/Pkm. Dabei ist zu betonen, dass diese Emissionen nicht die indirekten Emissionen des Strombedarfs beinhalten.

Der spezifische Strombedarf wird im Jahr 2030 für den gesamten motorisierten Individualverkehr (als Durchschnitt aller Fahrzeuge, inkl. solcher mit Verbrennungsmotor) auf knapp 4 kWh pro 100 km abgeschätzt. Diese Abschätzung beruht auf der in Prognos et al. (2021) beschriebenen Entwicklungen der Elektromobilität (Anteile im Bestand des Jahres 2030 – und damit hier auch angenommen der Fahrleistung – von reinen E-Autos von knapp 20 %, und von Plug-in-Hybriden von 10 %) sowie auf eigenen Annahmen (durchschnittlicher Anteil des elektrischen Betriebs von Plug-in-Hybriden von 50 % bezogen auf die Streckenkilometer, Strombedarf beider Arten von E-Autos von 20 kWh pro 100 km sowie durchschnittliche Auslastung von 1,5 Personen pro Pkw).

Für den spezifischen Strombedarf des öffentlichen Verkehrs werden Werte für den Strombedarf nach Personenkilometern für verschiedene öffentliche Verkehrsmittel (Eisenbahn-Fernverkehr, Eisenbahn-Nahverkehr, Straßen-, Stadt- und U-Bahnverkehr) für das Jahr 2019 herangezogen (UBA 2021a). Bis 2030 werden jeweils Minderungen des spezifischen Strombedarfs von 20 % angenommen (infolge einer Kombination von steigender technischer Effizienz und höherer Auslastung) und es wird das Verhältnis der verschiedenen öffentlichen Verkehrsmittel im Jahr 2019 berücksichtigt. Es wird angenommen, dass dieses Verhältnis bis 2030 stabil bleibt. Aus diesen Überlegungen ergibt sich für 2030 ein durchschnittlicher spezifischer Strombedarf der öffentlichen Verkehrsmittel von 12 kWh/Pkm.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich für 2030 ein Strombedarf des motorisierten Individualverkehrs von rund 5300 GWh, falls es nicht zu einer Veränderung des Modal Splits kommen sollte, sowie von knapp 3600 GWh, falls es zu einer solchen Veränderung kommen sollte. Der Strombedarf des öffentlichen Verkehrs würde ohne Verkehrsverlagerungen knapp 3800 GWh betragen, mit Verkehrsverlagerungen rund 7600 GWh. In der Summe würde bei der hier untersuchten Veränderung des Modal Splits im Jahr 2030 ein Strommehrbedarf von rund 2000 GWh entstehen.

Unter der Annahme, dass diese zusätzliche Strommenge im Jahr 2030 aus Erdgaskraftwerken bereitgestellt wird (s. Erläuterung in Kapitel 2), werden zusätzliche CO₂-Emissionen pro kWh von 353 g abgeleitet. Hinzu kommen Vorketten-Emissionen von 45 g CO₂-Äq. pro kWh. Daraus folgen im Jahr 2030 Mehremissionen infolge des zusätzlichen Strombedarfs im Personenverkehr von 806 kt CO₂-Äq.

Die CO₂-äquivalenten Emissionen der im Verkehrssektor genutzten fossilen Kraftstoffe wären hingegen in dem Fall ohne Verkehrsverlagerungen deutlich höher. Im öffentlichen Verkehr lägen die Emissionen durch fossile Kraftstoffe im Falle einer Verkehrsverlagerung zwar rund 380 kt CO₂-Äq. höher als im Fall ohne Verkehrsverlagerung (757 kt gegenüber 378 kt), die Differenz beim motorisierten Individualverkehr ist jedoch deutlich relevanter. Dieser Verkehr wäre im Jahr 2030 ohne Änderungen beim Modal Split für rund 9900 kt CO₂-äquivalente Emissionen verantwortlich, im Falle der hier angenommenen Verkehrsverlagerung hingegen nur für rund 6600 kt.

In der Summe ergibt sich infolge der hier angenommenen Verkehrsverlagerung im Jahr 2030 ein Einsparpotenzial in Höhe von 2118 kt CO₂-Äq.

In Bayern selbst würde die THG-Emissionsreduktion noch höher ausfallen und bei 2553 kt CO₂-Äq. liegen. Diese höhere Einsparung ist darauf zurückzuführen, dass hier angenommen wird, dass der Großteil der eingesparten Kraftstoffe (90 %) in Bayern getankt worden wäre, während die Mehremissionen infolge des zusätzlichen Strombedarfs zu einem großen Teil (rund 90 %) außerhalb Bayerns anfallen würden. Außerhalb Bayerns würden demnach Mehremissionen in Höhe von 435 kt CO₂-Äq. anfallen.

Da sich der Anteil des öffentlichen Verkehrs und des Rad- und Fußverkehrs zwischen 2008 und 2017 jeweils um einen Prozentpunkt erhöht hat, wird hier angenommen, dass sich ohne politische Maßnahmen ein ähnlich moderater Anstieg (von zusammen 2,5 Prozentpunkten) bis 2030 ergeben würde. Dies entspricht 10 % des hier mit Maßnahmen unterstellten Anstiegs von zusammen 25 Prozentpunkten. Unter Berücksichtigung dieser Referenzentwicklung würden die THG-Emissionen durch die hier beschriebene Maßnahme im Jahr 2030 um **1906 kt CO₂-Äq.** niedriger liegen.

Niedrige Abschätzung:

Für die niedrige Abschätzung des Einsparpotenzials wird angenommen, dass die spezifischen kraftstoffbedingten Emissionen des motorisierten Individualverkehrs im Jahr 2030 10 % niedriger und diejenigen des öffentlichen Verkehrs 10 % höher liegen werden als in der mittleren Abschätzung unterstellt. Zudem wird angenommen, dass der spezifische Strombedarf des schienengebundenen öffentlichen Verkehrs bis 2030 gegenüber 2019 infolge höherer technischer Effizienz und einer höheren

durchschnittlichen Auslastung um 15 % (statt 20 %) sinken wird. Bei ansonsten gleichen Annahmen können die Emissionen dann – über die Referenzentwicklung hinaus – noch um **1490 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

Hohe Abschätzung:

Für die hohe Abschätzung des Einsparpotenzials wird angenommen, dass die spezifischen kraftstoffbedingten Emissionen des motorisierten Individualverkehrs im Jahr 2030 10 % höher und diejenigen des öffentlichen Verkehrs 10 % niedriger liegen werden als in der mittleren Abschätzung unterstellt. Zudem wird angenommen, dass der spezifische Strombedarf des schienengebundenen öffentlichen Verkehrs bis 2030 gegenüber 2019 infolge einer höheren technischen Effizienz und einer höheren durchschnittlichen Auslastung sogar um 25 % sinken wird. Bei ansonsten gleichen Annahmen können die Emissionen dann – über die Referenzentwicklung hinaus – um **2322 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

3.2.2 Steigerung des Schienen-Güterverkehrs auf einen Anteil von 40 %

Tab. 3-8 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer Steigerung des Schienen-Güterverkehrs auf einen Anteil von 40 %

	Niedrig	Mittel	Hoch
Güterverkehrsleistung in Bayern im Jahr 2019 (in Mrd. Tkm)	61	61	61
Anstieg des Güterverkehrsaufkommens in Bayern von 2019 bis 2030	5 %	13 %	25 %
Anteil des Güterverkehrsaufkommens auf der Schiene im Jahr 2030 (zum Vergleich: 13 % im Jahr 2019)	40 %	40 %	40 %
Kraftstoffbedingte THG-Emissionen des Güterverkehrs im Jahr 2030 (in g/Tkm, inkl. Vorkettenemissionen)	71	83	96
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	1348	1692	2125

Mittlere Abschätzung:

Für die Quantifizierung des Emissionsminderungspotenzials dieser Maßnahme wird zunächst die Verkehrsleistung des gesamten Güterverkehrs in Bayern im Jahr 2030 abgeschätzt. Die Güterverkehrsleistung in Bayern wird für 2019 mit 60,8 Mrd. Tkm angegeben (LiKi 2021). Auf Grundlage der Annahmen in Prognos et al. (2021) ist zwischen 2019 und 2030 mit einem Anstieg der Güterverkehrsleistung in Deutschland um 13 % zu rechnen. Dieser Wert wird hier für Bayern übernommen. Hieraus folgt für 2030 ein Güterverkehrsaufkommen im Freistaat in Höhe von 69 Mrd. Tkm.

Auf Grundlage dieses Güterverkehrsaufkommens werden anschließend die zu erwartenden Emissionen für den Fall einer Erhöhung des Anteils des Schienengüterverkehrs auf 40 % den entsprechenden Emissionen für den Fall eines konstanten Anteils des Schienengüterverkehrs (auf dem Niveau des Jahres 2019 – knapp 13 %) gegenübergestellt. Der Anteil der Binnenschifffahrt an der gesamten Güterverkehrsleistung wird in beiden Fällen konstant auf dem Niveau von 2019 gehalten (4 %), während der Anteil des Güterverkehrs auf der Straße in beiden Fällen variiert wird (83 % im Fall ohne Verlagerung, 56 % im Fall mit Verlagerung).

Für die direkten Emissionen des Straßengüterverkehrs wird für das Jahr 2030 basierend auf Prognos et al. (2021) ein Faktor von 70 g/Tkm angenommen. Dieser Wert bezieht sich nur auf die Emissionen des Straßengüterverkehrs durch die Nutzung fossiler Kraftstoffe und enthält keine Vorketten-Emissionen der Kraftstoffe. Daher wird der Wert zum einen für die Berücksichtigung der Vorketten-Emissionen der Kraftstoffe um knapp 20 % erhöht (auf 83 g/Tkm). Zum anderen werden zusätzlich der Strombedarf des Straßengüterverkehrs im Jahr 2030 und dessen THG-Emissionen berücksichtigt. Hierfür wird basierend auf Prognos et al. (2021) angenommen, dass im Jahr 2030 25 % der Güterverkehrsleistung auf der Straße elektrisch (v. a. über Oberleitungen und Batterien, in geringem Maße auch über Wasserstoff) erbracht werden wird. Hierbei wird für 100 elektrisch erbrachte Tonnenkilometer ein Strombedarf von 18 kWh angesetzt (Eberhart et al. 2019). Für den Strombedarf des elektrisch angetriebenen Güterverkehrs auf der Schiene wird hingegen ein Verbrauch von 3 kWh pro 100 km angenommen (Prognos et al. 2021).

Unter diesen Annahmen kann der Strombedarf für den gesamten Güterverkehr im Fall der angenommenen Verlagerung auf die Schiene reduziert werden, nämlich um 294 GWh im Jahr 2030 – der höhere Strombedarf für den Schienengüterverkehr (+ 569 GWh) wird überkompensiert durch einen geringeren Strombedarf für den Straßengüterverkehr (– 863 GWh).

Unter der Annahme, dass der durch die Verlagerung induzierte geringere Strombedarf im Jahr 2030 zu einer geringeren Auslastung von Erdgaskraftwerken führt (s. Kapitel 2), werden CO₂-Emissionen pro kWh in Höhe von 353 g vermieden. Hinzu kommen vermiedene Vorketten-Emissionen in Höhe von 45 g CO₂-Äq. pro kWh. Daraus folgen im Jahr 2030 geringere Emissionen infolge des verminderten Strombedarfs im Güterverkehr von 117 kt.

Einen deutlich stärkeren Effekt haben die vermiedenen Emissionen durch einen geringeren Bedarf an fossilen Kraftstoffen im Straßengüterverkehr. Diese Emissionen sinken (inkl. der angenommenen Vorkettenemissionen der Kraftstoffe) im Jahr 2030 von 4774 kt CO₂-Äq. im Fall ohne Verkehrsverlagerung auf 3198 kt CO₂-Äq. bei der hier angenommenen Verkehrsverlagerung. Es kommt in diesem Bereich zu einer Emissionsminderung von 1576 kt CO₂-Äq.

In Summe wird hier abgeschätzt, dass eine Erhöhung des Anteils des Schienengüterverkehrs auf 40 % bis zum Jahr 2030 zu einer Minderung der THG-Emissionen in Höhe von **1692 kt CO₂-Äq.** führen würde.

In Bayern selbst würden nach der Logik der Quellenbilanzierung schätzungsweise 1154 kt CO₂-Äq. reduziert werden. Zum einen wird dabei angenommen, dass ein Teil der vermiedenen Kraftstoffe (10 %) außerhalb Bayerns getankt worden wäre. Zum anderen fallen die Vorkettenemissionen der Kraftstoffe und des in den Kraftwerken verwendeten Erdgases, genauso wie ein großer Teil der direkten Emissionsminderungen der Erdgaskraftwerke, außerhalb Bayern an.

Da es in Bayern in den letzten zehn Jahren keinen Anstieg des Anteils des Schienenverkehrs an der Güterverkehrsleistung gegeben hat (LiKi 2021), wird hier für die Trendfortsetzung angenommen, dass der Anteil bei den derzeitigen knapp 13 % bleiben wird.

Niedrige Abschätzung:

Für die niedrige Abschätzung wird angenommen, dass das Güterverkehrsaufkommen zwischen 2019 und 2030 lediglich um 5 % wachsen wird. Zudem wird unterstellt, dass 2030 die spezifischen CO₂-Emissionen des Straßengüterverkehrs gegenüber der mittleren Abschätzung um weitere 15 % niedriger liegen werden. Bei sonst gleichen Annahmen könnten die Emissionen in diesem Fall im Jahr 2030 um **1348 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

Hohe Abschätzung:

Für die hohe Abschätzung wird angenommen, dass das Güterverkehrsaufkommen zwischen 2019 und 2030 um 25 % wachsen wird. Zudem wird unterstellt, dass 2030 die spezifischen CO₂-Emissionen des Straßengüterverkehrs gegenüber der mittleren Abschätzung 15 % höher liegen werden. Bei sonst gleichen Annahmen könnten in diesem Fall die Emissionen im Jahr 2030 um **2125 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

3.2.3 Einführung eines Tempolimits von 130 km/h auf Autobahnen

Tab. 3-9 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer Einführung eines Tempolimits von 130 km/h auf bayerischen Autobahnen

	Niedrig	Mittel	Hoch
In Bayern zurückgelegter Anteil der gesamten deutschen Autobahn-Verkehrsleistung von Pkw und LNFz	16 %	18 %	19 %
Veränderung der kraftstoffbedingten THG-Emissionen des Pkw- und LNFz-Autobahnverkehrs von 2016 bis 2030	- 55 %	- 45 %	- 35 %
Autobahn-Anteil an der Jahresfahrleistung der deutschen Pkw und LNFz im Jahr 2030	25 %	33 %	36 %
Durchschnittlicher Stromverbrauch eines vollelektrischen Pkw auf der Autobahn im Jahr 2030, inkl. Ladeverlusten (in kWh/100 km)	21	25	28
Durchschnittlicher Stromverbrauch eines vollelektrischen LNFz auf der Autobahn im Jahr 2030, inkl. Ladeverlusten (in kWh/100 km)	27	33	36
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	174	244	319

Mittlere Abschätzung:

Die zentrale Grundlage für die Abschätzung des THG-Einsparpotenzials dieser Maßnahme stellt eine Studie des Umweltbundesamtes zu den Auswirkungen eines generellen Tempolimits auf Autobahnen auf die THG-Emissionen aus dem Jahr 2020 dar (Lange 2020). Für das Bezugsjahr 2018 wurde in dieser Studie für Deutschland bei Einführung eines generellen Tempolimits von 130 km/h auf Autobahnen ein Emissionsreduktionspotenzial in Höhe von jährlich 2,2 Mt CO₂-Äq. abgeleitet. Berücksichtigt wurden sowohl Pkw als auch leichte Nutzfahrzeuge, für die ein Tempolimit von 130 km/h Auswirkungen haben würde.

Es ist davon auszugehen, dass dieses jährliche Einsparpotenzial bis 2030 sinken wird, insbesondere dann, wenn – wie in der hier vorliegenden Untersuchung grundsätzlich unterstellt – die aktuellen klima- und energiepolitischen Ziele der Bundesregierung für das Jahr 2030 erreicht werden. So geht die Studie von Prognos et al. (2021) davon aus, dass die (direkten) CO₂-Emissionen der Pkw und der leichten Nutzfahrzeuge – insbesondere infolge eines deutlich höheren Bestands an Elektrofahrzeugen sowie von Effizienzfortschritten bei konventionellen Fahrzeugen – zwischen 2016 und 2030 um 53 % zurückgehen werden. Dabei ist davon auszugehen, dass die Emissionsminderungen im Stadtverkehr bis 2030 proportional stärker zurückgehen als die Emissionsminderungen auf der Autobahn (u. a. wegen der proportional höheren Einsparungen im Stop-and-Go-Verkehr durch hybride und batterieelektrische Fahrzeuge). Daher wird hier für den Zeitraum 2016 bis 2030 statt eines Rückgangs um 53 % nur ein Rückgang um 45 % für die für ein Tempolimit auf Autobahnen relevanten CO₂-äquivalenten Emissionen angenommen.

Es wird also für die Abschätzung des 2030 verbleibenden Potenzials der (direkten) THG-Reduktion durch ein Tempolimit von 130 km/h eine Reduktion um 45 % angenommen. Es verbleibt damit im Jahr 2030 noch ein entsprechendes Reduktionspotenzial von 1,2 Mt CO₂-Äq.

Es wird zudem angenommen, dass 17,6 % dieses für Gesamtdeutschland geltenden Einsparpotenzials auf bayerischen Autobahnen realisiert werden könnte. Da keine Statistik über die von Pkw (und/oder leichten Nutzfahrzeugen) auf Autobahnen zurückgelegten Fahrzeugkilometer nach Bundesländern vorliegt, wurde hierfür der Mittelwert aus dem Anteil Bayerns an der Länge des Bundesautobahn-Streckennetzes und dem Anteil Bayerns an der deutschen Bevölkerung Ende des Jahres 2020 herangezogen – hieraus ergeben sich die 17,6 %. Daraus leitet sich für die Autobahnen in Bayern ein Einsparpotenzial im Jahr 2030 von 213 kt CO₂-Äq. ab.

In dieser Abschätzung sind jedoch noch nicht die Potenziale für Einsparungen bei den indirekten Emissionen der Elektrofahrzeuge enthalten. Die Studie des Umweltbundesamtes (UBA 2021a) hat diese Fahrzeuge – offenbar aufgrund ihrer sehr geringen Relevanz im Bezugsjahr 2018 – nicht berücksichtigt. Im Jahr 2030 könnten aber knapp 19 % des Pkw-Bestands und rund 24 % des Bestands der leichten Nutzfahrzeuge in Deutschland aus reinen Elektrofahrzeugen bestehen (Prognos et al. 2021). Unter der Annahme, dass diese Fahrzeuge dann ebenfalls knapp 19 % bzw. 24 % der Verkehrsleistung auf Autobahnen ausmachen, die Verkehrsleistung (und proportional die Verkehrsleistung auf Autobahnen) von Pkw bis 2030 gegenüber 2015 um knapp 10 % sinken wird (Prognos et al. 2021) und die Verkehrsleistung sowohl der Pkw als auch der leichten Nutzfahrzeuge zu 33 % auf Autobahnen stattfinden wird, lässt sich eine Leistung reiner Elektrofahrzeuge auf deutschen Autobahnen von 35 Mrd. (Pkw) bzw. 3,5 Mrd. (Leichte Nutzfahrzeuge) Fahrzeugkilometern im Jahr 2030 ableiten. Wird zusätzlich angenommen, dass ein Elektro-Pkw auf der Autobahn (ohne Tempolimit) im Schnitt 25 kWh Strom pro 100 km verbraucht (inkl. Ladeverlusten) und ein leichtes Nutzfahrzeug 30 % mehr, so lässt sich ein Strombedarf von rund 9,8 TWh für die Fahrt von reinen Elektro-Fahrzeugen auf Autobahnen in Deutschland im Jahr 2030 errechnen.

Laut Lange (2020) sind 55 % der Autobahnkilometer ohne Geschwindigkeitsbegrenzung. Auf diesen Autobahnteilen lassen sich laut der Studie durch die Einführung eines Tempolimits von 130 km/h gut 8 % des Energiebedarfs konventioneller Pkw und leichter Nutzfahrzeuge einsparen. Es wird hier angenommen, dass sich dieses relative Einsparpotenzial auch auf reine Elektrofahrzeuge übertragen lässt, da es im Wesentlichen auf den durch die reduzierte Geschwindigkeit geringeren Fahrwiderstand zurückzuführen ist. Auf Grundlage dieser Annahmen (und dem auch hier unterstellten Anteil des deutschen Autobahnverkehrs von 17,6 % in Bayern) lässt sich für Elektrofahrzeuge durch ein Tempolimit von 130 km/h im Jahr 2030 ein Stromeinsparpotenzial auf bayerischen Autobahnen von 79,7 GWh realisieren.

Unter der Annahme, dass diese eingesparte Strommenge im Jahr 2030 die Stromerzeugung aus Erdgaskraftwerken ersetzt (s. Erläuterung in Kapitel 2), wird eine CO₂-Vermeidung pro kWh von 353 g abgeleitet. Hinzu kommen vermiedene Vorketten-Emissionen von 45 g CO₂-Äq. pro kWh.

Daraus folgen im Jahr 2030 eingesparte Emissionen infolge des reduzierten Strombedarfs von 32 kt.

In der Summe kann die Einführung eines Tempolimits von 130 km/h auf bayerischen Autobahnen im Jahr 2030 die Emissionen um **244 kt CO₂-Äq.** reduzieren. Das Reduktionspotenzial wird dabei dominiert von den potenziellen Einsparungen

der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Trotz der 2030 durchaus relevanten Fahrleistung der Elektrofahrzeuge und der hier angesetzten Emissionen eines Grenzkraftwerks (anstatt der niedrigeren Emissionen des durchschnittlichen Strommixes im Jahr 2030) sind die Emissionseinsparungen von Elektrofahrzeugen relativ klein, sie machen 11 % des gesamten Einsparpotenzials aus. Der geringe Anteil ist vor allem auf den deutlich höheren Wirkungsgrad von Elektromotoren gegenüber Verbrennungsmotoren zurückzuführen. Aufgrund dieser relativ kleinen Bedeutung wird auf eine zusätzliche Abschätzung der Einsparpotenziale von Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen verzichtet. Diese fahren auf Autobahnen vermutlich ohnehin überwiegend unter Verwendung des Verbrennungsmotors, so dass deren Emissionseinsparpotenziale weitgehend bereits durch die Abschätzung der Einsparpotenziale bei den gesamten direkten Emissionen erfasst wurden.

In dieser Abschätzung des THG-Minderungspotenzials sind mögliche indirekte Effekte der Einführung eines Tempolimits – ein möglicher Einfluss auf das Kaufverhalten der Autokäufer*innen in Richtung weniger leistungsstarker Autos sowie eine mögliche Verlagerung einiger Fahrten vom Pkw auf die Schiene – nicht berücksichtigt. Diese Effekte könnten zu zusätzliche Einsparungen führen, die allerdings sehr schwierig abzuschätzen sind und auch in Lange (2020) nicht quantifiziert wurden.

Da einige der Fahrzeuge zwar auf bayerischen Straßen fahren, aber Kraftstoffe in anderen Bundesländern oder im Ausland tanken, liegen die THG-Emissionen, die im Rahmen der Klimabilanz Bayerns durch die Maßnahme reduziert werden, niedriger (sofern ein solches Tempolimit nur in Bayern umgesetzt werden würde) – denn in die Klimabilanz Bayerns gehen nur die in Bayern getankten Kraftstoffmengen ein. Die Studie des UBA (Lange 2020) geht für Deutschland davon aus, dass etwa 12 % der Emissionsreduktionen im Ausland verbucht würden. Für Bayern dürfte der Anteil des nicht in Bayern getankten Kraftstoffs höher liegen, da es hier nicht nur um das Tanken im Ausland, sondern auch um das Tanken in anderen Bundesländern geht. An dieser Stelle wird ein Anteil von 20 % der Emissionsreduktionen angenommen, der statistisch außerhalb Bayerns verbucht wird. Aufgrund der engen Verbindungen im Stromsystem wird zudem ein Großteil (Schätzung: rund 90 %) der Emissionsminderungen durch die Stromeinsparungen in Erdgaskraftwerken außerhalb Bayerns realisiert.

Im Referenzfall (keine Einführung eines Tempolimits) können offensichtlich keinerlei Emissionsreduktionen durch ein Tempolimit realisiert werden.

In Bezug auf diese Maßnahme ist darauf hinzuweisen, dass ihre Umsetzung vor dem Jahr 2030 zu größeren jährlichen THG-Einsparungen führen würde als hier für das Jahr 2030 abgeleitet. Denn der an dieser Stelle angenommene starke Bedeutungsgewinn der Elektromobilität bis 2030 sowie der bis dahin angenommene (moderate) Rückgang der Jahresfahrleistung führen dazu, dass sich die durch ein Tempolimit erzielbaren THG-Emissionseinsparungen im Zeitverlauf reduzieren. Beim gegenwärtigen Pkw-Bestand und den gegenwärtigen Fahrleistungen ließen sich durch ein Tempolimit von 130 km/h auf bayerischen Autobahnen jährlich Emissionen in Höhe von etwa 392 kt CO₂-Äq. vermeiden, also rund 60 % mehr als hier für das Jahr 2030 ermittelt.

Niedrige Abschätzung:

Für die niedrige Abschätzung wird angenommen, dass die Verkehrsleistung auf bayerischen Autobahnen lediglich knapp 16 % der bundesdeutschen Verkehrsleistung entspricht (Anteil der Bevölkerung Bayerns an der gesamtdeutschen Bevölkerung Ende 2020). Zudem wird angenommen, dass die direkten CO₂-Emissionen der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge 2030 um 55 % unter den Emissionen des Jahres 2016 liegen werden. Für die Berechnung der Stromeinsparungen der vollelektrischen Pkw und leichten Nutzfahrzeuge wird davon ausgegangen, dass nur 25 % der Jahresfahrleistung dieser Fahrzeuge auf Autobahnen erfolgt und der Stromverbrauch eines durchschnittlichen batterieelektrischen Pkw auf Autobahnen (ohne Tempolimit) lediglich 21 kWh pro 100 km beträgt (und der Stromverbrauch der vollelektrischen leichten Nutzfahrzeuge auch hier 30 % höher liegt). Bei sonst gleichen Annahmen könnten die THG-Emissionen in diesem Fall im Jahr 2030 durch die Maßnahme um **174 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

Hohe Abschätzung:

Für die hohe Abschätzung wird angenommen, dass die Verkehrsleistung auf bayerischen Autobahnen 19,3 % der bundesdeutschen Verkehrsleistung entspricht (bayerischer Anteil der Bundesautobahn-Streckenlänge im Jahr 2019). Zudem wird angenommen, dass die direkten CO₂-Emissionen der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge bis 2030 moderater sinken als in der mittleren Abschätzung, nämlich gegenüber 2016 nur um 35 %. Für die Berechnung der Stromeinsparungen der vollelektrischen Pkw und leichten Nutzfahrzeuge wird davon ausgegangen, dass 36 % der Jahresfahrleistung auf Autobahnen erfolgt und der Stromverbrauch eines durchschnittlichen Elektro-Pkw auf Autobahnen (ohne Tempolimit) 28 kWh pro 100 km beträgt (und der Stromverbrauch der vollelektrischen leichten Nutzfahrzeuge auch hier 30 % höher liegt). Bei sonst gleichen Annahmen könnten die THG-Emissionen in diesem Fall im Jahr 2030 durch die Maßnahme um **319 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

3.2.4 Elektrifizierung der nicht elektrifizierten Schienenstrecken zu 95 %

Tab. 3-10 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale der Elektrifizierung der bislang nicht elektrifizierten Schienenstrecken zu 95 %

	Niedrig	Mittel	Hoch
Anteil der Zugkilometer im bayerischen Nahverkehr, die gegenwärtig elektrisch zurückgelegt werden	70 %	61 %	55 %
Anteil der Tonnenkilometer im bayerischen Güterverkehr, die gegenwärtig elektrisch zurückgelegt werden	93 %	89 %	85 %
Anstieg der Güterverkehrsleistung auf der Schiene in Bayern zwischen 2020 und 2030	20 %	32 %	40 %
Anstieg der Personenkilometer auf der Schiene in Bayern zwischen 2020 und 2030	30 %	61 %	70 %
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	97	157	193

Mittlere Abschätzung:

Da den Autoren keine statistischen Angaben zu den in Bayern elektrisch zurückgelegten Anteilen der Personen- sowie Güterverkehrsleistung auf der Schiene vorliegen, werden die Anteile auf Grundlage der entsprechenden Anteile auf Bundesebene abgeschätzt (letztere liegen vor, BMDV 2021). Dabei wird angenommen, dass sich der Anteil der elektrisch zurückgelegten Verkehrsleistung proportional verhält zum Anteil der elektrifizierten Streckenlänge an der gesamten Streckenlänge eines bestimmten Gebietes. Nach den letzten derzeit vorliegenden Zahlen (für 2015) beträgt der Anteil der elektrifizierten Streckenlänge an der gesamten Streckenlänge des Bahnnetzes in Deutschland 54 % und in Bayern 51 % (Destatis 2021a). Entsprechend wird hier angenommen, dass der Anteil der Zugkilometer im bayerischen Nahverkehr, der elektrisch zurückgelegt wird, derzeit mit 61 % etwas niedriger liegt als im bundesweiten Durchschnitt (64 %) und auch der Anteil der Tonnenkilometer im bayerischen Güterverkehr, der elektrisch zurückgelegt wird, mit 89 % niedriger liegt als bundesweit (93 %).⁹

Zudem wird angenommen, dass eine Elektrifizierung der bisher nicht elektrifizierten Schienenstrecken in Bayern zu 95 % bis 2030 dazu führen wird, dass dann 98 % der Personen- sowie Güterverkehrsleistung elektrisch betrieben werden können. Dabei ist anzumerken, dass eine solche Elektrifizierung nicht auf allen Strecken über Oberleitungen umgesetzt werden müsste, sondern auf bestimmten Strecken auch batterie- oder wasserstoffbetriebe Schienenfahrzeuge eingesetzt werden könnten.

Die Güterverkehrsleistung auf der Schiene in Bayern wird für 2019 mit 7,6 Mrd. Tonnenkilometern angegeben (Bayerisches Landesamt für Statistik 2021b). Gegenüber 2020 wird bis 2030 nach Prognos et al. (2021) in Deutschland ein Anstieg der

⁹ Mögliche positive Effekte von Elektrifizierungsmaßnahmen in Bayern auf den Personenfernverkehr, der bundesweit bereits in Bezug auf die Zugkilometer zu 98 % elektrisch betrieben wird, werden an dieser Stelle ausgeklammert, da sie schwierig abzuschätzen und vermutlich verhältnismäßig weniger relevant sind als die hier quantifizierten Segmente des Schienenverkehrs.

Güterverkehrsleistung auf der Schiene um 32 % angenommen. Wird der daraus abgeleitete jährliche Anstieg für Bayern übernommen, so ist im Jahr 2030 in Bayern von einer Güterverkehrsleistung auf der Schiene von 10,3 Mrd. Tkm auszugehen.

Ohne weitere Elektrifizierung läge der Dieserverbrauch für den Schienengüterverkehr im Jahr 2030 unter der Annahme eines Verbrauchs von 0,8 Litern Diesel pro 100 Tkm für eine Güterbahn mit Dieseltraktion (Schmied und Knörr 2011) bei 9,5 Mio. Litern. Bei einer Elektrifizierung von 95 % des Schienennetzes und einem dann angenommenen elektrischen Anteil an den Tonnenkilometern im Schienengüterverkehr von 98 % läge der Diesel-Bedarf im Jahr 2030 bei 1,7 Mio. Liter. Gleichzeitig läge der Strombedarf für den Schienengüterverkehr im Falle der weiteren dynamischen Elektrifizierung im Jahr 2030 – bei einem angenommenen spezifischen Bedarf einer Güterbahn mit Elektrotraktion von 2,9 kWh pro 100 Tkm (Schmied und Knörr 2011)¹⁰ – bei 291 GWh und bei ausbleibender weiterer Elektrifizierung bei 263 GWh.

Im Personennahverkehr werden in Bayern derzeit jährlich rund 128 Mio. Zugkilometer zurückgelegt. Im Szenario KN2045 von Prognos et al. (2021) wird zwischen 2020 und 2030 ein Wachstum der Personenverkehrsleistung der Bahn von rund 60 % angenommen. Wird angenommen, dass 25 % der zusätzlichen Verkehrsleistung über eine höhere Auslastung kompensiert werden können, werden die Zugkilometer im Nahverkehr bis 2030 um rund 45 % ansteigen. Daraus folgt, dass im Jahr 2030 in Bayern 186 Mio. Zugkilometer im Personennahverkehr zurückgelegt werden.

Unter den bei der Beschreibung der Quantifizierung der Maßnahme „Reaktivierung geeigneter Schienenstrecken bis 2030“ erwähnten Annahmen zum Diesel- und Stromverbrauch der Personenzüge im Jahr 2030 (s. unten) ergibt sich ein Dieserverbrauch im Personennahverkehr bei derzeitiger Elektrifizierung von 83 Mio. Liter und bei der in dieser Maßnahme unterstellten Elektrifizierung von 4 Mio. Liter. Der Stromverbrauch im Personenverkehr würde von 462 GWh bei derzeitiger Elektrifizierung auf 748 GWh ansteigen.

In der Summe ergibt sich durch die Elektrifizierung im Jahr 2030 eine Diesel-Einsparung von 87 Mio. Litern und ein Strom-Mehrbedarf von 314 GWh. Unter Verwendung eines Emissionsfaktors für Diesel von 3,24 kg CO₂-Äq. pro Liter Diesel (inkl. Vorkette, Fraunhofer ISI und PTV 2017) und von 397 g CO₂-Äq. pro kWh Strom (inkl. Vorkette, unter Annahme einer Stromerzeugung in einem Erdgaskraftwerk) ergeben sich im Jahr 2030 CO₂-äquivalente Emissionsminderungen von 282 kt für den reduzierten Dieselbedarf und entsprechende Mehremissionen durch einen höheren Strombedarf in Höhe von 125 kt. Unterm Strich kann eine hier unterstellte Elektrifizierung die Emissionen im Jahr 2030 um **157 kt CO₂-Äq.** reduzieren. Ein Großteil dieser Emissionsminderungen ist auf den Schienenpersonennahverkehr zurückzuführen (143 kt). Dort liegen den vorliegenden Daten und getroffenen Annahmen zufolge deutlich größere Potenziale für eine weitere Elektrifizierung als beim Güterschienenverkehr, der bezogen auf die Tonnenkilometer bereits heute zu rund 90 % elektrisch fährt.

¹⁰ Der spezifische Stromverbrauch wäre bei batterie- und insbesondere bei wasserstoffbetriebenen Schienenfahrzeugen möglicherweise höher als der hier angelegte Wert. Die entsprechenden Speicher- bzw. Umwandlungsverluste werden in dieser vereinfachten Berechnung nicht abgeschätzt und fließen nicht in die Berechnung ein.

In Bayern selbst würde die Emissionsreduktion mit 215 kt höher ausfallen, als die Maßnahme insgesamt an Emissionsreduktion erbringt. Dies liegt daran, da angenommen wird, dass der durch die Elektrifizierung vermiedene Dieselbedarf andernfalls vollständig in Bayern selbst nachgefragt worden wäre, während bei Umsetzung der Maßnahme die Mehremissionen durch den höheren Strombedarf zu einem großen Teil in Kraftwerken (sowie im Falle der Vorketten-Emissionen in der vorgelagerten Infrastruktur) außerhalb Bayerns anfallen würden.

Zwischen 2005 und 2015 hat sich der Anteil der in Bayern elektrifizierten Schienestrecken lediglich von 50 % auf 51 % erhöht. Es wird daher vereinfacht angenommen, dass ohne intensivierete politische Maßnahmen bis 2030 der Anteil der elektrifizierten Strecken und damit auch der elektrifizierten Fahrleistung im Personen- und Güterverkehr unverändert bleiben würde.

Niedrige Abschätzung:

Für die niedrige Abschätzung wird angenommen, dass der derzeitige Anteil der Zugkilometer im bayerischen Nahverkehr, der elektrisch zurückgelegt wird, bei 70 % (anstatt bei 61 %) liegt, während der derzeitige Anteil der elektrisch gefahrenen Tonnenkilometer bei 93 % (statt bei 89 %) liegt. Zudem wird angenommen, dass die Güterverkehrsleistung auf der Schiene in Bayern zwischen 2020 und 2030 um 20 % (statt 32 %) und die Personenkilometer im Bahnverkehr um 30 % (statt 61 %) ansteigen werden. Unter sonst gleichen Annahmen könnte die Maßnahme dann im Jahr 2030 **97 kt CO₂-Äq.** einsparen.

Hohe Abschätzung:

Für die hohe Abschätzung wird angenommen, dass der derzeitige Anteil der Zugkilometer im bayerischen Nahverkehr, der elektrisch zurückgelegt wird, bei 55 % (anstatt bei 61 %) liegt, während der derzeitige Anteil der elektrisch gefahrenen Tonnenkilometer bei 85 % (statt bei 89 %) liegt. Zudem wird angenommen, dass die Güterverkehrsleistung auf der Schiene in Bayern zwischen 2020 und 2030 um 40 % (statt 32 %) und die Personenkilometer im Bahnverkehr um 70 % (statt 61 %) ansteigen werden. Unter sonst gleichen Annahmen könnte die Maßnahme dann im Jahr 2030 **193 kt CO₂-Äq.** einsparen.

3.2.5 Reaktivierung geeigneter Schienenstrecken bis 2030

Tab. 3-11 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer Reaktivierung geeigneter Schienenstrecken bis 2030

	Niedrig	Mittel	Hoch
Länge der hier untersuchten 16 Bahnstrecken, deren Reaktivierung bis 2030 angenommen wird (in km)	430	430	430
Durchschnittliche Personenkilometer pro Kilometer reaktivierter Bahnstrecke an einem Werktag	1000	2270	3400
Anteil der Personenkilometer, die ohne Reaktivierung mit dem Pkw zurückgelegt werden würden	30 %	33 %	40 %
Zusätzliche Reduktion der Pkw-km auf anderen Bahnstrecken (gegenüber den eingesparten Pkw-km auf den reaktivierten Strecken)	80 %	100 %	150 %
Rückgang der (direkten) CO ₂ -Emissionen der Pkw pro Personenkilometer zwischen 2020 und 2030	45 %	40 %	30 %
Anteil der bis 2030 elektrisch befahrenen Zug-Fahrzeugkilometer auf den reaktivierten Strecken	30 %	50 %	90 %
Anteil der durch die Reaktivierung vermiedenen Bus-Fahrzeugkilometer an den neuen Zug-Fahrzeugkilometern	50 %	60 %	70 %
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	0	12	41

Mittlere Abschätzung:

Für diese Maßnahme wird untersucht, wie stark die THG-Emissionen reduziert werden könnten, wenn bis zum Jahr 2030 16 Bahnstrecken in Bayern für den Personenverkehr reaktiviert werden, die nach Einschätzung der Organisation Pro Bahn mit höchster Priorität angegangen werden sollten (Storch 2021b).¹¹ Dabei handelt es sich um die folgenden Strecken:

¹¹ Pro Bahn sieht 17 Strecken in Bayern, deren Reaktivierung mit höchster Priorität verfolgt werden sollte. Die kurze Strecke zwischen Wasserburg Bahnhof und Wasserburg Stadt wird im Folgenden allerdings nicht berücksichtigt. Eine gutachterliche Bewertung erwartet einen relativ geringen Mehrverkehr infolge einer Reaktivierung dieser Strecke (300 Personenfahrten pro Tag) und empfiehlt, diese nicht weiterzuverfolgen (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr 2021).

Tab. 3-12 Streckenverlauf und Streckenlänge der hier angenommenen Reaktivierungen von Schienenstrecken in Bayern bis 2030

Streckenverlauf	Streckenlänge (in km)
Dombühl – Dinkelsbühl – Nördlingen	54
Schweinfurt Hbf – Kitzingen Etwashausen (Steigerwaldbahn)	50
Passau – Freyung (Ilztalbahn)	50
(Augsburg –) Gessertshausen – Markt Wald – Türkheim (Staudenbahn)	43
Gotteszell-Viechtach	40
Waigolshausen – Gemünden (Werntalbahn)	39
(Pleinfeld –) Gunzenhausen – Nördlingen	39
Schongau – Landsberg (Lech) (Fuchstalbahn)	28
(Eisenach –) Eisfeld – Coburg (Werrabahn)	22
Ebermannstadt – Behringersmühle	16
Seligenstadt – Volkach (Mainschleifenbahn)	11
Eggmühl – Langquaid	10
Rosenheim – Rohrdorf	10
Fürth – Nürnberg Nordost	9
(Saalfeld –) Blankenstein – Marxgrün (– Hof)	6
Lohr – Lohr Stadt – Lohr Süd	2
GESAMTSTRECKENLÄNGE	430

Quelle: U. a. Storch (2021b)

Hinweis: Rundungsbedingt stimmt die Summe der einzelnen Streckenlängen nicht exakt mit der ausgewiesenen Gesamtstreckenlänge überein.

In der mittleren Abschätzung wird angenommen, dass bei einer Reaktivierung dieser 16 Strecken im Jahr 2030 an einem Werktag im Durchschnitt knapp 2.300 Personenkilometer pro Kilometer Bahnstrecke die neuen Verbindungen nutzen werden. Genaue Untersuchungen des Fahrgästepotenzials dieser Strecken liegen unseres Wissen nach nicht vor, daher wird an dieser Stelle auf eine Studie aus dem Jahr 2020 zurückgegriffen (PTV 2020), die für das Nachbarland Baden-Württemberg das Fahrgästepotenzial von Bahnstrecken untersucht hat, die potenziell reaktiviert werden könnten. Zwölf der untersuchten Strecken wurden dabei in die Kategorie „hohes Nachfragepotenzial“ eingeordnet. Für diese Strecken wird im Durchschnitt ein Potenzial von gut 3400 Personenkilometern pro Kilometer Strecke abgeleitet. In einer zweiten Kategorie „ausreichendes Nachfragepotenzial“ fallen weitere zehn Strecken, für die im Durchschnitt ein Potenzial von gut 1100 Personenkilometer pro Kilometer Strecke identifiziert wird.

An dieser Stelle wird angenommen, dass die 16 von Pro Bahn als Vorhaben mit hoher Priorität eingestuften Strecken eher in diese beiden Kategorien fallen würden, und nicht in die zwei weiteren Kategorien „vertieft zu betrachtendes Nachfragepotenzial“ und „Prüfung von Gelegenheitsverkehr und touristischem Verkehr“. Für die mittlere Abschätzung wird daher als Annahme für das Fahrgästepotenzial der 16 Strecken in

Bayern der Mittelwert der durchschnittlichen Werte für die beiden Kategorien „hohes Nachfragepotenzial“ und „ausreichendes Nachfragepotenzial“ gewählt. Es ergeben sich die erwähnten knapp 2300 Personenkilometer pro Kilometer Bahnstrecke.

Des Weiteren wird für die Quantifizierung des THG-Einsparpotenzials der Streckenreaktivierungen angenommen, dass ein Drittel der in den Bahnen zurückgelegten Personenkilometer ohne Reaktivierungen mit dem Auto gefahren worden wäre. Dies entspricht der Annahme in Fraunhofer ISI und PTV (2017). In der zitierten Studie wird aber nicht abgeschätzt, welche Verlagerungen es durch die Reaktivierungen auf *anderen* (bereits bestehenden) Bahnstrecken geben könnte. Es erscheint plausibel anzunehmen, dass das gesamte System Bahn – über die einzelnen reaktivierten Strecken hinaus – von den Reaktivierungen profitieren würde. Mangels vorliegender Abschätzungen in der Literatur wird hier die eigene Annahme getroffen, dass durch Verlagerungen vom Pkw auf die Schiene auf weiteren Strecken nochmals die gleiche Menge an Pkw-Personenkilometern eingespart werden wie auf den reaktivierten Strecken selbst.

Für die Emissionen des Pkw-Verkehrs pro Personenkilometer im Jahr 2030 wird hier eine Minderung zwischen 2020 und 2030 um 40 % angenommen (Prognos et al. 2021). Hierbei sind die indirekten Emissionen der Stromerzeugung für Elektroautos noch nicht inbegriffen, diese werden später noch abgeschätzt. Ausgehend von einem Wert von 152 g CO₂-Äq. pro km im Jahr 2020 (UBA 2021b, inkl. Vorkette) wird somit ein Wert von 91 g CO₂-Äq. pro km im Jahr 2030 angesetzt. Hieraus folgt eine Einsparung von THG-Emissionen durch eine verminderte Nutzung fossiler Kraftstoffe im Pkw-Verkehr von knapp 15 kt CO₂-Äq.

Es wird an dieser Stelle zudem angenommen, dass 20 % der eingesparten Pkw-Personenkilometer im Jahr 2030 durch reine Elektroautos zurückgelegt worden wären (hierdurch erklärt sich ein erheblicher Teil des oben angenommenen deutlichen Rückgangs der Emissionen der fossil betriebenen Pkw zwischen 2020 und 2030 von 40 %). Wird ein Stromverbrauch der Elektro-Pkw von 20 kWh pro 100 km (inkl. Ladeverlusten) sowie eine durchschnittliche Auslastung von 1,4 Personen pro Pkw unterstellt, leiten sich im Jahr 2030 Stromeinsparungen durch vermiedene Fahrzeugkilometer von reinen Elektro-Pkw in Höhe von rund 4,6 GWh ab. Pauschal wird hier zudem ein zusätzlicher vermiedener Stromverbrauch von Hybrid-Pkw von 20 % des vermiedenen Stromverbrauchs der reinen Elektroautos angesetzt. Dies entspricht gut 0,9 GWh.

In der mittleren Abschätzung wird zudem angenommen, dass im Jahr 2030 die Hälfte der neuen Bahn-Streckenkilometer elektrisch befahren werden können (über Oberleitungen oder mit batterieelektrischen Antrieben). Bei einem angenommenen Stromverbrauch der elektrisch angetriebenen Bahnen pro Fahrzeug-Kilometer von 3,0 kWh, einem zusätzlichen Stromverbrauch pro Fahrzeugstunde von 55 kWh (jeweils entsprechend der Annahmen für das Jahr 2030 aus PTV Planung Transport Verkehr AG (2016) und angenommenen 24 Bahnverbindungen (hin- und zurück) im Schnitt pro Tag und Strecke sowie einer Durchschnittsgeschwindigkeit der elektrisch betriebenen Bahnen (inkl. Halten) von 70 km/h, folgt ein Stromverbrauch von 4,9 GWh.

Unter dem Strich folgt demnach aus der Reaktivierung der Bahnstrecken im Jahr 2030 ein Strom-Minderbedarf von 0,7 GWh.

Unter der Annahme, dass infolge dieses vermiedenen Strombedarfs im Jahr 2030 die Auslastung von Erdgaskraftwerken reduziert wird (s. Erläuterung in Kapitel 2), werden vermiedene CO₂-Emissionen pro kWh von 353 g abgeleitet. Hinzu kommen zusätzlich eingesparte Vorketten-Emissionen von 45 g CO₂-Äq. pro kWh. Daraus folgen im Jahr 2030 vermiedene CO₂-äquivalente Emissionen infolge des reduzierten Strombedarfs von 0,3 kt.

Für die nicht elektrisch zurückgelegten Bahnfahrten werden 0,8 Liter Diesel pro Fahrzeugkilometer sowie 15 Liter Diesel pro Fahrzeugstunde (jeweils entsprechend der Annahmen für das Jahr 2030 aus PTV Planung Transport Verkehr AG (2016)) angenommen. Hieraus leiten sich unter der Verwendung eines Emissionsfaktors für Diesel von 3,24 kg CO₂-Äq. pro Liter (inkl. Vorkette, Fraunhofer ISI und PTV 2017) sowie einer angenommenen durchschnittlichen Geschwindigkeit der Bahnen (inkl. Halten) von 65 km/h zusätzliche Emissionen in Höhe von 4 kt CO₂-Äq. ab.

Zusätzlich wird angenommen, dass der Busverkehr infolge der Reaktivierungen um 60 % der von den Bahnen gefahrenen Fahrzeugkilometer reduziert werden kann (dies entspricht der Annahme in Fraunhofer ISI/PT Group 2017). Mit den 24 angenommenen Fahrten pro Tag und Strecke könnten dann im gesamten Jahr 2030 rund 1,5 Mio. Buskilometer eingespart werden. Unter der Annahme, dass der durchschnittliche Diesel-Verbrauch pro Bus-Fahrzeugkilometer von den in Fraunhofer ISI und PTV (2017) angesetzten 0,38 Liter bis 2030 um 20 % sinkt und 3,24 kg CO₂-äquivalente Emissionen pro Liter Diesel (inkl. Vorkette, Fraunhofer ISI und PTV 2017) angesetzt werden, ergeben sich im Jahr 2030 durch einen verminderten Busverkehr eingesparte CO₂-äquivalente Emissionen von knapp 2 kt.

Unterm Strich ergeben sich bei diesen Annahmen durch die Reaktivierung der 16 Strecken Emissionseinsparungen im Jahr 2030 von **12 kt CO₂-Äq.**

Hinsichtlich dieses im Vergleich zu anderen hier abgeschätzten Maßnahmen geringen THG-Einsparpotenzials ist zu beachten, dass die Reaktivierung von Schienenstrecken nicht alleine aus klimapolitischen Gründen befürwortet werden kann, sondern auch aus verkehrspolitischen Gründen, um die Mobilität von Menschen zu verbessern, die nicht über ein eigenes Auto verfügen.

In Bayern selbst würden die Emissionen um knapp 10 kt CO₂-Äq. sinken. Dabei wird angenommen, dass der vermiedene Diesel und das vermiedene Benzin im Straßenverkehr komplett in Bayern selbst getankt werden würde, wenn es nicht zur Reaktivierung kommen würde – genau wie der Diesel-Mehrbedarf durch Diesel-Loks in Bayern selbst bedient werden würde. Die Vorketten-Emissionen dieser Kraftstoffe fallen zwar außerhalb Bayerns an, das gleiche gilt aber auch für einen großen Teil der zusätzlichen Emissionen durch den unterm Strich höheren Stromverbrauch.

Da es in Bayern in den vergangenen fünf Jahren keine Reaktivierungen von Bahnstrecken für den Personenverkehr gegeben hat (zuletzt wurde im Jahr 2015 die Strecke von Selb-Plößberg nach Aš reaktiviert), wird hier vereinfacht angenommen, dass ohne intensivierete politische Bemühungen bis 2030 keine der hier betrachteten 16 Strecken reaktiviert werden würde.

Niedrige Abschätzung:

Für die niedrige Abschätzung wird angenommen, dass im Durchschnitt auf den 16 reaktivierte Strecken pro Werktag nur 1000 Personenkilometer pro Streckenkilometer erreicht werden können. Dies ist der Wert, der aktuell vom Freistaat Bayern für die Förderung von Reaktivierungen als notwendiger Mindestwert angesetzt wird. Zudem wird in dieser Abschätzung angenommen, dass im Jahr 2030 nur 30 % der reaktivierten Strecken elektrisch befahren werden, der Rest mit dieselbetriebenen Fahrzeugen. Der angenommene Anteil der Personenkilometer, die auf den reaktivierten Strecken sonst mit dem Pkw gefahren wären, wird in dieser Abschätzung auf 30 % reduziert, die zusätzlich vermiedenen Pkw-Kilometer auf anderen Strecken werden auf 80 % der eingesparten Kilometer der reaktivierten Strecken selbst geschätzt. Für die Minderung der CO₂-Emissionen des Pkw-Verkehrs pro Personenkilometer zwischen 2020 und 2030 werden hier 45 % angenommen. 50 % werden angesetzt für die Bus-Fahrzeugkilometer, die bezogen auf die Fahrzeugkilometer der reaktivierten Bahnen eingespart werden können. Bei sonst gleichen Annahmen führt die Reaktivierung der Bahnstrecken im Jahr 2030 unter diesen pessimistischen Annahmen unterm Strich zu keinen Änderungen der Emissionen (+/- **0 kt CO₂-Äq.**).

Hohe Abschätzung:

Für die hohe Abschätzung wird angenommen, dass im Durchschnitt auf den 16 reaktivierten Strecken pro Werktag gut 3400 Personenkilometer pro Streckenkilometer erreicht werden können. Dies ist der Wert, der in der Studie von PTV (2020) im Durchschnitt für die zwölf Strecken in Baden-Württemberg mit „hohem Nachfragepotenzial“ abgeschätzt wird. Zudem wird in dieser Abschätzung angenommen, dass im Jahr 2030 90 % der reaktivierten Strecken elektrisch befahren werden, der Rest mit dieselbetriebenen Fahrzeugen. Der angenommene Anteil der Personenkilometer, die sonst mit dem Pkw gefahren wären, wird in dieser Abschätzung mit 40 % angesetzt. Für die Minderung der CO₂-Emissionen des Pkw-Verkehrs pro Personenkilometer zwischen 2020 und 2030 werden 30 % angenommen. Für die Bus-Fahrzeugkilometer, die bezogen auf die Fahrzeugkilometer der reaktivierten Bahnen eingespart werden können, werden 70 % angesetzt. Bei sonst gleichen Annahmen führt die Reaktivierung der Bahnstrecken im Jahr 2030 unter diesen optimistischen Annahmen zu Emissionseinsparungen in Höhe von **41 kt CO₂-Äq.**

3.3 Gebäudewärme und Effizienz

3.3.1 Energetische Sanierung des vermieteten Wohngebäudebestands

Tab. 3-13 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale beschleunigter und fokussierter energetischer Sanierungen des vermieteten Wohngebäudebestands

	Niedrig	Mittel	Hoch
Anteil der vermieteten Wohnungen an den gesamten Wohnungen in Bayern	49 %	49 %	49 %
Vermietete Wohnfläche in Bayern in Gebäuden mit Effizienzklassen E bis H (in Mio. m ²)	127	127	127
Durchschnittlicher Nutzenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in den Gebäuden nach Sanierung (in kWh/m ² _{Gebäudenutzfläche})	75	65	60
Anteil der durchgeführten Sanierungen am gesamten Bestand der vermieteten Wohnflächen mit Effizienzklassen E bis H	70 %	85 %	95 %
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	1985	3748	4598

Mittlere Abschätzung

Für die Abschätzung des bis 2030 realisierbaren THG-Einsparpotenzials einer verstärkten energetischen Sanierung des Gebäudebestandes findet eine Orientierung an dem Ende 2021 von der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN in den bayerischen Landtag eingebrachten Entwurf eines Bayerischen Wärmegesetzes statt (Bayerischer Landtag 2021b). Dieser Entwurf sieht vor, dass es bis zu bestimmten Stichjahren (u. a. 2030) zu energetischen Sanierungen von Gebäuden bestimmter Effizienzklassen kommen muss – in Abhängigkeit vom Anteil der erneuerbaren Energien an der Deckung des Wärmebedarfs der Gebäude. Die vorgeschlagenen gesetzlichen Vorgaben gelten dabei nur für vermietete Wohngebäude.

Für die hier vorgenommene Berechnung des THG-Einsparpotenzials wurde vereinfacht angenommen, dass alle bestehenden und vermieteten Wohngebäude der Energieeffizienzklasse E oder schlechter bis 2030 saniert werden müssen. Der Gesetzesentwurf sieht Ausnahmen davon vor für Gebäude der Energieeffizienzklasse E vor, sofern mindestens 50 % erneuerbare Energien zur Deckung des Wärmebedarfs genutzt werden und für Gebäude der Energieeffizienzklasse F, falls deren Wärmebedarf vollständig mit erneuerbaren Energien gedeckt wird. An dieser Stelle wird aber angenommen, dass die Realisierung solch hoher Anteile erneuerbarer Energien in Gebäuden mit entsprechend schlechtem energetischen Zustand i. d. R. nicht wirtschaftlich wären und daher Vermieter*innen eine Sanierung vorziehen werden. Gleichzeitig wird angenommen, dass bis 2030 die im Gesetzesentwurf vorgegebene Nutzung erneuerbarer Energien im Umfang von 10 % (Effizienzklasse C) bzw. 25 % (Effizienzklasse D) i. d. R. für Gebäude mit diesen Effizienzklassen umgesetzt wird und es hier bis 2030 (noch) nicht zu energetischen Sanierungen kommen wird.

Auf Grundlage dieser Annahmen wird zunächst die Wohnfläche abgeschätzt, die bis 2030 energetisch saniert werden würde. Für diese Abschätzung fließen folgende Daten ein:

- gesamte Wohnfläche in Bayern (606 Mio. m²) (Bayerisches Landesamt für Statistik 2019a)
- Anteil der vermieteten Wohnungen in Bayern an den Gesamtwohnungen (49 %) (destatis 2021a)
- Anteile der Mietwohnungen in Deutschland in Mehrfamilienhäusern (81 %) und in Ein- und Zweifamilienhäusern (19 %) (destatis 2021a)
- Anteile der Wohnfläche in Bayern in Mehrfamilienhäusern (35 %) und in Ein- und Zweifamilienhäusern (65 %) (Bayerisches Landesamt für Statistik 2019a)
- Aufteilung der Wohngebäude nach Effizienzklassen in Deutschland – unterschieden nach Ein- und Zweifamilienhäusern auf der einen Seite und Mehrfamilienhäusern auf der anderen Seite (nach BMWi 2020).

Für die nur für Deutschland vorliegenden Werte (Anteile der Mietwohnungen nach Gebäudeart und Anteile der Gebäude nach Effizienzklassen) wird angenommen, dass diese auch für Bayern gelten. Zudem wird bei der Berechnung angenommen, dass die Werte und Anteile bis 2030 konstant bleiben.

Daraus lassen sich die in der folgenden Tabelle nach Effizienzklassen dargestellten vermieteten Gebäudenutzflächen¹² ableiten, die bis 2030 energetisch saniert werden müssten. Die Tabelle zeigt zudem den je nach Gebäudeklasse angenommenen Nutzenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser pro Quadratmeter Gebäudenutzfläche pro Jahr. Grundlage für diese Annahmen sind die Angaben im Gebäudeenergiegesetz (GEG) und unterstellte Verluste der Heizsysteme und der Verteilung von durchschnittlich rund 10 % des im GEG angegebenen Endenergiebedarfs.

Tab. 3-14 Angenommene vermietete Gebäudenutzfläche und angenommener Nutzenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser in Bayern für die Gebäudeeffizienzklassen E, F, G und H

Gebäudeeffizienzklasse	Vermietete Gebäudenutzfläche in Bayern (in Mio. m ²)	Nutzenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser (in kWh/m ² Gebäudenutzfläche und Jahr)
E	42	130
F	44	160
G	32	205
H	35	250

Bezüglich der Sanierungstiefe wird angenommen, dass nach den energetischen Sanierungen im Durchschnitt der sanierten Gebäude ein Nutzenergiebedarf (inkl. Warmwasserbedarf) von 65 kWh/m² Gebäudenutzfläche und Jahr erreicht wird. Ähnliche Annahmen zur Sanierungstiefe werden in den Szenariostudien von Prognos et al. (2021) sowie von (BCG 2021) angenommen. Unter dieser Annahme kommt es bei den sanierten Gebäuden im Durchschnitt zu einer Minderung des Nutzenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser um knapp 65 %.

¹² Die Gebäudenutzfläche umfasst gegenüber der Wohnfläche zusätzliche Flächen, die nicht direkt bewohnt ist, wie beispielsweise Flure und Treppenträume. Sie wird hier aus der Wohnfläche abgeleitet, indem diese mit dem Faktor 1,2 multipliziert wird.

Zudem wird für die Abschätzung des THG-Einsparpotenzials angenommen, dass im Zusammenhang mit den energetischen Sanierungen in vielen Fällen auch ein Austausch der Heizsysteme mit einer deutlichen Verschiebung in Richtung Umweltwärme (und weniger stark ausgeprägt auch Solarthermie) erfolgt. Denn der Einsatz dieser erneuerbaren Energien in der Wärmebereitstellung wird durch die infolge der Sanierungen ermöglichte Nutzung niedriger Temperaturniveaus wirtschaftlich deutlich attraktiver. Die folgende Tabelle zeigt die angenommenen Anteile verschiedener Energieträger am Endenergieverbrauch für Wärme in den hier betrachteten Gebäuden vor und nach der Sanierung.

Tab. 3-15 Angesetzte Emissionsfaktoren der Energieträger sowie Energieträgeranteile in der Wärmebereitstellung der betrachteten Gebäude vor und nach den Sanierungen

Energieträger	Angesetzter Emissionsfaktor (in g CO ₂ -Äq./kWh, inkl. Vorkette)	Anteil in den hier betrachteten Gebäuden vor den Sanierungen	Anteil in den hier betrachteten Gebäuden nach den Sanierungen
Erdgas	226	45 %	20 %
Heizöl	308	20 %	5 %
Biomasse	11	10 %	10 %
Strom	398	5 %	13 %
Fernwärme	200	17 %	17 %
Solarthermie	0	1 %	5 %
Umweltwärme	0	2 %	30 %

Schließlich wird in der mittleren Abschätzung noch angenommen, dass von dem hier identifizierten Potenzial 85 % bis 2030 tatsächlich erschlossen werden können. Die restlichen 15 % des Potenzials beziehen sich auf Gebäude, die trotz angenommener gesetzlicher Vorgabe dennoch nicht (rechtzeitig) saniert werden oder die bis 2030 nicht weiter genutzt bzw. abgerissen werden.

Auf Grundlage dieser Annahmen lässt sich für das Jahr 2030 ein THG-Minderungspotenzial durch die bis dahin erfolgten energetischen Sanierungen der vermieteten Gebäude mit schlechtem Effizienzstandard in Höhe von 4564 kt CO₂-Äq. ableiten. Ein Teil dieser Einsparungen würde auch in einer Trendentwicklung realisiert werden. Unter der Annahme, dass sich die energetische Sanierungsrate des hier betrachteten Gebäudebestands gegenüber einer Trendentwicklung etwa Verfünffachen würde (s. folgende Box), wird hier angenommen, dass rund 80 % des Einsparpotenzials zusätzlich zur Trendentwicklung realisiert werden würde. Daraus folgt eine über die Trendentwicklung hinausgehende Minderung von **3748 kt CO₂-Äq.**

Ein Großteil dieser Einsparung würde in Bayern selbst realisiert werden. Unter den (vereinfachten) Annahmen, dass die Einsparungen der direkten Emissionen der Erdgas- und Heizöl-Nutzung vollständig in Bayern erfolgen und zudem jeweils 80 % der eingesparten Lebenszyklusemissionen der Fernwärmeerzeugung und der Biomasseerzeugung sowie 11 % der eingesparten direkten Emissionen der Stromerzeugung ebenfalls in Bayern realisiert werden, würden die Emissionen in Bayern durch die beschriebenen energetischen Sanierungen – über die Trendentwicklung hinaus – um 3323 kt CO₂-Äq. sinken.

Box: Notwendige Erhöhung der energetischen Sanierungsrate

Um die hier angenommenen umfassenden Sanierungen des vermieteten Gebäudebestands der Effizienzklassen E, F, G und H bis 2030 realisieren zu können, müssten – von Mitte 2022 an berechnet – jedes Jahr rund 10 % dieser Gebäude (bezogen auf die Wohnfläche) energetisch saniert werden. Dies ist ein sehr hoher Anteil, allerdings ist zu berücksichtigen, dass die jährliche energetische Sanierungsrate auch gegenwärtig schon bei vermieteten Wohngebäuden mit schlechtem energetischem Standard deutlich höher sein dürfte als die durchschnittliche energetische Sanierungsrate aller Wohngebäude.¹³ Es wird hier angenommen, dass in der Vergangenheit die jährliche energetische Sanierungsrate der entsprechenden Gebäude (vermietet, schlechter energetischer Standard, meist Mehrfamilienhäuser) bei etwa 2,0 % lag.

Bezogen auf die *gesamte* Wohnfläche ergibt sich eine durchschnittliche jährliche (wohnflächenbezogene) energetische Sanierungsrate von 2,7 %, sofern unterstellt wird, dass im restlichen (hier nicht explizit berücksichtigten) Wohngebäudebestand die Sanierungsrate gegenüber den vergangenen Jahren unverändert bleibt und diese mit 1,0 % angesetzt wird. Eine solche konstante Sanierungsrate im restlichen Gebäudebestand wäre – im Vergleich zu einer verminderten Sanierungsrate – v. a. hinsichtlich der nicht vermieteten Gebäude mit schlechtem energetischem Zustand wünschenswert. Zudem können nur dann zusätzliche THG-Minderungen in der hier ausgewiesenen Höhe realisiert werden.¹⁴ Bezogen auf den gesamten Gebäudebestand (inkl. der Nicht-Wohngebäude) lässt sich eine (auf die Wohn- bzw. Nutzfläche bezogene) energetische Sanierungsrate von rund 2,2 % ableiten, wenn für die Nicht-Wohngebäude ebenfalls eine Sanierungsrate von 1,0 % unterstellt wird.

Vorliegende Klimaschutzszenarien gehen von einer Erhöhung der energetischen Sanierungsrate des gesamten Gebäudebestandes auf 1,6 bis 1,9 % pro Jahr bis 2030 aus, was nicht allzu weit entfernt von den hier unterstellten 2,2 % liegt. Zudem ist zu berücksichtigen, dass bereits in der Vergangenheit die Sanierungsraten in den südlichen alten Bundesländern höher waren als in Deutschland insgesamt (IWU 2018). Allerdings müssten die 2,2 % pro Jahr im Schnitt der Jahre 2022 bis 2030 erreicht werden, was bei einem anzunehmenden kontinuierlichen Hochlauf Sanierungsraten von über 2,2 % pro Jahr in der zweiten Hälfte der 2020er Jahre erfordern würde. Ob bzw. wie es möglich sein wird, die energetische Sanierungsrate in Bayern relativ kurzfristig entsprechend zu erhöhen, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht werden. Vermutlich wäre unter anderem der Einsatz innovativer Konzepte nötig, zum Beispiel die industrielle Vorfertigung von Bauelementen für die Sanierung und ein digitaler Scan der zu sanierenden Gebäude nach niederländischem Vorbild („Energiesprong“). Solche innovativen Konzepte könnten – in ausreichender Breite umgesetzt – schnellere sowie kostengünstigere Sanierung ermöglichen.

¹³ Darauf deuten Angaben in IWU (2018) hin. Dort wird für Altbauten bis Baujahr 1978 eine jährliche energetische Sanierungsrate von etwa 1,43 % abgeleitet, für alle Wohngebäude hingegen eine Rate von 0,99 %. Zudem werden in der gleichen Studie für Mehrfamilienhäuser höhere energetische Sanierungsraten angegeben als für Ein- und Zweifamilienhäuser.

¹⁴ Wenn eine Fokussierung der Sanierungen auf die hier betrachteten vermieteten Gebäude mit schlechtem energetischem Standard zu geringeren Sanierungsraten im restlichen Gebäudebestand führen würde, wäre dies aufgrund der Fokussierung auf Gebäude mit besonders hohem Einsparpotenzial dennoch mit zusätzlichen THG-Einsparungen verbunden, diese zusätzlichen Minderungen würden dann aber geringer ausfallen als hier berechnet.

Niedrige Abschätzung

Für die niedrige Abschätzung wird angenommen, dass der Nutzenergiebedarf der Gebäude für Raumwärme und Warmwasser nach der energetischen Sanierung im Durchschnitt 75 kWh/m² Gebäudenutzfläche beträgt und dass nur 70 % der vermieteten Gebäudewohnfläche der energetischen Effizienzklassen E, F, G und H bis 2030 tatsächlich saniert werden. Zudem wird hier angenommen, dass es nach den Sanierungen nicht zu einer anderen Heizenergiestruktur kommt, dass also die Energieträgeranteile nach den Sanierungen identisch sind mit den entsprechenden Anteilen vor den Sanierungen. Bei sonst gleichen Annahmen leitet sich daraus für das Jahr 2030 eine – über die Trendentwicklung hinausgehende – THG-Einsparung in Höhe von **1985 kt CO₂-Äq.** ab.

Hohe Abschätzung

Für die hohe Abschätzung wird angenommen, dass der Nutzenergiebedarf der Gebäude für Raumwärme und Warmwasser nach der energetischen Sanierung im Durchschnitt 60 kWh/m² Gebäudenutzfläche beträgt und dass es gelingt, 95 % der vermieteten Gebäudewohnfläche der energetischen Effizienzklassen E, F, G und H bis 2030 tatsächlich zu sanieren. Zudem wird hier angenommen, dass es nach den Sanierungen zu einer noch etwas stärkeren Veränderung der Energieträgerstruktur für die Wärmebereitstellung kommen wird. So sinkt der Anteil von Erdgas und Heizöl in diesem Fall bis 2030 auf zusammen 18 % (statt 25 % in der mittleren Abschätzung und 65 % vor den Sanierungen) und der Anteil der Umweltwärme steigt auf 34 % (statt 30 % in der mittleren Abschätzung und 2 % vor den Sanierungen). Bei sonst gleichen Annahmen leitet sich daraus für das Jahr 2030 eine – über die Trendentwicklung hinausgehende – THG-Einsparung in Höhe von **4598 kt CO₂-Äq.** ab.

3.3.2 Ausbau erneuerbarer Energien in der Fernwärmeerzeugung

Tab. 3-16 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer deutlich verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien in der Fernwärmeerzeugung

	Niedrig	Mittel	Hoch
Anstieg des Beitrags erneuerbarer Energien in der Fernwärmeerzeugung in Deutschland zwischen 2018 und 2030 (in TWh/a)	30	30	30
Anteil Bayerns an dem bundesweiten Anstieg des Beitrags erneuerbarer Energien in der Fernwärmeerzeugung zw. 2018 und 2030	14 %	16 %	20 %
Anteil der emissionsintensiven Energieträger Erdgas, Heizöl und fossile Fernwärme an der Gesamtmenge der substituierten Energie	50 %	65 %	100 %
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	540	732	1177

Mittlere Abschätzung

Grundsätzlich besteht ein erhebliches Potenzial zur Nutzung erneuerbarer Energien wie Geothermie, Biomasse und Solarthermie in der Fernwärmeerzeugung Bayerns (Miehling et al. 2021) bzw. Deutschlands (DUH 2020; Thamling et al. 2010). Eine Studie, die das bis 2030 speziell in Bayern realisierbare Potenzial erneuerbarer Energien für die Fernwärme bei förderlichen politischen Rahmenbedingungen und Fördermaßnahmen ermittelt, ist uns allerdings nicht bekannt. Folglich wird hier für die Abschätzung des bis 2030 realisierbaren THG-Minderungspotenzials auf den im Szenario KN2045 (Prognos et al. 2021) angenommenen Ausbau erneuerbarer Energien in der Fernwärmeerzeugung in Deutschland zurückgegriffen.

Bezüglich des in KN2045 bis 2030 beschriebenen Ausbaus wird in der mittleren Abschätzung vereinfacht angenommen, dass 16 % davon in Bayern realisiert werden könnten. Der Anteil entspricht dem aktuellen Anteil der bayerischen Bevölkerung an der gesamtdeutschen Bevölkerung. Aufgrund der in Bayern (gegenüber Deutschland insgesamt) überdurchschnittlichen Solarstrahlung (DWD o. J.), des überdurchschnittlichen Biomassepotenzials (AEE 2013) und der vielerorts (v. a. in Oberbayern) guten Bedingungen für die Nutzung von Geothermie (Bundesverband Geothermie 2022) führt die Verwendung dieses Anteils vermutlich zu einer eher konservativen Einschätzung des bayerischen Potenzials. Auf der anderen Seite ist die Bevölkerungsdichte in Bayern geringer als im bundesdeutschen Durchschnitt (bpb 2020), was die Fernwärmenutzung erschwert bzw. pro Gebäudeanschluss tendenziell teurer macht.

Unter Rückgriff auf das Szenario KN2045 (Prognos et al. 2021) und bei Verwendung eines Anteils von 16 % für Bayern ergibt sich für den Freistaat zwischen 2018 und 2030 ein Ausbaupotenzial bei erneuerbaren Energien in der Fernwärme von 4,7 TWh. Davon entfällt der größte Anteil auf Umweltwärme¹⁵ (1,7 TWh), gefolgt von der tiefen Geothermie (1,4 TWh), der Solarthermie (0,9 TWh) und der Biomasse (0,6 TWh).

¹⁵ Dabei wird angenommen, dass der in Prognos et al. (2021) ausgewiesene Beitrag der Wärmepumpen zu 75 % aus Umweltwärme besteht und zu 25 % aus Strom.

Bezüglich der Energieträger, die durch diese zusätzliche erneuerbare Wärmeerzeugung verdrängt werden, wird der Energieträgermix für die Gebäudewärme aus dem Szenario KN2045 (Prognos et al. 2021) für das Jahr 2030 weitgehend übernommen, ergänzt um die Annahme, dass der Anteil der ersetzten (fossilen) Fernwärme doppelt so hoch ist wie im durchschnittlichen Bestand (die Anteile der restlichen Energieträger werden proportional reduziert). Dahinter steckt die Annahme, dass der Ausbau erneuerbarer Energien in der Fernwärme zu einem nicht unerheblichen Teil bestehende Fernwärmenetze mitnutzen und dabei zum Teil fossile Fernwärmequellen ersetzen wird. Die folgende Tabelle zeigt die unterstellten Anteile der verschiedenen Energieträger, die durch die zusätzliche erneuerbar erzeugte Fernwärme verdrängt werden sowie deren angenommenen THG-Emissionsfaktoren, die aus verschiedenen Quellen stammen (Baumann und Schuller 2021; DEPI 2018; Fritsche und Rausch 2008; Icha 2021) und verwendet werden, um das THG-Einsparpotenzial zu quantifizieren.

Tab. 3-17 **Anteile der durch zusätzliche erneuerbare Fernwärme verdrängten Energieträger im Jahr 2030 in der mittleren Abschätzung und deren jeweilige Emissionsfaktoren**

Energieträger	Anteil der durch die erneuerbar erzeugte Fernwärme verdrängten Energieträger	Angesetzter Emissionsfaktor (CO ₂ -Äq./kWh, inkl. Vorketten)
Erdgas	28 %	226
Heizöl	10 %	308
Biomasse	14 %	11
Strom	9 %	398
Fernwärme (fossil-basiert)	27 %	200
Solarthermie	3 %	0
Umweltwärme	9 %	0

Auf Grundlage dieser Annahmen ergibt sich für das Jahr 2030 in Bayern ein THG-Minderungspotenzial durch eine entsprechend deutlich verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien in der Fernwärmeversorgung von 861 kt CO₂-Äq. Unter der Annahme, dass in einer Trendentwicklung nur ein kleiner Teil (15 %) dieses Ausbaus realisiert werden würde, ergeben sich über die Trendentwicklung hinausgehende Emissionseinsparungen in Höhe von **732 kt CO₂-Äq.**

Von dieser Einsparung fallen geschätzt 515 kt CO₂-Äq. in Bayern an.¹⁶

Niedrige Abschätzung

In der niedrigen Abschätzung wird der Anteil Bayerns an dem nach KN2045 (Prognos et al. 2021) bis 2030 realisierbaren bundesdeutschen Ausbau erneuerbarer Energien in der Fernwärme auf 14 % reduziert. Zudem wird angenommen, dass die

¹⁶ Die vermiedenen Emissionen der Vorkette der fossilen Energieträger, 20 % der Lebenszyklusemissionen der Biomasse sowie ein Großteil der vermiedenen Emissionen der Stromerzeugung (rund 90 %) fallen annahmegemäß außerhalb Bayerns an.

emissionsintensiven Energieträger (Erdgas, Heizöl, Fernwärme) anteilig weniger stark durch die zusätzliche erneuerbare Fernwärme verdrängt werden als in der mittleren Abschätzung. In letzterer machen sie 65 % der verdrängten Energie aus, in der niedrigen Abschätzung nur 50 %. Bei sonst gleichen Annahmen ließen sich die Emissionen im Jahr 2030 dann – zusätzlich zur Trendentwicklung – um **540 kt CO₂-Äq.** reduzieren.

Hohe Abschätzung

In der hohen Abschätzung wird der Anteil Bayerns an dem nach KN2045 (Prognos et al. 2021) bis 2030 realisierbaren bundesdeutschen Ausbau erneuerbarer Energien in der Fernwärme auf 20 % erhöht. Zudem wird angenommen, dass ausschließlich die emissionsintensiven Energieträger (Erdgas, Heizöl, Fernwärme) durch die zusätzliche erneuerbare Fernwärme verdrängt werden. Bei sonst gleichen Annahmen ließen sich die Emissionen im Jahr 2030 dann – zusätzlich zur Trendentwicklung – um **1177 kt CO₂-Äq.** reduzieren.

3.3.3 Nutzung des industriellen Abwärmepotenzials

Tab. 3-18 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer weitgehenden Nutzung des industriellen Abwärmepotenzials

	Niedrig	Mittel	Hoch
Bisher ungenutztes industrielles Abwärmepotenzial in Bayern zur netzgebundenen Nutzung in Gebäuden (in TWh/a)	2,9	2,9	3,5
Ausnutzung des zusätzlichen Abwärmepotenzials bis zum Jahr 2030	60 %	80 %	90 %
Anteil fossiler Heizsysteme (Erdgas und Öl) an den insgesamt durch die Abwärmenutzung verdrängten Heizsystemen	30 %	38 %	70 %
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	228	364	625

Mittlere Abschätzung

Für die Abschätzung des THG-Minderungspotenzials einer Nutzung des vorhandenen industriellen Abwärmepotenzials wird hier in erster Linie auf Ergebnisse aus Blömer et al. (2019) zurückgegriffen. In dieser Studie wird bundesländerscharf ermittelt, wie hoch das wirtschaftlich erschließbare Potenzial der Nutzung industrieller Abwärme für eine netzgebundene Versorgung des Gebäudebestandes mit Raumwärme und Warmwasser ist. Dabei wird für Bayern angegeben, dass das bisher ungenutzte Potenzial, das sowohl durch bestehende als auch neu zu errichtende Wärmenetze erschließbar ist, 2,9 TWh pro Jahr beträgt. In der Studie werden die bundesländerscharfen Werte nur nach „konservativer“ Abschätzung ausgewiesen, nach der das Abwärmepotenzial erst ab einer Temperatur von 100 °C genutzt werden kann.¹⁷

In der mittleren Abschätzung wird hier angenommen, dass es bis 2030 gelingen wird, dieses Potenzial zu 80 % zu erschließen. Dies entspricht einem zusätzlich nutzbaren Abwärmepotenzial von jährlich 2,3 TWh. Die folgende Tabelle zeigt die unterstellten Anteile der verschiedenen Energieträger, die durch die zusätzliche Abwärmenutzung verdrängt werden sowie deren angenommenen THG-Emissionsfaktoren, die aus verschiedenen Quellen stammen (Baumann und Schuller 2021; DEPI 2018; Fritsche und Rausch 2008; Icha 2021) und verwendet werden, um das THG-Einsparpotenzial der Abwärmenutzung zu quantifizieren. Die Anteile der Energieträger orientieren sich dabei an den Anteilen zur Deckung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs im Jahr 2030 im Szenario KN2045 (Prognos et al. 2021). Allerdings wird hier angenommen, dass der Anteil der Fernwärme bei den substituierten Energieträgern doppelt so hoch ist, da es plausibel erscheint, dass die Abwärmenutzung häufig in bestehenden Wärmenetzen erfolgt und dort zuvor genutzte Fernwärmequellen verdrängt.

Für die Abwärme selbst werden dabei keine THG-Emissionen angesetzt, da die Abwärme im Referenzfall ungenutzt bliebe.

¹⁷ Für Gesamtdeutschland wird in der Studie für das theoretische Potenzial ausgewiesen, dass dieses bei Berücksichtigung von Netzbetriebstemperaturen ab 50 °C rund 25 % höher liegt als bei Berücksichtigung von Temperaturen erst ab 100 °C.

Tab. 3-19 Anteile der durch Abwärme verdrängten Energieträger im Jahr 2030 in der mittleren Abschätzung und deren jeweilige Emissionsfaktoren

Energieträger	Anteil der durch Abwärme verdrängten Energieträger	Angesetzter Emissionsfaktor (CO ₂ -Äq./kWh, inkl. Vorketten)
Erdgas	28 %	226
Heizöl	10 %	308
Biomasse	14 %	11
Strom	9 %	398
Fernwärme (fossil-basiert)	27 %	200
Solarthermie	3 %	0
Umweltwärme	9 %	0

Auf Grundlage dieser Annahmen ergibt sich für 2030 ein THG-Einsparpotenzial durch die Nutzung der industriellen Abwärme in Höhe von 428 kt CO₂-Äq.

Es wird angenommen, dass ohne zusätzliche politische Maßnahmen lediglich 15 % dieser Einsparungen bis 2030 realisiert werden würden. Damit könnten durch zusätzliche Maßnahmen **364 kt CO₂-Äq.** im Jahr 2030 vermieden werden.

Von dieser Einsparung fallen geschätzt 257 kt in Bayern an.¹⁸

Niedrige Abschätzung

In der niedrigen Abschätzung wird angenommen, dass bis zum Jahr 2030 trotz intensiver Bemühungen lediglich 60 % des vorhandenen zusätzlichen Abwärmepotenzials genutzt werden können. Zudem wird angenommen, dass die relativ emissionsintensiven Energieträger Erdgas und Heizöl in der Summe nur 30 % der substituierten Energieträger ausmachen (statt 38 % in der mittleren Abschätzung). Bei sonst gleichen Annahmen verringert sich das THG-Einsparpotenzial dieser Maßnahme dann auf **228 kt CO₂-Äq.** (ohne die THG-Minderungen in der Trendentwicklung).

Hohe Abschätzung

In der hohen Abschätzung wird zum einen angenommen, dass das zusätzlich verfügbare Abwärmepotenzial 20 % höher liegt als in der mittleren Abschätzung angenommen. Begründet liegt dies in der Annahme, dass es bis 2030 gelingen könnte, auch große Teile des Potenzials der Abwärme zwischen 50 und 100 °C zu erschließen. Bei dieser hohen Abschätzung wird zudem unterstellt, dass 90 % des zusätzlichen Abwärmepotenzials bis zum Jahr 2030 erschlossen werden können. Schließlich wird außerdem angenommen, dass in überproportionalem Maße solche Gebäude die Abwärme nutzen werden, die zuvor bzw. ansonsten mit Erdgas (50 %), Erdöl (20 %) bzw. konventioneller Fernwärme (30 %) geheizt haben bzw. hätten. Bei sonst gleichen Annahmen ergibt sich für das Jahr 2030 ein THG-Einsparpotenzial in Höhe von **625 kt CO₂-Äq.** – zusätzlich zu den Minderungen in der Trendentwicklung.

¹⁸ Die vermiedenen Emissionen der Vorkette der fossilen Energieträger, 20 % der Lebenszyklusemissionen der Biomasse sowie ein Großteil der vermiedenen Emissionen der Stromerzeugung (rund 90 %) fallen annahmegemäß außerhalb Bayerns an.

3.3.4 Konsequente energetische Inspektion von Klimaanlage größer 12 kW

Tab. 3-20 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer konsequenten energetischen Inspektion von Klimaanlage mit einer Leistung von über 12 kW

	Niedrig	Mittel	Hoch
Änderung des Einsparpotenzials 2030 gegenüber dem Bezugsjahr der Studie von Schiller et al. (2014)	– 30 %	– 20 %	– 10 %
Änderung des Einsparpotenzials der inspektionspflichtigen Anlagen gegenüber dem gesamten Anlagenbestand	– 30 %	– 20 %	– 10 %
Anteil der bis 2030 tatsächlich inspizierten Anlagen an den nach GEG bis dahin zur Inspektion verpflichteten Anlagen	60 %	80 %	95 %
Anteil der nach einer Inspektion tatsächlich realisierten Einsparungen an den insgesamt vorhandenen Einsparungen	20 %	50 %	70 %
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	63	279	605

Mittlere Abschätzung:

Für die Abschätzung des Einsparpotenzials einer konsequenten energetischen Inspektion von Klimaanlage wird im Wesentlichen auf eine 2014 veröffentlichte Forschungsarbeit (Schiller et al. 2014) zurückgegriffen.

Basierend auf einer Auswertung zuvor vorgenommener Inspektionen schätzt die Studie für die Gesamtzahl der in Deutschland installierten „raumluftechnischen Anlagen“, die eine Leistung von über 12 kW haben und unter die gesetzliche Pflicht zur Durchführung energetischer Inspektionen fallen, das Strom- sowie Wärme-Einsparpotenzial ab, das sich durch Betriebsoptimierungen sowie den Austausch von Komponenten erschließen ließe. Die Studie ermittelt ein jährliches Strom-Einsparpotenzial von mindestens 7,5 TWh und bis zu 12,5 TWh sowie ein jährliches Wärme-Einsparpotenzial von mindestens 11,9 TWh und bis zu 20,4 TWh. Daraus wird in der Studie ein CO₂-Einsparpotenzial von 7,7 bis 12,9 Mt abgeleitet. Im Folgenden wird hier jeweils mit dem Mittelwert der unteren und oberen Abschätzungen der Energieeinsparpotenziale gerechnet.

Da sich diese Abschätzungen auf das Jahr 2012 beziehen, wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass das Energieeinsparpotenzial des Anlagenbestands im Jahr 2030 niedriger liegen wird, da es über fast 20 Jahre zu einer schrittweisen Erneuerung der Bestandsanlagen gekommen sein wird und neuere Anlagen in der Regel energieeffizienter sind als alte Anlagen, die außer Betrieb genommen werden. Aus diesem Grund wird hier eine Reduktion des Potenzials um 20 % unterstellt. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Studie (Schiller et al. 2014) das Einsparpotenzial im gesamten Anlagenbestand ermittelte, während sich die Inspektionspflicht nur auf solche Anlagen bezieht, die mindestens seit bereits zehn Jahren in Betrieb sind. Bei einer angenommenen Lebensdauer der entsprechenden Anlagen von 25 Jahren kann das Einsparpotenzial eines nicht unerheblichen Teils der Anlagen nicht durch eine konsequentere energetische Inspektion gemäß §74 bis §78 GEG 2020 erschlossen werden. Folglich wird hier davon ausgegangen, dass das Einsparpotenzial des unter die

Inspektionspflicht fallenden Anlagenbestands 20 % niedriger ist (und auch im Jahr 2030 sein wird) als das Einsparpotenzial des Gesamtbestands.¹⁹

Für die Umrechnung des auf diese Weise abgeleiteten Einsparpotenzials der entsprechenden Anlagen in Deutschland im Jahr 2030 auf die Anlagen in Bayern wird aufgrund des Fehlens statistischer Daten sowie (unserer Kenntnis nach) des Fehlens länderspezifischer Abschätzungen des Bestands oder des Einsparpotenzials angenommen, dass die Anlagen und deren Reduktionspotenzial entsprechend des Bevölkerungsanteils verteilt sind. In Bayern leben knapp 16 % der deutschen Bevölkerung, entsprechend wird dieser Faktor für die Ermittlung des Einsparpotenzials in Bayern übernommen.²⁰

Ferner wird hier angenommen, dass politische Maßnahmen für eine konsequentere energetische Inspektion der relevanten Anlagen dazu führen werden, dass bis 2030 80 % der eigentlich zu inspizierenden Anlagen auch tatsächlich einer Inspektion unterzogen werden.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die angenommene Realisierungsquote, d. h. derjenige Anteil der in den Inspektionen aufgeführten Einsparpotenziale, der auch tatsächlich im Nachgang realisiert wird. Zumindest derzeit gibt es für die Betreiber*innen der Anlagen keine Verpflichtung, identifizierte Einsparpotenziale auch tatsächlich zu realisieren. Unseres Wissen nach gibt es keine Erhebungen, die zuverlässige Abschätzungen erlauben, wie hoch gegenwärtig die Realisierungsquote ist. Hier nehmen wir eine Realisierungsquote von 50 % an.

Aus diesen Überlegungen und Annahmen leitet sich für das Jahr 2030 für Bayern ein realisierbares Strom-Einsparpotenzial von 374 GWh und ein realisierbares Wärme-Einsparpotenzial von 604 GWh ab.

Unter der Annahme, dass die eingesparte Strommenge im Jahr 2030 die Stromerzeugung aus Erdgaskraftwerken ersetzt (s. Erläuterung in Kapitel 2), wird eine CO₂-Vermeidung pro kWh von 353 g abgeleitet. Hinzu kommen vermiedene Vorketten-Emissionen von 45 g CO₂-Äq. pro kWh. Daraus folgen im Jahr 2030 eingesparte Emissionen infolge des reduzierten Strombedarfs von 149 kt.

Unter der Annahme, dass die eingesparte Menge Wärme zur Hälfte eine Wärmebereitstellung über Erdgas (Emissionsfaktor 201 g/kWh plus 25 g/kWh Vorkette) und zur Hälfte eine Wärmebereitstellung über Heizöl (Emissionsfaktor 266 g/kWh plus 41 g/kWh Vorkette) ersetzt, können im Jahr 2030 infolge des reduzierten Wärmebedarfs rund 161 kt CO₂-Äq. eingespart werden.

In der Summe (Strom- plus Wärmeeinsparung) können demnach mit dieser Maßnahme 310 kt CO₂-Äq. eingespart werden.

¹⁹ Zwar dürften bei Annahme einer durchschnittlichen Lebensdauer von 25 Jahren etwa 40 % der bestehenden Anlagen nicht unter die Inspektionspflicht fallen (10 Jahre/25 Jahre), allerdings dürften diese neueren Anlagen aufgrund ihrer durchschnittlich höheren Effizienz ein gegenüber dem Gesamtbestand unterdurchschnittliches Einsparpotenzial haben – daher wird hier von einem verminderten Einsparpotenzial der Inspektionen von nur 20 % ausgegangen.

²⁰ Diese Annahme wird dadurch unterstützt, dass auf Bayern nach Zahlen des Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) zwischen 2014 und 2020 ebenfalls 16 % der Registrierungen für Klimainspektionsberichte entfallen sind (persönliche E-Mail-Korrespondenz mit dem DIBt im Dezember 2021).

Die vorliegende Studie von Schiller et al. (2014) sowie auch aktuelle Angaben zu den Registrierungen für Klimainspektionen (persönliche E-Mail-Korrespondenz mit dem DIBt im Dezember 2021) legen nahe, dass derzeit knapp 10 % der jährlich eigentlich durchzuführenden Inspektionen tatsächlich durchgeführt werden. Hier wird angenommen, dass dies in einer Referenzentwicklung so bleiben würde und damit nur etwa 10 % der hier angenommenen Inspektionen durchgeführt werden würden. Damit könnten nur 10 % der im Umsetzungsfall realisierten Einsparungen erreicht werden. Folglich könnte eine konsequentere energetische Inspektion über eine Trendentwicklung hinaus schätzungsweise **279 kt CO₂-Äq.** einsparen.

Aufgrund der engen Verbindungen im Stromsystem wird ein Großteil der auf den verminderten Strombedarf zurückzuführenden direkten Emissionsminderungen (Schätzung: rund 90 %) in Erdgaskraftwerken außerhalb Bayerns realisiert. Auch die vermiedenen Vorketten-Emissionen der Energieträger (sowohl bei der Wärme- als auch der Stromerzeugung) fallen – so hier die Annahme – vollständig außerhalb Bayerns an. Insgesamt fallen unter diesen Annahmen genau 50 % des hier abgeleiteten Einsparpotenzials in Bayern an, die restlichen 50 % außerhalb Bayerns.

Niedrige Abschätzung:

Für die niedrige Abschätzung wird angenommen, dass das gesamte Einsparpotenzial im Jahr 2030 nicht nur 20 %, sondern 30 % niedriger liegen wird als im Bezugsjahr 2012 der Studie von Schiller et al. (2014). Zudem wird angenommen, dass das Gesamtpotenzial, das im Zuge konsequenterer Inspektionen erschlossen werden kann, um 30 % (statt 20 %) niedriger liegt, da die installierten Anlagen, die jünger als zehn Jahre sind, nicht unter die Inspektionspflicht fallen. In der niedrigen Abschätzung wird zudem angenommen, dass bis 2030 nur 60 % der gesetzlich vorgeschriebenen Inspektionen durchgeführt werden können und dass zudem die Realisierungsquote in Bezug auf das identifizierte Einsparpotenzial nur 20 % beträgt. Bei sonst gleichen Annahmen könnten die THG-Emissionen in diesem Fall im Jahr 2030 durch die Maßnahme – zusätzlich zu den Einsparungen in der Trendentwicklung – um **63 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

Hohe Abschätzung:

Für die hohe Abschätzung wird angenommen, dass das gesamte Einsparpotenzial im Jahr 2030 nicht 20 %, sondern nur 10 % niedriger liegen wird als im Bezugsjahr 2012 der Studie von Schiller et al. (2014). Zudem wird angenommen, dass das Gesamtpotenzial, das im Zuge konsequenterer Inspektionen erschlossen werden kann, um 10 % (statt 20 %) niedriger liegt, da die installierten Anlagen, die jünger als zehn Jahre sind, nicht unter die Inspektionspflicht fallen. In der hohen Abschätzung wird zudem angenommen, dass bis 2030 95 % der gesetzlich vorgeschriebenen Inspektionen durchgeführt werden können und dass zudem die Realisierungsquote in Bezug auf das identifizierte Einsparpotenzial 70 % beträgt. Bei sonst gleichen Annahmen könnten die THG-Emissionen in diesem Fall im Jahr 2030 durch die Maßnahme – zusätzlich zu den Einsparungen in der Trendentwicklung – um **605 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

3.3.5 Neubauten im KfW-40-Standard

Tab. 3-21 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale der Einführung des KfW-40-Standards als Mindeststandard im Neubau

	Niedrig	Mittel	Hoch
Neu errichtete Wohnfläche in Bayern ab Mitte 2024, die unter neuen Standard fallen würde (in Mio. m ²)	27,4	27,4	27,4
Neu errichtete beheizte Nutzfläche in Nichtwohngebäuden in Bayern ab Mitte 2024, die unter neuen Standard fallen würde (in Mio. m ²)	18,9	18,9	18,9
Anteil der beheizten Nutzfläche an der gesamten ab Mitte 2024 neu errichteten Nutzfläche von Nichtwohngebäuden in Bayern	60 %	65 %	70 %
Anteil der ab Mitte 2024 neu errichteten Gebäude mit Wärmerückgewinnung (aktueller Mindeststandard/KfW-55/KfW-40) (in %)	40/85/95	30/80/100	20/70/100
Durchschnittliche Jahresarbeitszahl der in neuen Gebäuden errichteten elektrischen Wärmepumpen im Jahr 2030	3,6	3,3	3,0
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	87	107	115

Mittlere Abschätzung

Für die Abschätzung des THG-Minderungspotenzials dieser Maßnahme werden zunächst die Wohngebäude betrachtet und anschließend auf Grundlage des für die Wohngebäude ermittelten Minderungspotenzials das Minderungspotenzial für Nichtwohngebäude vereinfacht abgeschätzt.

Die Wohnfläche neu errichteter Wohngebäude in Bayern betrug im Jahr 2020 rund 6,0 Mio. m² (Bayerisches Landesamt für Statistik 2021a). Es wird hier angenommen, dass die Einführung des KfW-40-Standards als neuer Mindeststandard Mitte 2022 erfolgt und dass ab dann neu genehmigte Wohngebäude den neuen Standard einhalten müssen. Dies könnte unter der Annahme einer typischen Dauer von rund 18 Monaten zwischen Baugenehmigung und Fertigstellung bedeuten, dass alle ab Anfang 2024 fertig errichteten Wohngebäude den Standard erfüllen. Es wird hier auf Basis der Annahmen in Prognos et al. (2021) angenommen, dass zwischen 2024 und 2030 die jährlich neu errichtete Wohnfläche gegenüber 2020 um 30 % niedriger liegen wird. Dann würden – bei einer unterstellten vollständigen Einhaltung der gesetzlichen Vorgabe – bis Mitte 2030 rund 27 Mio. m² Wohnfläche im KfW-40-Standard errichtet werden.

Für das Jahr 2020 wird der Anteil der genehmigten Wohngebäude in Deutschland, die im KfW-55-Standard errichtet werden sollen, anhand eines Abgleichs der KfW-55-Förderanträge und der Baugenehmigungen auf knapp 60 % geschätzt (Destatis 2020; Öko-Institut 2021). Auf der gleichen Grundlage lässt sich der Anteil der KfW-40-Gebäude an allen Baugenehmigungen auf 25 % schätzen. Nur die restlichen 15 % werden – so hier die Annahme – derzeit noch nach dem gültigen Mindeststandard errichtet. Da keine Datengrundlage für separaten Abschätzungen für Bayern bekannt ist, werden diese Anteile auch für Bayern angenommen. Zudem wird hier zunächst – bevor weiter unten eine abweichende Trendentwicklung herangezogen wird – angenommen, dass diese Anteile an den neu errichteten Wohngebäuden bis 2030 stabil bleiben.

In UBA (2019) finden sich Angaben zu typischen spezifischen Wärmebedarfen in Neubauten je nach energetischem Standard des Neubaus. Dabei werden die Bedarfe innerhalb der verschiedenen energetischen Standards auch unterschieden nach Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie nach Häusern mit und ohne Wärmerückgewinnung. Anhand der vorliegenden Neubau-Statistik für Bayern wird angenommen, dass dort gegenwärtig Einfamilienhäuser 62 % der neu errichteten Wohnfläche ausmachen (Bayerisches Landesamt für Statistik 2021a). Bezüglich des Einsatzes von Wärmerückgewinnung werden hier mangels (bekannter) repräsentativer Zahlen eigene Annahmen getroffen. Demnach wird angenommen, dass Lüftungsanlagen mit eingebauter Wärmerückgewinnung in 30 % der Gebäude zum Einsatz kommen, die nach derzeit geltendem Mindeststandard gebaut werden, in 80 % der Gebäude nach KfW-55-Standard und in 100 % der Gebäude nach KfW-40-Standard.

Mittels dieser Annahmen zum Verhältnis von Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie zum Ausmaß des Einsatzes von Wärmerückgewinnung wird unter Rückgriff auf UBA (2019) geschlussfolgert, dass der durchschnittliche Wärmebedarf pro Wohnfläche im Neubau (inkl. Bedarf für Warmwasser) bei Wohngebäuden im derzeit gültigen Mindeststandard jährlich 90 kWh/m² beträgt, im KfW-55-Standard 57 kWh/m² und im KfW-40-Standard 40 kWh/m².

Je nach energetischer Effizienz der neu errichteten Wohngebäude ist zudem von einem abweichenden durchschnittlichen Heizträgermix auszugehen. Basierend auf Entwicklung der Beheizungsstruktur im Neubau in den letzten Jahren (BDEW 2022), werden die in der folgenden Tabelle aufgeführten Anteile für verschiedene energetische Gebäudestandards für den Zeitraum 2024 bis 2030 unterstellt. Über Erdgas, elektrische Wärmepumpen, Fernwärme und Holz bzw. Holzpellets hinaus werden hier zwecks Vereinfachung keine weiteren Energieträger bzw. Heiztechnologien berücksichtigt.

Tab. 3-22 Annahmen zum (hauptsächlichen) Heizträger in neu errichteten Gebäuden in Abhängigkeit vom energetischen Standard der Gebäude

	Derzeit gültiger Standard	KfW-55-Standard	KfW-40-Standard
Erdgas	20 %	5 %	0 %
Elektrische Wärmepumpen	60 %	65 %	70 %
Fernwärme	15 %	20 %	20 %
Holz/Holzpellets	5 %	10 %	10 %

Für die Abschätzung der THG-Emissionseinsparungen infolge der Einführung des KfW-40-Standards wird zudem angenommen, dass der Wirkungsgrad neuer Erdgasheizungen (bezogen auf den Heizwert von Erdgas) 95 % betragen, und die durchschnittliche Jahresarbeitszahl der in den neuen Gebäuden eingesetzten Wärmepumpen bei 3,3 liegen wird. Die Emissionsminderungen durch den infolge der höheren energetischen Effizienz eingesparten Stromverbrauch bei den Wärmepumpen wird – wie in der vorliegenden Studie üblich – unter Rückgriff auf ein Erdgas-Kraftwerk mit einem Wirkungsgrad von 57 % ermittelt. Die Vorketten-Emissionen von Erdgas werden sowohl bei der Stromerzeugung als auch beim Erdgas-Einsatz in Heizungen berücksichtigt.

Werden diese Annahmen herangezogen, so lässt sich für das Jahr 2030 ein Einsparpotenzial bei den Wohngebäuden von 94 kt CO₂-Äq. ableiten.

Für die Nichtwohngebäude wird zum einen auf Grundlage von Abschätzungen des Wärmebedarfs in Bestandsgebäuden in Deutschland (dena 2021) angenommen, dass deren spezifischer Wärmebedarf (bezogen auf die beheizte Nutzfläche) rund die Hälfte des entsprechenden Bedarfs von Wohngebäuden (bezogen auf die Wohnfläche) entspricht. Zum anderen wird auf Grundlage der bayerischen Statistik zum Neubau von Gebäuden (Bayerisches Landesamt für Statistik 2021a) abgeschätzt, dass 65 % der neu errichteten Nutzfläche von Nichtwohngebäuden beheizt ist.²¹ Daraus leitet sich ab, dass die im Jahr 2020 in Bayern neu errichtete beheizte Nutzfläche von Nichtwohngebäuden mit knapp 4,2 Mio. m² rund 70 % der Wohnfläche von neu errichteten Wohngebäuden entspricht. Bezüglich der Veränderung des jährlichen Flächenneubaus der Nichtwohngebäude bis zum Jahr 2030 wird die gleiche Annahme getroffen wie für die Wohngebäude (Rückgang um 30 % im Zeitraum 2024 bis 2030 gegenüber 2020).

Zudem wird angenommen, dass (in Bezug auf die beheizte Fläche) das relative THG-Einsparpotenzial durch die Verschärfung des Mindeststandards bei den Nichtwohngebäuden dem entsprechenden Potenzial bei den Wohngebäuden entspricht.

Aus diesen Annahmen leitet sich ab, dass das THG-Einsparpotenzial bei den Nichtwohngebäuden durch die Einführung des KfW-40-Standards als neuen Mindeststandards rund ein Drittel des entsprechenden Potenzials der Wohngebäude ausmacht und 31 kt CO₂-Äq. entspricht.

In der Summe (Wohngebäude plus Nichtwohngebäude) ergibt sich im Jahr 2030 ein THG-Minderungspotenzial in Höhe von 125 kt CO₂-Äq.

Allerdings war in den vergangenen Jahren im Neubau ein Trend hin zu höheren Effizienzstandards zu beobachten. Es ist davon auszugehen, dass dieser Trend auch ohne Einführung eines neuen Mindeststandards anhalten würde. Wird angenommen, dass der Anteil der KfW-40-Gebäude in den zwischen 2024 und 2030 neu errichteten Gebäuden in einer Trendentwicklung von rund 25 % auf 40 % deutlich ansteigt, während der Anteil der KfW-55-Gebäude im Neubau hingegen leicht auf 50 % sinkt und nur die restlichen 10 % noch nach derzeit gültigem Mindeststandards errichtet werden würden, so würden sich auch in der Trendentwicklung im Jahr 2030 gegenüber einer Entwicklung mit konstanten Anteilen der Effizienzstandards im Wohn- sowie Nichtwohngebäudebereich THG-Minderungen in Höhe von 18 kt CO₂-Äq. ergeben.

Die über die abgeschätzte Trendentwicklung hinausgehenden Einsparungen dieser Maßnahme belaufen sich folglich im Jahr 2030 auf **107 kt CO₂-Äq.** Innerhalb Bayerns werden dabei rund 60 % dieser Einsparungen (66 kt) erzielt. (Der Großteil der auf den verringerten Strombedarf zurückgehenden Emissionsminderungen wird den hier zugrunde liegenden Annahmen außerhalb Bayerns realisiert werden.)

²¹ Dieser Anteil wird in der Statistik in Bezug auf den Rauminhalt angegeben. Es wird hier angenommen, dass der entsprechende Anteil in Bezug auf die Nutzfläche identisch ist.

Niedrige Abschätzung

Für die niedrige Abschätzung des Potenzials wird zum einen angenommen, dass die Unterschiede in der Nutzung von Wärmerückgewinnung im Neubau bei den verschiedenen Effizienz-Standards weniger ausgeprägt sind (aktueller Standard: 40 %, KfW-55-Standard: 85 %, KfW-40-Standards: 95 %). Zudem wird angenommen, dass die durchschnittliche Jahresarbeitszahl der im Neubau verbauten elektrischen Wärmepumpen im Jahr 2030 etwas höher liegen wird als in der mittleren Abschätzung, nämlich bei 3,6. Schließlich wird angenommen, dass der Anteil der beheizten Nutzfläche an der gesamten neuen Nutzfläche bei Nichtwohngebäuden lediglich 60 % (statt 65 %) beträgt. Unter sonst gleichen Annahmen können dann die THG-Emissionen im Jahr 2030 durch diese Maßnahme – zusätzlich zur Trendentwicklung – um **87 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

Hohe Abschätzung

Für die hohe Abschätzung des Potenzials wird zum einen angenommen, dass die Unterschiede in der Nutzung von Wärmerückgewinnung im Neubau bei den verschiedenen Effizienz-Standards stärker ausgeprägt sind (aktueller Standard: 20 %, KfW-55-Standard: 70 %, KfW-40-Standards: 100 %). Zudem wird angenommen, dass die durchschnittliche Jahresarbeitszahl der im Neubau verbauten elektrischen Wärmepumpen im Jahr 2030 etwas niedriger liegen wird als in der mittleren Abschätzung, nämlich bei 3,0. Schließlich wird angenommen, dass der Anteil der beheizten Nutzfläche an der gesamten neuen Nutzfläche bei Nichtwohngebäuden 70 % (statt 65 %) beträgt. Unter sonst gleichen Annahmen können dann die Emissionen im Jahr 2030 durch diese Maßnahme – zusätzlich zur Trendentwicklung – um **115 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

3.4 Landwirtschaft und Landnutzung

3.4.1 Reduktion der Tierbestände

Tab. 3-23 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer Reduktion der Tierbestände in Bayern

	Niedrig	Mittel	Hoch
THG-Emissionen der Nutztierhaltung durch Fermentation und Wirtschaftsdünger-Management im Jahr 2019 in Bayern (in Mt CO ₂ -Äqu.)	7,8	7,8	7,8
Anteil der indirekten Emissionen an den gesamten Lebenszyklusemissionen von Fleisch und anderen tierischen Produkten	60 %	65 %	70 %
Anteil der Lebenszyklusemissionen einer Kalorie vegetarischer Ernährung gegenüber einer Kalorie des durchschnittlichen Fleischverzehr	20 %	20 %	20 %
Reduktion der Tierbestände in Bayern zwischen 2019 und 2030	15 %	20 %	25 %
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	1757	2677	4164

Mittlere Abschätzung

In dieser mittleren Abschätzung wird angenommen, dass es gelingt, den Fleischkonsum und den Konsum sonstiger tierischer Produkte in Bayern bis 2030 (gegenüber 2019) um 20 % zu reduzieren und dass dies zu einem gleichstarken Rückgang der Tierbestände in Bayern (Milchkühe, übrige Rinder, Schweine und Geflügel) führen wird. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass der pro-Kopf-Fleischverzehr auch nach einem Rückgang um 20 % immer noch deutlich über der von der Deutschen Gesellschaft für Ernährung (DGE) empfohlenen Höchstmenge liegen würde.²²

Zur Abschätzung der Minderungspotenziale einer entsprechenden Reduktion der Tierbestände wird zunächst ermittelt, wie hoch die direkt durch die Tierbestände in Bayern verursachten THG-Emissionen sind. Hierfür werden zunächst Angaben für Deutschland zu den Methan- und Lachgasemissionen der Tierhaltung durch Fermentation und Wirtschaftsdünger-Management (UBA 2020) und zu der Aufteilung dieser Emissionen auf die relevanten Tierarten vom Thünen-Institut (o. J.) ausgewertet.

Anschließend werden die auf diese Weise ermittelten THG-Emissionen auf Bayern umgerechnet, indem für die verschiedenen Tierarten der Anteil Bayerns an den gesamtdeutschen Beständen (Bayerisches Landesamt für Statistik 2019b; Destatis 2021b, o. J.) ermittelt und identische spezifische THG-Emissionen in Deutschland und Bayern unterstellt wurden.²³ Hieraus ergeben sich direkte THG-Emissionen der

²² Die DGE (2017) empfiehlt einen pro-Kopf-Fleischverzehr von maximal 300 bis 600 Gramm pro Woche, also von maximal rund 15 bis 30 kg pro Jahr. In Deutschland lag der pro-Kopf-Fleischverzehr im Jahr 2020 bei rund 57 kg (BMEL 2022a).

²³ In Bayern gibt es einen im Vergleich zum restlichen Deutschland höheren Anteil grünlandbasierter Rinderhaltung, besonders bei den Milchkühen. Diese Haltungsform weist nach Kiefer et al. (2015) tendenziell geringere THG-Emissionen auf. In der hier vorgenommenen Abschätzung des THG-Minderungspotenzials reduzierter Tierbestände bleibt diese Besonderheit unberücksichtigt, da uns zu den Anteilen der Haltungsformen in Bayern im Vergleich zu Deutschland sowie zu den spezifischen THG-Emissionen der verschiedenen Haltungsformen keine ausreichend detaillierten Daten vorliegen.

Nutztierhaltung in Bayern im Jahr 2019 von rund 7,8 Mt CO₂-Äquivalenten. Dabei dominieren die Emissionen der Milchkühe (4,7 Mt) und der Rinder (2,6 Mt).

Es wird angenommen, dass ein Rückgang der Tierbestände in Bayern um 20 % auch zu einem entsprechenden Rückgang der durch die Tierbestände direkt verursachten THG-Emissionen führen wird. Daraus folgt eine Reduktion der THG-Emissionen in Höhe von 1555 kt CO₂-Äq.

Darüber hinaus ist aber zu beachten, dass mit der Tierhaltung auch bedeutende indirekte THG-Emissionen verbunden sind. So sind nach verschiedenen Quellen (Pulkinen et al. 2018; Weiss und Leip 2012) die Lebenszyklus-THG-Emissionen des Fleischverzehrs nur zu etwa einem Drittel auf die direkten Emissionen der Tiere in Form von Fermentation und Wirtschaftsdünger-Management zurückzuführen. Der größere Teil der Emissionen entsteht insbesondere durch den erheblichen Futtermittel-Anbaubedarf und die damit einhergehende Flächeninanspruchnahme.²⁴

Für die hier zunächst abgeleitete mittlere Abschätzung wird angenommen, dass diese indirekten Emissionen 65 % der gesamten Lebenszyklusemissionen der Tierhaltung ausmachen. Daraus folgt, dass die Gesamtemissionseinsparung auf 4444 kt CO₂-Äq. ansteigt. (Hierfür wurden die ermittelten direkten Emissionen in Höhe von 1555 kt durch 35 % – den Anteil dieser Emissionen an den Gesamtemissionen – geteilt.)

Schließlich muss aber auch berücksichtigt werden, dass der verminderte Fleischverzehr kompensiert werden muss und dadurch – wenn auch in geringeren Mengen – zusätzliche Emissionen entstehen. Für die Berechnung dieser zusätzlichen Emissionen wird angenommen, dass die durch den verminderten Fleischverzehr nicht zugekommenen Kalorien stattdessen durch Kalorien entsprechend einer durchschnittlichen vegetarischen Ernährung aufgenommen werden. Auf Grundlage von Angaben in Corrado et al. (2019) lässt sich schließen, dass die spezifischen THG-Emissionen (pro Kalorie) einer vegetarischen Ernährung etwa 20 % der spezifischen Emissionen des durchschnittlichen bayerischen Fleischkonsums entsprechen. Folglich wird angenommen, dass das oben ermittelte THG-Minderungspotenzial durch geringeren Fleischkonsum von 4444 kt CO₂-Äquivalente für die Ermittlung des Netto-Effekts um 20 % reduziert werden muss.

Daraus folgt unterm Strich ein Minderungspotenzial durch einen um 20 % verminderten Tierbestand in Höhe von 3569 kt CO₂-Äq. In den vergangenen Jahren sind die Tierbestände allerdings bereits kontinuierlich zurückgegangen und nach Prognos et al. (2021) ist in einer Trendentwicklung mit einem weiteren Rückgang bis 2030 zu rechnen. Laut der Studie ist von einer Reduktion der Milchkühe und der sonstigen Rinder zwischen 2018 und 2030 von 7 % auszugehen. Zwischen 2018 und 2019 sind die Bestände an Milchkühen und sonstigen Rindern in Bayern bereits um 2 % zurückgegangen (Bayerisches Landesamt für Statistik 2018, 2019b). Da der größte Anteil der Emissionen auf die Haltung von Milchkühen und sonstigen Rindern

²⁴ Wenn basierend auf den Angaben zum Flächenbedarf der Produktion verschiedener Fleischsorten in de Vries/de Boer (2010) ein durchschnittlicher Flächenbedarf (inkl. Bedarf für die Vorleistungen wie insbesondere Futtermittel) des bayerischen Fleischkonsums von 15 Quadratmeter pro kg Fleisch abgeschätzt wird, so ließe sich durch eine Minderung des Fleischkonsums um 20 % der Flächenbedarf für die Fleischproduktion um knapp 330.000 ha reduzieren. Diese Fläche (die nicht ausschließlich in Bayern liegen würde) stünde für andere Nutzungsformen oder den Naturschutz zur Verfügung. Zum Vergleich: Die landwirtschaftlich genutzte Fläche in Bayern betrug im Jahr 2019 rund 3,1 Mio. ha (StMELF 2020).

zurückzuführen ist, wird hier angenommen, dass in einer Referenzentwicklung die THG-Emissionen durch einen geringeren Viehbestand zwischen 2019 und 2030 um 5 % zurückgehen würden.

Ein solcher Rückgang der Tierbestände im Trend um 5 % würde bedeuten, dass bereits in der Trendentwicklung ein Viertel des in dieser Maßnahme untestellten Rückgangs der Tierbestände realisiert werden würde. Der Effekt *zusätzlicher* Maßnahmen zur weitergehenden Minderung der Tierbestände würde sich dann im Jahr 2030 auf **2677 kt CO₂-Äq.** belaufen.

Es wird hier grob abgeschätzt, dass von diesen Emissionsminderungen rund 2224 kt direkt in Bayern anfallen. Die vermiedenen direkten Emissionen fallen dabei vollständig in Bayern an. Hinsichtlich des Rückgangs der indirekten Emissionen der Fleischerzeugung sowie der zusätzlichen Emissionen durch den Ersatz des Fleischverzehrs wird hier angenommen, dass diese jeweils zu 70 % in Bayern stattfinden.²⁵

Niedrige Abschätzung

Für die niedrige Abschätzung wird angenommen, dass zwischen 2019 und 2030 eine Reduktion des Tierbestands lediglich um 15 % gelingen wird. Zudem wird angenommen, dass die über die Emissionen der Fermentation und des Wirtschaftsdünger-Managements hinausgehenden Lebenszyklusemissionen von Fleisch nur 60 % (statt 65 %) ausmachen. Bei sonst gleichen Annahmen können die THG-Emissionen dann – zusätzlich zur Trendentwicklung – um **1757 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

Hohe Abschätzung

Für die hohe Abschätzung wird angenommen, dass zwischen 2019 und 2030 eine Reduktion des Tierbestands um 25 % gelingen wird. Zudem wird angenommen, dass die über die Emissionen der Fermentation und des Wirtschaftsdünger-Managements hinausgehenden Lebenszyklusemissionen von Fleisch 70 % (statt 65 %) ausmachen. Bei sonst gleichen Annahmen können die THG-Emissionen dann – zusätzlich zur Trendentwicklung – um **4164 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

²⁵ Dies stellt eine grobe Schätzung dar, basierend auf einer Futtermittel-Importquote von rund 30 % für Deutschland insgesamt (BMEL 2022b), die hier auch für Bayern unterstellt wird sowie einem Selbstversorgungsgrad in Bayern bei Getreide und Kartoffeln von knapp über 100 % (d. h. Bayern ist ein Nettoexporteur bei diesen Lebensmitteln), bei Gemüse jedoch unter 50 % und bei Obst unter 10 % (StMELF 2020).

3.4.2 Wiedervernässung der Moore

Tab. 3-24 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer weitgehenden Wiedervernässung bayerischer Moore

	Niedrig	Mittel	Hoch
Bayerische Moorfläche, die nicht mehr naturnah ist und folglich für eine Wiedervernässung grundsätzlich in Frage kommt (in ha)	203.500	203.500	203.500
Bayerische Moorfläche, die bis 2030 wiedervernässt wird (in ha)	55.000	81.400	90.400
Spezifische THG-Einsparung, die sich durch eine Wiedervernässung durchschnittlich realisieren lassen (in t CO ₂ -Äq. pro ha)	10	20	25
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	539	1606	2234

Mittlere Abschätzung

In Bayern gibt es rund 220.000 Hektar Moorflächen (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2021). Weniger als 10 % dieser Flächen gelten noch als „naturnah“ (Bayerischer Oberster Rechnungshof 2021). Der Gesetzentwurf der Landtagsfraktion von BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN für ein Bayerisches Klimagesetz aus dem Jahr 2021 (Bayerischer Landtag 2021a) formuliert das Ziel, bis 2040 alle Moore wieder zu vernässen. In dieser mittleren Abschätzung wird angenommen, dass es durch ambitionierte politische Maßnahmen bis zum Jahr 2030 gelingen wird, 40 % der derzeit nicht naturnahen Moorflächen in Bayern wieder zu vernässen. Gut 81.000 Hektar Moorfläche müsste demnach bis 2030 wiedervernässt werden.²⁶ Dies wäre ein großer Schritt zur Erreichung des im Gesetzesentwurf formulierten Ziels vollständig wiedervernässter Moore bis 2040, auch wenn sich zur Zielerreichung die Geschwindigkeit der Wiedervernässung nach 2030 noch etwas erhöhen müsste.

Laut Bundesamt für Naturschutz (BfN 2010) ließen sich durch eine „optimale Renaturierung von Grasland und Acker auf Niedermoor [...] ca. 25 – 35 t CO₂-eq [pro Hektar und Jahr] einsparen“. Durch die Renaturierung von dränierten Hochmoorheiden, Torfstichen und Grasland auf Hochmoor ließen sich demnach 5 bis 23 t CO₂-Äq. pro Hektar und Jahr einsparen. Basierend auf den Mittelwerten könnten folglich durch eine Wiedervernässung pro Hektar 14 bis 30 t CO₂-Äq. pro Jahr eingespart werden. Einer Studie der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) zufolge, die vom Bayerischen Obersten Rechnungshof (2021) zitiert wird, könnten durch eine Renaturierung aller bayerischen Moorflächen jährlich Emissionen von bis zu 5 Mio. t CO₂-Äq. eingespart werden. Daraus leitet sich pro Hektar Moorfläche ein Einsparpotenzial von etwa 25 t ab, was im mittleren Bereich der zuvor aus der Studie des Bundesamts für Naturschutz (BfN 2010) abgeleiteten Spannweite liegt.

Für die mittlere Abschätzung des Einsparpotenzials durch die Wiedervernässung von Mooren wird hier dennoch ein etwas niedrigerer Wert von 20 t CO₂-Äq. pro Hektar Moorfläche angesetzt, da die oben erwähnten Werte aus der Literatur explizit von

²⁶ Zum Vergleich: Die Bayerische Staatsregierung hat Mitte 2021 das Ziel formuliert, bis zum Jahr 2040 55.000 Hektar Moorflächen wieder zu vernässen (Bayerischer Landtag 2021a).

maximalen Einsparpotenzialen sprechen. In der praktischen Umsetzung dürfte es u. a. infolge einer Berücksichtigung der Interessen der Nutzerinnen und Nutzer der Flächen bei vielen Moorflächen zu Abweichungen von „klimaoptimalen“ Renaturierungen kommen. Zudem ist davon auszugehen, dass es infolge von Renaturierungen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen zu gewissen Ertragsminderungen kommen wird, die auf anderen Flächen – ob innerhalb oder außerhalb Bayerns – kompensiert werden müssten, mit damit einhergehenden zusätzlichen THG-Emissionen.

Wird folglich durch die Wiedervernässung von Moorflächen eine jährliche Einsparung von 20 Tonnen CO₂-Äq. pro Hektar angesetzt²⁷ und bis 2030 in Bayern eine Renaturierung von gut 81.000 ha angenommen, so ließen sich dadurch im Jahr 2030 rund 1630 kt CO₂-Äq. einsparen. In der Vergangenheit wurden nach Bayerischem Obersten Rechnungshof (2021) zwischen 2014 und 2018 jährlich durchschnittlich lediglich 135 ha Moorflächen renaturiert. Bei einer Fortschreibung dieser jährlichen Flächenrenaturierung könnten bis 2030 lediglich gut 1 % der hier als Potenzial abgeleiteten THG-Einsparungen realisiert werden. Die über diese geringen Trendeinsparungen hinausgehenden THG-Minderungen betragen **1606 kt CO₂-Äq.**

Diese Emissionseinsparungen würden vollständig innerhalb Bayerns anfallen.²⁸

Zur Einordnung: Mit einer solchen Emissionsreduktion würde Bayern fast ein Drittel der THG-Minderungen erbringen, die für das Jahr 2030 für ganz Deutschland in der Nationalen Moorschutzstrategie des Jahres 2021 als Ziel gesetzt wurden. Auf Bayern entfallen 12 % der deutschen Moorflächen.

Niedrige Abschätzung

Bei der niedrigen Abschätzung wird angenommen, dass es bis 2030 "nur" gelingt, diejenige Fläche an Mooren wiederzuvernässen, die die Staatsregierung nach derzeitigen Plänen bis 2040 realisieren möchte (55.000 ha). Pro Hektar renaturierter Moorfläche wird zudem hier eine jährliche THG-Minderung in Höhe von nur 10 t CO₂-Äq. angenommen. Unter diesen Annahmen ist im Jahr 2030 mit einer – über die Trendentwicklung hinausgehenden – Emissionsminderung in Höhe von **539 kt CO₂-Äq.** zu rechnen.

Hohe Abschätzung

Bei der hohen Abschätzung wird angenommen, dass es bis 2030 gelingt, gut 90.000 Hektar Moorfläche wiederzuvernässen. Diese Fläche ergibt sich, wenn das Ziel der vollständigen Wiedervernässung aller Moorflächen bis 2040 entsprechende dem

²⁷ Dabei ist darauf hinzuweisen, dass der Methan- und damit der THG-Ausstoß nach einer Wiedervernässung von Moorflächen in den ersten Jahren aufgrund natürlicher Prozesse auch vorübergehend ansteigen kann. Durch optimierte Methoden der Wiedervernässung können diese zusätzlichen Methanemissionen möglicherweise weitgehend vermieden werden (Tiemeyer et al. 2017). Die hier angesetzte Klimaschutzwirkung der Wiedervernässung von Mooren stellt sich daher möglicherweise erst einige Jahre nach Durchführung der Maßnahmen ein. Aufgrund fehlender verfügbarer Informationen über einen zu erwartenden „typischen“ Emissionsverlauf nach der Wiedervernässung der bayerischen Moorflächen wird dieser kurzfristige Effekt hier nicht in der Quantifizierung berücksichtigt.

²⁸ Sollte es pro Hektar renaturierter Moorfläche zu höheren THG-Einsparungen kommen als 20 t CO₂-Äq., diese höheren Einsparungen aber wieder kompensiert werden durch geringere landwirtschaftliche Erträge, so wären die Emissionseinsparungen in Bayern vermutlich größer. Dafür würden außerhalb Bayerns zusätzliche Emissionen anfallen, da davon auszugehen ist, dass die auf anderen Flächen zwecks Kompensation notwendige zusätzliche landwirtschaftliche Produktion nicht ausschließlich in Bayern stattfinden würde. Aufgrund einer unzureichenden Datenverfügbarkeit wird dieser mögliche Effekt hier in der Quantifizierung aber nicht berücksichtigt.

Gesetzentwurf der Landtagsfraktion von BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN für ein Bayerisches Klimagesetz aus dem Jahr 2021 ab dem Jahr 2023 mit gleichbleibender Geschwindigkeit (das heißt mit einer jährlich identischen Fläche an Wiedervernässung) bis 2040 umgesetzt werden würde. Pro Hektar renaturierter Moorfläche wird hier zudem eine jährliche THG-Minderung in Höhe von 25 t CO₂-Äq. angenommen. Unter diesen Annahmen ist im Jahr 2030 mit einer – über die Trendentwicklung hinausgehenden – Emissionsminderung in Höhe von **2234 kt CO₂-Äq.** zu rechnen.

3.4.3 Weitgehende Vergärung anfallender Gülle in Biogasanlagen

Tab. 3-25 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer weitgehenden Vergärung anfallender Gülle in Biogasanlagen

	Niedrig	Mittel	Hoch
Bei Vergärung des kompletten derzeitigen dt. Güllepotenzials in der Landwirtschaft einsparbare THG-Emissionen (in Mt CO ₂ -Äq.)	4,8	5,6	6,3
Bei Vergärung des kompletten derzeitigen dt. Güllepotenzials in der Energiewirtschaft einsparbare THG-Emissionen (in Mt CO ₂ -Äq.)	3,2	3,2	3,2
Anteil des Güllepotenzials, dessen Nutzung in Biogasanlagen bis zum Jahr 2030 tatsächlich realisiert werden kann	60 %	70 %	80 %
Anteil Bayerns an dem gesamten deutschen Güllepotenzial im Jahr 2030	18 %	21 %	25 %
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	392	657	1054

Mittlere Abschätzung:

Für die Quantifizierung des Emissionsminderungspotenzials dieser Maßnahme wird im Wesentlichen auf eine Studie des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ) aus dem Jahr 2019 zurückgegriffen (Majer et al. 2019). Dieser Studie zufolge lagen die THG-Minderungen der Nutzung von Gülle in Biogasanlagen in Deutschland im Bezugsjahr 2016 infolge verminderter Emissionen gegenüber einer konventionellen Güllelagerung bei 1 bis 1,5 Mio. Tonnen CO₂-Äq. Hinzu kommen der Studie zufolge Emissionseinsparungen in der Energiewirtschaft infolge der energetischen Nutzung des gewonnenen Biogases (und der einhergehenden Substitution fossiler Energieträger) in Höhe von 1,6 Mio. t CO₂-Äq.

Für das Jahr 2016 wurde in der Studie geschätzt, dass rund ein Drittel der vorhandenen Gülle in Biogasanlagen genutzt wurde. Bei einer vollständigen Nutzung der Gülle könnten der Studie zufolge Emissionen in Höhe von 4,8 bis 6,3 Mio. t in der Landwirtschaft eingespart werden, und zusätzliche 3,8 Mio. t CO₂-Äq. in der Energiewirtschaft durch die energetische Nutzung des erzeugten Biogases. Dieses Potenzial der energetischen Nutzung wird für die vorliegende Arbeit aber umgerechnet zu 3,2 Mio. t, um den hier grundsätzlich angelegten Strom aus Erdgaskraftwerken (inkl. Vorkettenemissionen) zu berücksichtigen, nicht den Emissionsfaktor des in Majer et al. (2019) zugrunde gelegten Strommixes.

Werden nun für die mittlere Abschätzung sowohl für die Einsparung im Jahr 2016 als auch für die potenzielle zukünftige Einsparung die Mittelwerte herangezogen (d. h. 1,25 Mio. t im Jahr 2016 und 5,55 Mio. t bei vollständiger Nutzung des Güllepotenzials in Biogasanlagen), so ergibt sich ein *zusätzliches* THG-Einsparpotenzial in der Landwirtschaft von 4,3 Mio. t CO₂-Äq. Das *zusätzliche* THG-Einsparpotenzial in der Energiewirtschaft beträgt laut der Studie (Majer et al. 2019) – bei der erwähnten hier vorgenommenen Korrektur des Emissionsfaktors – knapp 1,9 Mio. t CO₂-Äq.

In der Summe ergibt sich für Deutschland demnach ein gegenüber 2016 zusätzlich realisierbares THG-Einsparpotenzial in Höhe von knapp 6,2 Mio. t CO₂-Äq. bei vollständiger Nutzung der Güllepotenziale. Es wird angenommen, dass dieses Potenzial

im Jahr 2030 infolge erwarteter rückläufiger Tierbestände 10 % niedriger liegen wird, bei dann 5,5 Mio. t. Zudem wird in der hier vorgenommenen mittleren Abschätzung angenommen, dass auf Bayern 21 % dieses Potenzials entfallen. Dies entspricht dem Anteil Bayerns an den tierischen Exkrementen nach AEE (2013). Zusätzlich wird in der mittleren Abschätzung angenommen, dass bis 2030 von diesem Gesamtpotenzial unter günstigen politischen Rahmenbedingungen 70 % realisiert werden können. Diesen Anteil hat die ehemalige Bundesministerin für Landwirtschaft und Ernährung, Julia Klöckner, Ende 2018 in einem Interview als Ziel für die Bundesebene formuliert (BMEL 2018).

Dies führt für das Jahr 2030 in Bayern zu einem THG-Minderungspotenzial durch eine deutlich verstärkte Güllebehandlung in Höhe von 810 kt CO₂-Äq. In den vergangenen Jahren hat es offenbar eine steigende Nutzung von Gülle in Biogasanlagen gegeben. Für die Trendfortschreibung wird daher auch ohne weitere Maßnahme von einer gewissen Erschließung der vorhandenen Potenziale ausgegangen. Auf Grundlage der für Deutschland insgesamt abgeschätzten Zunahme der Güllebehandlung in Biogasanlagen zwischen 2013 und 2016 (Majer et al. 2019) wird hier angenommen, dass in einer Trendfortschreibung ein Anstieg der Güllebehandlung zwischen 2016 und 2030 in Höhe von 23 % stattfinden würde. Entsprechend liegt die Emissionseinsparung im Jahr 2030 durch zusätzliche Maßnahmen bei **657 kt CO₂-Äq.**

In Bayern selbst fallen schätzungsweise Einsparungen in Höhe 348 kt CO₂-Äq. an. Dies sind vor allem die in der Landwirtschaft vermiedenen Emissionen. Der Großteil der in der Energiewirtschaft eingesparten Emissionen wird annahmegemäß außerhalb Bayerns anfallen. Dies liegt auch daran, dass hier vereinfacht angenommen wird, dass das gesamte Biogas verstromt wird. Sofern das Biogas auch zur Wärmezeugung genutzt wird, fallen anteilig höhere Ersparnisse in Bayern an.

Niedrige Abschätzung:

In der niedrigen Abschätzung wird angenommen, dass bei vollständiger Nutzung der derzeit verfügbaren Güllepotenziale in Biogasanlagen in der Landwirtschaft bundesweit THG-Emissionseinsparungen in Höhe von 4,8 Mio. Tonnen CO₂-Äq. realisiert werden könnten. Dies entspricht der unteren Schätzung der Studie von Majer et al. (2019). Zudem wird hier angenommen, dass lediglich 60 % der grundsätzlich verfügbaren Potenziale bis 2030 realisiert werden können. Außerdem wird in dieser unteren Abschätzung angenommen, dass auf Bayern lediglich 18 % der bundesweit verfügbaren Potenziale entfallen.²⁹ Bei sonst gleichen Annahmen könnten in diesem Fall im Jahr 2030 THG-Emissionseinsparungen – über die Trendentwicklung hinaus – von **392 kt CO₂-Äq.** realisiert werden.

Hohe Abschätzung:

In der hohen Abschätzung wird angenommen, dass bei vollständiger Nutzung der derzeit verfügbaren Güllepotenziale in Biogasanlagen in der Landwirtschaft

²⁹ Dieser Anteil wäre niedriger als der Anteil Bayerns an den tierischen Exkrementen nach AEE (2013) und auch deutlich niedriger als der gegenwärtige Anteil Bayerns am Rindviehbestand. Evtl. könnte das Potenzial in Bayern aber niedriger liegen als diese Anteile nahelegen, weil die unterdurchschnittlich kleinen Hofgrößen in Bayern (und ein damit einhergehendes relativ dezentrales Aufkommen von Gülle) eine wirtschaftliche Nutzung relevanter Teile des Gülleaufkommens in Biogasanlagen erschweren könnten.

bundesweit THG-Emissionseinsparungen in Höhe von 6,3 Mio. Tonnen CO₂-Äq. realisiert werden könnten. Dies entspricht der oben Abschätzung der Studie von Majer et al. (2019). Zudem wird hier angenommen, dass 80 % der grundsätzlich verfügbaren Potenziale bis 2030 realisiert werden können. Außerdem wird in dieser oberen Abschätzung angenommen, dass auf Bayern 25 % der bundesweit verfügbaren Potenziale entfallen. Ein entsprechend hoher Anteil könnte mit Blick auf den derzeitigen bayerischen Anteil an den insgesamt in Deutschland gehaltenen Rindern (26 % nach Destatis 2022) als plausibel eingeschätzt werden – denn Rindergülle macht mit Abstand den größten Teil des Güllepotenzials für Biogasanlagen aus (Majer et al. 2019). Bei sonst gleichen Annahmen könnten in diesem Fall im Jahr 2030 Emissionseinsparungen – über die Trendentwicklung hinaus – von **1054 kt CO₂-Äq.** realisiert werden.

3.4.4 Halbierung des Einsatzes von mineralischem Dünger bis 2030

Tab. 3-26 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer Halbierung des Einsatzes und der Herstellung von mineralischem Dünger bis 2030

	Niedrig	Mittel	Hoch
Direkte, auf Mineraldünger zurückzuführende N ₂ O-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden in Deutschland (in Mt CO ₂ -Äq.)	6,7	6,7	6,7
Anteil Bayerns an den direkten, auf Mineraldünger zurückzuführenden N ₂ O-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden in Deutschland	17 %	19 %	23 %
Anteil der direkten N ₂ O-Emissionen von Mineraldünger an den gesamten Lebenszyklusemissionen von Mineraldünger im Jahr 2030	50 %	45 %	40 %
Anteil der THG-Reduktion durch geringeren Düngemittleinsatz, der nicht an anderer Stelle durch Mehremissionen kompensiert wird	40 %	60 %	75 %
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	319	584	1011

Mittlere Abschätzung:

Für die Abschätzung des THG-Einsparpotenzials einer Halbierung des Einsatzes und der Herstellung von mineralischem Dünger werden zunächst die direkten Lachgas-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden in Deutschland betrachtet, die auf Mineraldünger zurückzuführen sind. Diese werden für 2019 auf 6,7 Mio. t CO₂-Äq. beziffert (Scheffler und Wiegmann 2021). Es wird in der mittleren Abschätzung angenommen, dass von diesen Emissionen 19 % auf Bayern entfallen. Dies entspricht sowohl dem Anteil Bayerns an der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland (Destatis 2021c) als auch dem Anteil Bayerns am Gesamtabsatz stickstoffhaltiger Düngemittel in Deutschland in den Jahren 2020/2021 (Destatis 2021d).

Basierend auf Daten des Industrieverbands Fertilizers Europe (o. J.) wird zudem angenommen, dass 45 % der gesamten Lebenszyklusemissionen von mineralischem Dünger auf diese direkten Lachgasemissionen der landwirtschaftlichen Böden zurückzuführen sind. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass zwischen 2011 und 2030 durch Effizienzfortschritte und eine stärkere Nutzung erneuerbarer Energien die THG-Emissionen der Produktion der Düngemittel um 20 % gesenkt werden.

Auf Grundlage dieser Annahmen lässt sich ableiten, dass eine Halbierung der Nutzung und Produktion mineralischer Dünger in Bayern zu Emissionsrückgängen von knapp 1,4 Mio. t CO₂-Äq. führen könnte. Allerdings ist zu beachten, dass eine entsprechend starke Minderung des Einsatzes von mineralischem Dünger mit niedrigeren landwirtschaftlichen Erträgen pro Fläche einhergehen dürfte und folglich zusätzliche Flächen landwirtschaftlich genutzt werden müssen, um eine bestimmte Nachfrage nach landwirtschaftlichen Produkten zu decken. Die mit der Nutzung dieser zusätzlichen Flächen einhergehenden Mehremissionen werden also voraussichtlich die hier abgeleiteten Minderungen bei den THG-Emissionen teilweise kompensieren.

Hier wird vereinfacht angenommen, dass 30 Prozentpunkte der 50-prozentigen Reduktion des Düngemittleinsatzes jeweils zur Hälfte durch effizienteren Düngereinsatz und durch eine Reduktion der zu bewirtschaftenden Flächen infolge eines

Rückgangs der Tierbestände erzielt werden.³⁰ Diese Maßnahmen führen nicht an anderer Stelle zu Mehremissionen.³¹ Die weiteren Minderungen (20 Prozentpunkte) werden annahmegemäß durch einen Ökolandbau-Ausbau erreicht. Dabei wird an dieser Stelle auf Grundlage vorliegender Literatur (s. Hauschild et al. 2021) angenommen, dass die ertragsbezogenen THG-Emissionen des Ökolandbaus in etwa denen des konventionellen Landbaus entsprechen. Folglich wird hier unterstellt, dass die im Ökolandbau durch den vermiedenen Dünger reduzierten THG-Emissioneneinsparungen durch zusätzliche THG-Emissionen infolge eines höheren Flächenbedarfs ausgeglichen werden. (Dieser zusätzliche Flächenbedarf kann auch außerhalb Bayerns auftreten.)

Es wird daher hier angenommen, dass die Netto-THG-Reduktion der hier betrachteten Maßnahme 60 % (30 % geteilt durch 50 %) ihrer Brutto-THG-Reduktion entspricht. Dies wären 834 kt CO₂-Äq.

Im dreijährigen Mittel ist der Absatz mineralischer Düngemittel in Deutschland zwischen 2007 bis 2010 und 2017 bis 2020 um etwa 10 % zurückgegangen (Industrieverband Agrar 2020). Der Rückgang hat sich in den letzten Jahren beschleunigt. Daher wird hier angenommen, dass auch ohne zusätzliche Maßnahmen der Einsatz und die Produktion mineralischer Düngemittel zwischen 2020 und 2030 um 15 % zurückgehen würde. Über die Trendentwicklung hinaus ergibt sich dann durch zusätzliche Maßnahmen noch ein THG-Minderungspotenzial in Höhe von **584 kt CO₂-Äq.**

Es wird hier vereinfacht angenommen, dass 70 % dieser Emissionsminderungen in Bayern selbst realisiert werden würden, also 409 kt CO₂-Äq. Diese Minderungen umfassen 100 % der direkten und indirekten Emissionen aus Böden, aber nur einen kleinen Teil der sonstigen Lebenszyklusemissionen, da die energie- und emissionsintensiven Produktionsschritte der Düngemittelherstellung hauptsächlich in anderen Bundesländern und dem Ausland erfolgen.

Niedrige Abschätzung:

In der niedrigen Abschätzung wird der Anteil Bayerns an den direkten, auf Mineraldünger zurückzuführenden Lachgas-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden mit 17 % angenommen. Zudem wird in dieser Abschätzung der Anteil der direkten Lachgas-Emissionen an den gesamten Lebenszyklusemissionen auf 50 % geschätzt. Schließlich wird abweichend von der mittleren Abschätzung auch noch angenommen, dass der Anteil der Brutto-Emissionsreduktion, der nicht an anderer Stelle kompensiert wird, nur 40 % beträgt (anstatt 60 %). Bei sonst gleichen Annahmen können dann die Emissionen durch diese Maßnahme um (netto) **319 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

³⁰ Die durch geringere Tierbestände freiwerdenden Flächen in Bayern würden voraussichtlich überwiegend auf andere Weise landwirtschaftlich genutzt werden. Dennoch ist global durch eine Minderung der Tierbestände von einer Reduktion landwirtschaftlich genutzter Flächen auszugehen, da infolge des niedrigeren spezifischen Flächenbedarfs einer fleischreduzierten Ernährung global der Druck auf die Ausweitung landwirtschaftlicher Flächen reduziert werden würde.

³¹ Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass in der oben quantifizierten Maßnahme „Reduktion der Tierbestände“ bereits die THG-Einsparungen durch geringere Tierbestände quantifiziert wurden, inkl. der Einsparungen durch geringeren Düngemittelbedarf. Folglich dürfen die Emissioneneinsparungen der hier betrachteten Maßnahme nicht vollständig mit der Maßnahme „Reduktion der Tierbestände“ aufaddiert werden. Dies würde ansonsten zu einer Doppelzählung von Emissionsminderungen führen. Dieser Umstand wird in der Zusammenfassung der THG-Einsparpotenziale in Kapitel 0 berücksichtigt.

Hohe Abschätzung:

In der hohen Abschätzung wird der Anteil Bayerns an den direkten, auf Mineraldünger zurückzuführenden Lachgas-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden mit 23 % angenommen. Zudem wird in dieser Abschätzung der Anteil der direkten Lachgas-Emissionen an den gesamten Lebenszyklusemissionen auf 40 % geschätzt. Schließlich wird abweichend von der mittleren Abschätzung noch angenommen, dass der Anteil der Brutto-Emissionsreduktion, der nicht an anderer Stelle kompensiert wird, 75 % beträgt (statt 60 %). Bei sonst gleichen Annahmen können dann die Emissionen durch diese Maßnahme um (netto) **1011 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

3.5 Öffentliche Hand

3.5.1 Ambitionierte energetische Sanierung von Schulgebäuden

Tab. 3-27 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer ambitionierten Sanierung bayerischer Schulgebäude bis 2030

	Niedrig	Mittel	Hoch
Beheizte Nettogrundfläche an staatlichen und kommunalen Schulen in Bayern (in Mio. m ²)	19	19	19
Anteil der Schulen (bezogen auf die beheizte Nettogrundfläche), der bis 2030 energetisch saniert wird	60 %	70 %	80 %
Derzeitiger durchschnittlicher Nutzenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser der zu sanierenden Schulen (in kWh/m ² _{beh. NGF})	135	160	180
Durchschnittlicher Nutzenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser der sanierten Schulen (nach Sanierungen) (in kWh/m ² _{beh. NGF})	60	50	45
Minderung der spezifischen THG-Emissionen der Wärmebereitstellung durch Energieträgerwechsel nach der Sanierung	20 %	40 %	60 %
Durchschnittliches Potenzial der Leistung einer PV-Anlage auf einer Schule (in kW _p)	70	100	120
Gegenwärtig bereits realisierter Anteil des PV-Potenzials der Schulen	20 %	15 %	10 %
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	260	435	602

Mittlere Abschätzung:

Für die Abschätzung des THG-Minderungspotenzials dieser Maßnahme wird zunächst abgeschätzt, wie groß derzeit die beheizte Nettogrundfläche der staatlichen und kommunalen Schulen in Bayern ist. Hierüber liegen nach unserer Kenntnis keine statistischen Daten vor. Folglich wird die Fläche abgeschätzt, indem eine für Schulen typische Flächengröße pro Schüler*in abgeleitet wird und diese Zahl mit der Anzahl der Schüler*innen in Bayern multipliziert wird. Auf Grundlage von Angaben von Fraunhofer IBP (2013) und Diedrich (2018) wird von einer typischen beheizten Nettogrundfläche (NGF) an Schulen von 13 m² pro Schüler*in ausgegangen. Die Anzahl der Schüler*innen an staatlichen und kommunalen Schulen in Bayern betrug im Schuljahr 2020/2021 rund 1,4 Millionen (Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus 2021). Daraus folgt, dass die beheizte Nettogrundfläche an staatlichen und kommunalen Schulen in Bayern derzeit etwa 19 Mio. m² betragen könnte.

Der derzeitige durchschnittliche Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser an den Schulen, die saniert werden können, wird auf jährlich 175 kWh/m² (bezogen auf die beheizte NGF) geschätzt. Der durchschnittliche (vor Sanierungen gemessene) Wert für diejenigen Schulsanierungen, die in Fraunhofer IBP (2013) dokumentiert sind, liegt zwar bei rund 200 kWh/m², es wird hier aber davon ausgegangen, dass die Schulen, die in der Vergangenheit saniert wurden, in der Regel einen überdurchschnittlichen spezifischen Wärmebedarf aufgewiesen haben. An dieser Stelle wird jedoch davon ausgegangen, dass ein großer Teil der bestehenden Schulen in Bayern (70 %, s. unten) bis 2030 saniert wird, daher wird ein niedrigerer durchschnittlicher Verbrauch von 175 kWh/m² für die sanierten Schulen angenommen.

Für die Verluste der Heizsysteme und der Verteilung werden hier durchschnittlich rund 10 % unterstellt, so dass sich aus dem endenergetischen Verbrauch von 175 kWh/m² ein Nutzenergieverbrauch von rund 160 kWh/m² ergibt.

Basierend auf vorliegenden Zahlen zu Sanierungen von Schulgebäuden in der Vergangenheit (Fraunhofer IBP 2013) wird zudem abgeschätzt, dass ambitionierte energetische Sanierungen diesen Nutzenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser im Durchschnitt auf 50 kWh/m² senken können.

Die Energieträgerstruktur der Wärmebereitstellung wird hier nicht explizit abgeschätzt. Stattdessen wird angenommen, dass die spezifischen THG-Emissionen im Schnitt bei 220 g CO₂-Äq./kWh liegen. Da vorliegenden Informationen zufolge viele Schulen entweder über Erdgas oder Fernwärme beheizt werden und für beide Energieträger – bezogen auf die Nutzenergie – ein spezifischer Emissionsfaktor in dieser Größenordnung angesetzt wird, erscheint dies eine plausible Annahme zu sein.

Ferner wird angenommen, dass es infolge der energetischen Sanierungen der Schulen vielfach auch zu einem (teilweisen) Wechsel des Heizenergieträgers kommen wird, in dessen Folge häufiger Wärmepumpen, Holz, Solarthermie und (zunehmend auf erneuerbaren Energien beruhende) Nah- und Fernwärme eingesetzt werden. Es wird angenommen, dass daher die spezifischen THG-Emissionen einer bereitgestellten kWh Wärme infolge der Sanierungen um 40 % (gegenüber dem Zustand vor den Sanierungen), also auf rund 130 g CO₂-Äq./kWh sinken werden.

Es wird außerdem angenommen, dass bis 2030 70 % der bestehenden Schulen in Bayern saniert sein könnten. Für die restlichen 30 % der Schulen könnte eine (tiefgehende) energetische Sanierung nicht in Frage kommen, z. B. weil diese Schulen bereits kürzlich energetisch saniert wurden, erst in den vergangenen Jahren errichtet wurden oder aber aus Gründen des Denkmalschutzes höchstens moderate energetische Maßnahmen durchführen können.

Durch die Reduktion des Heizwärmebedarfs sowie die teilweise Umstellung der verwendeten Energieträger können – basierend auf den getroffenen Annahmen – im Jahr 2030 Emissionen in Höhe von 374 kt CO₂-Äq. vermieden werden.

Neben Maßnahmen zur Reduktion des Heizwärmebedarfs umfasst die hier beschriebene Maßnahme auch die Installation von PV-Anlagen an den Schulen – zumeist auf den Dächern der Schulen. Hierfür wird basierend auf Ganz und Freiberger (2021) angenommen, dass im Schnitt auf jeder Schule in Bayern eine PV-Anlage mit einer Leistung von 100 kW_p installiert werden kann. Bei derzeit rund 4800 Schulen in Bayern (Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus 2021) führt dies zu einer installierten Kapazität von 480 MW_p. Es liegen nach unserem Wissen keine Daten zu den bislang installierten Kapazitäten auf bayerischen Schulen vor. Hier wird angenommen, dass bisher 15 % des Potenzials erschlossen wurden. Damit verbleibt ein zusätzliches (bis 2030 als realisierbar angesehenes) Potenzial von 408 MW_p.

Es werden zunächst für diese Anlagen Volllaststunden im Jahr 2030 in Höhe von 950 angenommen. Diese Volllaststunden werden für die hier vorgenommene Quantifizierung des THG-Einsparpotenzials aber um 10 % reduziert (855 Stunden), da für das Jahr 2030 in Bayern bei einem hier grundsätzlich angenommenen starken PV-Zubau mit gewissen energetischen Verlusten der PV-Stromerzeugung zu rechnen ist.

Diese Verluste werden sich hauptsächlich in den Sommermonaten infolge von notwendigen Zwischenspeicherungen (v. a. in Batterien) und teilweise auch Abregelungen in besonders sonnenreichen Stunden ergeben (Koch et al. 2020). Unter diesen Annahmen können im Jahr 2030 knapp 350 GWh Strom aus den auf den Schulen neu errichteten PV-Anlagen erzeugt werden.

Unter der Annahme, dass dieser zusätzliche Strom im Jahr 2030 zu einer geringeren Auslastung von Erdgaskraftwerken führt (s. Erläuterung in Kapitel 2), werden CO₂-Emissionen pro kWh in Höhe von 353 g vermieden. Hinzu kommen vermiedene Vorketten-Emissionen in Höhe von 45 g CO₂-Äq. pro kWh. Daraus folgen im Jahr 2030 geringere Emissionen infolge des zusätzlichen PV-Stroms von 138 kt CO₂-Äq.

In der Summe ergeben sich durch die energetische Sanierung der Schulen THG-Einsparungen in Höhe von 512 kt CO₂-Äq. Da keine Zahlen zur Entwicklung des Heizenergiebedarfs und des PV-Zubaus an bayerischen Schulen in den letzten Jahren vorliegen, wird vereinfacht angenommen, dass in einer Trendentwicklung 15 % dieser Einsparungen realisiert werden würden. Daraus folgt, dass die zusätzlichen (über den Trend hinausgehenden) THG-Einsparungen **435 kt CO₂-Äq.** entsprechen.

Unter der Annahme, dass große Teile (rund 90 %) der THG-Einsparungen der verminderten Nutzung von Erdgaskraftwerken in anderen Bundesländern bzw. dem Ausland anfallen, aber 85 % der durch die Wärmeeinsparung realisierten Einsparungen innerhalb Bayerns erschlossen werden, vermindern sich die THG-Emissionen in Bayern im Jahr 2030 um 281 kt CO₂-Äq.

Niedrige Abschätzung

In der niedrigen Abschätzung wird angenommen, dass der derzeitige Nutzenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser in den zu sanierenden Schulen 135 kWh/m² beträgt und dass die Sanierungen im Schnitt den Verbrauch auf 60 kWh/m² reduzieren. Bezüglich des Emissionsfaktors der Wärmebereitstellung wird in dieser niedrigen Abschätzung infolge der Sanierungen mit einer Minderung um 20 % gerechnet. Der Anteil der Schulen, der bis 2030 saniert werden kann, wird mit 60 % angesetzt. Die durchschnittliche Größe der auf Schulen installierten PV-Anlagen wird auf 70 kW_p geschätzt und es wird angenommen, dass 20 % dieses Potenzials gegenwärtig bereits genutzt werden. Unter sonst gleichen Annahmen können dann durch diese Maßnahme im Jahr 2030 (über die Trendentwicklung hinaus) **260 kt CO₂-Äq.** eingespart werden.

Hohe Abschätzung

In der hohen Abschätzung wird angenommen, dass der derzeitige Nutzenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser in den zu sanierenden Schulen 180 kWh/m² beträgt und dass die Sanierungen im Schnitt den Verbrauch auf 45 kWh/m² reduzieren. Bezüglich des Emissionsfaktors der Wärmebereitstellung wird in dieser hohen Abschätzung infolge der Sanierungen mit einer Minderung um 60 % gerechnet. Der Anteil der Schulen, der bis 2030 saniert werden kann, wird mit 80 % angesetzt. Die durchschnittliche Größe der auf Schulen installierten PV-Anlagen wird auf 120 kW_p geschätzt und es wird angenommen, dass nur 10 % dieses Potenzials derzeit bereits genutzt werden. Unter sonst gleichen Annahmen können durch die Maßnahme im Jahr 2030 (über die Trendentwicklung hinaus) **602 kt CO₂-Äq.** eingespart werden.

3.5.2 Ambitionierte energetische Sanierung der Liegenschaften

Tab. 3-28 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer ambitionierten energetischen Sanierung bayerischer Liegenschaften bis 2030

	Niedrig	Mittel	Hoch
Nettogrundfläche der Liegenschaften der unmittelbaren Staatsverwaltung (in Mio. m ²)	13,0	13,0	13,0
Anteil der Liegenschaften (bezogen auf die Nettogrundfläche), der bis 2030 energetisch saniert wird	60 %	70 %	80 %
Derzeitiger durchschnittlicher Nutzenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser der zu sanierenden Liegenschaften (in kWh/m ² _{NGF})	140	150	160
Durchschnittlicher spezifischer Heizenergieverbrauch der sanierten Liegenschaften (nach erfolgten Sanierungen) (in kWh/m ² _{NGF})	70	60	50
Minderung der spezifischen THG-Emissionen der Wärmebereitstellung durch Energieträgerwechsel nach der Sanierung	20 %	40 %	60 %
Zusätzliches Potenzial an PV-Anlagen auf den bayerischen Liegenschaften (in MW _p)	100	200	300
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	151	251	358

Mittlere Abschätzung

Für die Abschätzung des THG-Minderungspotenzials dieser Maßnahme wird auf Angaben der Landesregierung zur Nettogrundfläche der Liegenschaften der unmittelbaren Staatsverwaltung (13,0 Mio. m²) sowie zu deren durchschnittlichem endenergetischem und witterungsbereinigtem Heizenergieverbrauch (154 kWh/m²_{NGF}) im Abrechnungsjahr 2018 zurückgegriffen (Bayerischer Landtag 2020). Für die Verluste der Heizsysteme und der Verteilung werden hier durchschnittlich rund 10 % unterstellt, so dass sich aus dem endenergetischen Verbrauch von 154 kWh/m² pro Jahr ein Nutzenergieverbrauch von rund 140 kWh/m² pro Jahr ergibt.

Es wird angenommen, dass bis zum Jahr 2030 70 % dieser Liegenschaften (bezogen auf die Nettogrundfläche) energetisch tiefgehend saniert werden können. Für die restlichen 30 % der Gebäude könnte eine (tiefgehende) energetische Sanierung nicht in Frage kommen, z. B. weil diese Gebäude bereits kürzlich energetisch saniert wurden, erst in den vergangenen Jahren errichtet wurden oder dort aus Gründen des Denkmalschutzes höchstens moderate energetische Maßnahmen durchgeführt werden können.

Der derzeitige durchschnittliche Nutzenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in den Gebäuden, die bis 2030 saniert werden, wird hier auf jährlich 150 kWh/m²_{NGF} geschätzt. Dieser Wert liegt etwas höher als der für 2018 auf Basis der Angaben der Landesregierung abgeleitete durchschnittliche Wert von 140 kWh/m²_{NGF} (Bayerischer Landtag 2020) da hier angenommen wird, dass tendenziell diejenigen Gebäude bis 2030 saniert werden, die einen überdurchschnittlichen Heizenergieverbrauch aufweisen.

Es wird zudem abgeschätzt, dass ambitionierte energetische Sanierungen den spezifischen Wärmebedarf der Gebäude im Durchschnitt auf $60 \text{ kWh/m}^2_{\text{NGF}}$ senken können.

Die Energieträgerstruktur der Wärmebereitstellung der Liegenschaften wird hier nicht explizit abgeschätzt. Stattdessen wird angenommen, dass die spezifischen THG-Emissionen gegenwärtig im Schnitt bei $220 \text{ g CO}_2\text{-Äq./kWh}$ liegen.

Ferner wird angenommen, dass es infolge der energetischen Sanierungen der Liegenschaften vielfach auch zu einem (teilweisen) Wechsel des Heizenergieträgers kommen wird und in der Folge häufiger Wärmepumpen, Holz, Solarthermie und (zunehmend auf erneuerbaren Energien beruhende) Nah- und Fernwärme eingesetzt werden. Es wird angenommen, dass daher die spezifischen THG-Emissionen einer bereitgestellten kWh Wärme infolge der Sanierungen um 40 % (gegenüber dem Zustand vor den Sanierungen), also auf rund $130 \text{ g CO}_2\text{-Äq./kWh}$ sinken werden.

Durch die Reduktion des Heizwärmebedarfs sowie die teilweise Umstellung der verwendeten Energieträger zur Wärmeerzeugung können 2030 – basierend auf den getroffenen Annahmen – Emissionen in Höhe von $228 \text{ kt CO}_2\text{-Äq.}$ vermieden werden.

Neben Maßnahmen zur Reduktion des Heizwärmebedarfs umfasst die hier beschriebene Maßnahme auch die Installation von PV-Anlagen auf den Dächern der Liegenschaften. Auf Grundlage aktueller Angaben der Landesregierung (Bayerischer Staatsminister für Wohnen, Bau und Verkehr 2022) zu den bis Ende 2021 auf den Dächern staatlicher Liegenschaften installierten PV-Anlagen (21 MW auf rund 4 % der Gebäude im Besitz des Freistaats) wird hier angenommen, dass das zusätzliche PV-Ausbau-potenzial für alle Liegenschaften bei 200 MW liegt und diese Menge an neuer PV-Kapazität auch bis 2030 realisiert werden wird.

Es werden zunächst für diese Anlagen Volllaststunden im Jahr 2030 in Höhe von 950 angenommen. Diese Volllaststunden werden für die hier vorgenommene Quantifizierung des THG-Einsparpotenzials aber um 10 % reduziert (855 Stunden), da für das Jahr 2030 in Bayern bei einem hier grundsätzlich angenommenen starken PV-Zubau mit gewissen energetischen Verlusten der PV-Stromerzeugung zu rechnen ist. Diese Verluste werden sich hauptsächlich in den Sommermonaten infolge von notwendigen Zwischenspeicherungen (v. a. in Batterien) und teilweise auch Abregelungen in besonders sonnenreichen Stunden ergeben (Koch et al. 2020). Unter diesen Annahmen können im Jahr 2030 rund 171 GWh Strom aus den auf den Dächern der Liegenschaften neu errichteten PV-Anlagen erzeugt werden.

Unter der Annahme, dass dieser zusätzliche Strom im Jahr 2030 zu einer geringeren Auslastung von Erdgaskraftwerken führt (s. Erläuterung in Kapitel 2), werden CO_2 -Emissionen pro kWh in Höhe von 353 g vermieden. Hinzu kommen vermiedene Vorketten-Emissionen in Höhe von $45 \text{ g CO}_2\text{-Äq. pro kWh}$. Daraus folgen im Jahr 2030 geringere Emissionen infolge des zusätzlichen PV-Stroms in Höhe von $68 \text{ kt CO}_2\text{-Äq.}$

In der Summe ergeben sich durch die energetische Sanierung der Liegenschaften (Reduktion des Wärmebedarfs, Umstellungen bei den Heizenergieträgern und Ausbau der PV-Kapazitäten) THG-Einsparungen in Höhe von $296 \text{ kt CO}_2\text{-Äq.}$ Da keine genauen Zahlen zur Entwicklung des spezifischen Heizenergiebedarfs und der PV-Installationen bayerischer Liegenschaften in den vergangenen Jahren vorliegen, wird

hier vereinfacht angenommen, dass in einer Trendentwicklung 15 % dieser THG-Einsparungen realisiert werden würden. Daraus folgt, dass die zusätzlichen – über die Trendentwicklung hinausgehenden – THG-Einsparungen **251 kt CO₂-Äq.** entsprechen.

Unter der Annahme, dass große Teile (rund 90 %) der THG-Einsparungen der verminderten Nutzung von Erdgaskraftwerken in anderen Bundesländern bzw. dem Ausland anfallen, aber 85 % der durch die Wärmeeinsparung erzielten Einsparungen innerhalb Bayerns realisiert werden, vermindern sich die THG-Emissionen in Bayern im Jahr 2030 um 170 kt CO₂-Äq.

Niedrige Abschätzung

In der niedrigen Abschätzung wird angenommen, dass der derzeitige Nutzenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser in den bayerischen Liegenschaften, die saniert werden, 140 kWh/m²_{NGF} pro Jahr beträgt und dass die Sanierungen im Durchschnitt den Verbrauch auf 70 kWh/m²_{NGF} reduzieren können. Bezüglich des Emissionsfaktors der Wärmebereitstellung wird in dieser niedrigen Abschätzung infolge der Sanierungen lediglich mit einer Minderung um 20 % gerechnet. Der Anteil der Liegenschaften, der bis 2030 saniert werden kann, wird (bezogen auf die Nettogrundfläche) mit 60 % angesetzt. Für das zusätzliche und bis 2030 realisierte PV-Potenzial auf den Dächern staatlicher Gebäude wird hier lediglich von 100 MW ausgegangen. Diese Potenzialschätzung gab das bayerischen Bauministerium im Jahr 2021 bekannt (Bayerischer Landtag 2021c). Unter sonst gleichen Annahmen können dann durch diese Maßnahme im Jahr 2030 (über die Trendentwicklung hinaus) **151 kt CO₂-Äq.** eingespart werden.

Hohe Abschätzung

In der hohen Abschätzung wird angenommen, dass der derzeitige Nutzenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser in den bayerischen Liegenschaften, die saniert werden, 160 kWh/m²_{NGF} beträgt und dass die Sanierungen im Durchschnitt den Verbrauch auf 50 kWh/m²_{NGF} reduzieren können. Bezüglich des Emissionsfaktors der Wärmebereitstellung wird in dieser hohen Abschätzung infolge der Sanierungen mit einer Minderung um 60 % gerechnet. Der Anteil der Liegenschaften, der bis 2030 saniert werden kann, wird (bezogen auf die Nettogrundfläche) mit 80 % angesetzt. Für das zusätzliche und bis 2030 realisierte PV-Potenzial auf den Dächern staatlicher Gebäude wird zudem in dieser hohen Abschätzung von 300 MW ausgegangen. Unter sonst gleichen Annahmen können dann durch diese Maßnahme im Jahr 2030 (über die Trendentwicklung hinaus) **358 kt CO₂-Äq.** eingespart werden.

3.5.3 Ambitionierte energetische Sanierung von Hochschulen

Tab. 3-29 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer ambitionierten energetischen Sanierung bayerischer Hochschulen bis 2030

	Niedrig	Mittel	Hoch
Grundfläche der Hochschulen in Bayern in Trägerschaft des Landes (in Mio. m ²)	4,4	4,4	4,4
Anteil der Hochschulen (bezogen auf die Grundfläche), der bis 2030 energetisch saniert wird	60 %	70 %	80 %
Derzeitiger durchschnittlicher spezifischer Heizenergieverbrauch der zu sanierenden Hochschulen (in kWh/m ² Grundfläche)	150	165	180
Durchschnittlicher spezifischer Heizenergieverbrauch der sanierten Hochschulen (nach erfolgten Sanierungen) (in kWh/m ² Grundfläche)	70	60	50
Minderung der spezifischen THG-Emissionen der Wärmebereitstellung durch Energieträgerwechsel nach der Sanierung	20 %	40 %	60 %
Durchschnittliches Potenzial der Leistung einer PV-Anlage auf einer Hochschule (in kW _p)	300	400	600
Gegenwärtig bereits realisierter Anteil des PV-Potenzials auf den bayerischen Hochschulen	20 %	10 %	5 %
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	49	78	111

Mittlere Abschätzung

Für die Abschätzung des THG-Minderungspotenzials dieser Maßnahme wird zunächst abgeschätzt, wie groß derzeit die Grundfläche der Hochschulen in staatlicher Trägerschaft in Bayern ist. Hierüber liegen nach unserer Kenntnis keine statistischen Daten vor. Folglich wird diese Fläche abgeschätzt, indem eine für Hochschulen typische Flächengröße pro Studentin und Student abgeleitet wird und diese Zahl mit der Anzahl der Studierenden in Bayern multipliziert wird. Auf Grundlage von Angaben mehrerer Universitäten in Deutschland (u. a. Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf 2014) wird von einer typischen Grundfläche von 12 m² pro Studentin und Student ausgegangen. Die Anzahl der Studierenden an den Hochschulen in Bayern, die in Trägerschaft des Landes sind, betrug im Wintersemester 2021/2022 knapp 368.000 (Bayerisches Landesamt für Statistik 2021c). Daraus folgt, dass für die Grundfläche der hier berücksichtigten bayerischen Hochschulen insgesamt etwa 4,4 Mio. m² zugrunde gelegt werden.

Es wird angenommen, dass bis 2030 70 % dieser Hochschulen (bezogen auf die Grundfläche) energetisch tiefgehend saniert werden können. Für die restlichen 30 % könnte eine (tiefgehende) energetische Sanierung nicht in Frage kommen, z. B. weil diese Hochschulen bereits kürzlich energetisch saniert wurden, erst in den vergangenen Jahren errichtet wurden oder aber dort aus Gründen des Denkmalschutzes höchstens moderate energetische Maßnahmen durchgeführt werden können.

Der derzeitige durchschnittliche Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser an den Hochschulen, die bis 2030 saniert werden, wird auf jährlich 180 kWh/m² (bezogen auf die Grundfläche) geschätzt. Der durchschnittliche Wert für Hochschulen in Deutschland liegt nach Kluttig et al. (2002) etwas höher –

nämlich bei knapp 230 kWh/m² für Universitäten und rund 190 kWh/m² für Fachhochschulen. Es wird hier davon ausgegangen, dass die durchschnittlichen Werte gegenwärtig – 20 Jahre nach Veröffentlichung der genannten Quelle – infolge von Neubau und Sanierungen niedriger liegen. Für die Verluste der Heizsysteme und der Verteilung werden hier durchschnittlich rund 10 % unterstellt, so dass sich aus dem endenergetischen Verbrauch von 180 kWh/m² pro Jahr ein Nutzenergieverbrauch von rund 165 kWh/m² pro Jahr ergibt.

Es wird zudem abgeschätzt, dass ambitionierte energetische Sanierungen den spezifischen Nutzenergiebedarf von Hochschulen für Raumwärme und Warmwasser im Durchschnitt auf 60 kWh/m²_{Grundfläche} senken könnten.

Die Energieträgerstruktur der Wärmebereitstellung der Hochschulen wird hier nicht explizit abgeschätzt. Stattdessen wird angenommen, dass die spezifischen THG-Emissionen gegenwärtig im Schnitt bei 220 g CO₂-Äq./kWh liegen. Da vorliegenden Informationen zufolge sehr viele Hochschulen in Deutschland entweder über Erdgas oder Fernwärme beheizt werden und für beide Energieträger ein spezifischer Emissionsfaktor – bezogen auf die Nutzenergie – in ähnlicher Höhe angesetzt wird, erscheint dies eine plausible Annahme zu sein.

Ferner wird angenommen, dass es infolge der energetischen Sanierungen der Hochschulen vielfach auch zu einem (teilweisen) Wechsel des Heizenergieträgers kommen wird und in der Folge häufiger Wärmepumpen, Holz, Solarthermie und (zunehmend auf erneuerbaren Energien beruhende) Nah- und Fernwärme eingesetzt werden. Es wird angenommen, dass daher die spezifischen THG-Emissionen einer bereitgestellten kWh Wärme infolge der Sanierungen um 40 % (gegenüber dem Zustand vor den Sanierungen), also auf rund 130 g CO₂-Äq./kWh sinken werden.

Durch die Reduktion des Heizwärmebedarfs sowie die teilweise Umstellung der verwendeten Heizenergieträger können – basierend auf den getroffenen Annahmen – im Jahr 2030 Emissionen in Höhe von 88 kt CO₂-Äq. vermieden werden.

Neben Maßnahmen zur Reduktion des Heizwärmebedarfs umfasst die hier beschriebene Maßnahme auch die Installation von PV-Anlagen an den Hochschulen – zumeist auf den Dächern. Hierfür wird angenommen, dass im Durchschnitt auf jeder Hochschule in Bayern eine PV-Anlage mit einer Leistung von 400 kW_p installiert werden kann. Bei den derzeit 34 Hochschulen in Trägerschaft des Freistaat Bayerns (Bayerisches Landesamt für Statistik 2021c) lässt sich eine PV-Potenzial von 13,6 MW_p ableiten. Es liegen nach unserem Wissen keine Daten zu den bislang installierten Kapazitäten auf bayerischen Hochschulen vor. Hier wird angenommen, dass bisher 10 % des Potenzials erschlossen wurden. Damit verbleibt ein erschließbares (und bis 2030 annahmegemäß vollständig erschlossenes) Potenzial von rund 12 MW_p.

Es werden zunächst für diese Anlagen Volllaststunden im Jahr 2030 in Höhe von 950 angenommen. Diese Volllaststunden werden für die hier vorgenommene Quantifizierung des THG-Einsparpotenzials um 10 % reduziert (855 Stunden), da für das Jahr 2030 in Bayern bei einem hier grundsätzlich angenommenen starken PV-Zubau mit gewissen energetischen Verlusten der PV-Stromerzeugung zu rechnen ist. Diese Verluste werden sich hauptsächlich in den Sommermonaten infolge von notwendigen Zwischenspeicherungen (v. a. in Batterien) und teilweise auch Abregelungen in besonders sonnenreichen Stunden ergeben (Koch et al. 2020). Unter diesen

Annahmen können im Jahr 2030 rund 10 GWh Strom aus den auf den Hochschulen neu errichteten PV-Anlagen erzeugt werden.

Unter der Annahme, dass dieser zusätzliche Strom 2030 zu einer geringeren Auslastung von Erdgaskraftwerken führt (s. Erläuterung in Kapitel 2), werden CO₂-Emissionen pro kWh in Höhe von 353 g vermieden. Hinzu kommen vermiedene Vorketten-Emissionen in Höhe von 45 g CO₂-Äq. pro kWh. Daraus folgen im Jahr 2030 geringere THG-Emissionen infolge des zusätzlichen PV-Stroms in Höhe von 4 kt CO₂-Äq.

In der Summe ergeben sich durch die energetische Sanierung der Hochschulen (Reduktion des Wärmebedarfs und Ausbau der PV-Kapazitäten) THG-Einsparungen in Höhe von 92 kt CO₂-Äq. Da keine genauen Zahlen zur Entwicklung des Heizenergiebedarfs und der PV-Installationen an bayerischen Hochschulen in den vergangenen Jahren vorliegen, wird hier vereinfacht angenommen, dass in einer Trendentwicklung 15 % dieser THG-Einsparungen realisiert werden würden. Daraus folgt, dass die zusätzlichen – über die Trendentwicklung hinausgehenden – THG-Einsparungen **78 kt CO₂-Äq.** entsprechen.

Unter der Annahme, dass große Teile (rund 90 %) der THG-Einsparungen der verminderten Nutzung von Erdgaskraftwerken in anderen Bundesländern bzw. dem Ausland anfallen, aber 85 % der durch die Wärmeeinsparung erzielten Einsparungen innerhalb Bayerns realisiert werden, vermindern sich die THG-Emissionen in Bayern im Jahr 2030 um 64 kt CO₂-Äq.

Niedrige Abschätzung

In der niedrigen Abschätzung wird angenommen, dass der derzeitige Nutzenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser in den Hochschulen, die saniert werden, 150 kWh/m²_{Grundfläche} beträgt und dass die Sanierungen im Durchschnitt den Verbrauch auf 70 kWh/m²_{Grundfläche} reduzieren können. Bezüglich des Emissionsfaktors der Wärmebereitstellung wird in dieser niedrigen Abschätzung infolge der Sanierungen lediglich mit einer Minderung um 20 % gerechnet. Der Anteil der Hochschulen, der bis 2030 saniert werden kann, wird mit 60 % angesetzt. Die durchschnittliche Größe der auf Hochschulen installierten PV-Anlagen wird auf 300 kWp geschätzt und es wird angenommen, dass 20 % dieses Potenzials gegenwärtig bereits genutzt werden. Unter sonst gleichen Annahmen können dann durch diese Maßnahme im Jahr 2030 (über die Trendentwicklung hinaus) **49 kt CO₂-Äq.** eingespart werden.

Hohe Abschätzung

In der hohen Abschätzung wird angenommen, dass der derzeitige Nutzenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser in den Hochschulen, die saniert werden, 180 kWh/m²_{Grundfläche} beträgt und dass die Sanierungen im Durchschnitt den Verbrauch auf 50 kWh/m²_{Grundfläche} reduzieren können. Bezüglich des Emissionsfaktors der Wärmebereitstellung wird in dieser hohen Abschätzung infolge der Sanierungen mit einer Minderung um 60 % gerechnet. Der Anteil der Schulen, der bis 2030 saniert werden kann, wird mit 80 % angesetzt. Die durchschnittliche Größe der auf Hochschulen installierten PV-Anlagen wird auf 600 kWp geschätzt und es wird angenommen, dass nur 5 % dieses Potenzials gegenwärtig bereits genutzt werden. Unter sonst gleichen Annahmen können dann durch diese Maßnahme im Jahr 2030 (über die Trendentwicklung hinaus) **111 kt CO₂-Äq.** eingespart werden.

3.5.4 Anschaffung von Elektro-Pkw für den staatlichen Fuhrpark

Tab. 3-30 Übersicht über zentrale Annahmen und ermittelte THG-Einsparpotenziale einer konsequenten Anschaffung von Elektro-Pkw für den staatlichen Fuhrpark

	Niedrig	Mittel	Hoch
Anzahl der Dienst-Pkw im Besitz des Freistaats Bayern im Jahr 2030	12.311	12.311	12.311
Durchschnittliche Fahrleistung der Dienst-Pkw des Freistaats Bayern im Jahr 2030 (in km)	9326	13.323	19.985
Anteil der Elektro-Pkw am Dienst-Pkw-Bestand des Freistaats Bayern im Jahr 2030	80 %	95 %	100 %
Durchschnittliche THG-Emissionen der Verbrenner-Pkw (inkl. PHEVs) im Bestand im Jahr 2030, inkl. Kraftstoff-Vorkette (in g CO ₂ -Äq./km)	150	182	200
Durchschnittlicher Stromverbrauch der Elektro-Pkw im Bestand im Jahr 2030, inkl. Ladeverlusten (in kWh/100 km)	22	20	18
Emissionseinsparungen im Jahr 2030 insgesamt, zusätzlich zum Trend (in kt CO₂-Äq.)	5	14	28

Mittlere Abschätzung

Für die Abschätzung des THG-Minderungspotenzials dieser Maßnahme wird zunächst die Anzahl der Dienst-Pkw im Besitz des Freistaats Bayerns betrachtet. Im September 2018 betrug die Anzahl dieser Pkw rund 12.300 (Bayerisches Staatsministerium für Finanzen und für Heimat 2019). Im Jahr 2020 wurden knapp 2.300 Dienst-Pkw durch den Freistaat Bayern neu beschafft (Bayerisches Staatsministerium für Finanzen und für Heimat 2021). Auf Grundlage dieser Zahlen wird angenommen, dass bis zum Jahr 2030 der komplette Bestand der Dienst-Pkw des Freistaats Bayern (der stark auf Leasing beruht) ausgetauscht werden wird. Zudem wird angenommen, dass die Anzahl der Pkw im Bestand bis 2030 auf dem Niveau von 2018 verbleibt. Mangels vorliegender spezifischer Daten wird angenommen, dass diese Pkw im Durchschnitt die gleiche Fahrleistung erbringen werden (rund 13.300 km pro Jahr) wie ein durchschnittlicher Pkw in Deutschland im Jahr 2020 (KBA 2021).

Der durchschnittliche Norm-CO₂-Ausstoß der 2018 neu angeschafften Dienst-Pkw des Freistaats Bayern betrug 120 g/km (Bayerisches Staatsministerium für Finanzen und für Heimat 2019). Da lediglich 2 % der vom Freistaat Bayern neu angeschafften Pkw im Jahr 2018 reine Elektro-Pkw waren, wird hier davon ausgegangen, dass dieser Wert ungefähr auch für reine Verbrenner sowie Plug-in-Hybride gilt³². Der tatsächliche CO₂-Ausstoß von neu zugelassenen Pkw lag 2016 nach DUH (2019) im Durchschnitt knapp 40 % höher als der Norm-CO₂-Ausstoß. Unter Berücksichtigung dieser höheren realen Emissionen, eines Aufschlags von 15 % für die Vorketten-Emissionen der fossilen Kraftstoffe (abgeleitet aus Memmler et al. 2017) und einer angenommenen Effizienzverbesserung von rund 10 % zwischen 2018 und 2030 wird

³² Für Letztere werden hier vereinfacht die gleichen THG-Emissionen angesetzt wie für reine Verbrenner-Autos, denn im realen Betrieb weisen sie (insbesondere bei Berücksichtigung auch der Emissionen der Stromerzeugung) ähnliche THG-Emissionen auf wie reine Verbrenner-Pkw (Jöhrens et al. 2020).

davon ausgegangen, dass reine Verbrenner-Pkw sowie Plug-in-Hybride im Bestand des Freistaats im Jahr 2030 pro km 182 g CO₂-Äq. THG-Emissionen verursachen.

Der durchschnittliche Stromverbrauch von Elektroautos im Jahr 2030 wird (inkl. der Ladeverluste) auf 20 kWh/100 km geschätzt. Unter der Annahme, dass dieser zusätzliche Strombedarf im Jahr 2030 zu einer höheren Auslastung von Erdgaskraftwerken führt (s. Erläuterung in Kapitel 2), werden CO₂-Emissionen pro kWh in Höhe von 353 g vermieden. Hinzu kommen vermiedene Vorketten-Emissionen in Höhe von 45 g CO₂-Äq. pro kWh.

Es wird hier unterstellt, dass es infolge der technischen Verbesserungen von Elektro-Pkw in den letzten Jahren, insbesondere die deutlich höheren Reichweiten, ab spätestens 2023 möglich sein wird, nahezu alle Neubeschaffungen von Dienst-Pkw des Freistaats Bayern in der Form von Elektro-Pkw durchzuführen und dass dadurch im Jahr 2030 der Pkw-Bestand des Freistaats zu 95 % aus Elektro-Pkw besteht. In diesem Fall würden diese Pkw unter den getroffenen Annahmen THG-Emissionen in Höhe von 14 kt CO₂-Äq. verursachen. Blicke hingegen der Anteil der Elektro-Pkw in allen Neuanschaffungen bis 2030 bei den knapp 3 % des Jahres 2020 (Bayerisches Staatsministerium für Finanzen und für Heimat 2021), so würden diese Pkw im Jahr 2030 gut 29 kt CO₂-Äq. verursachen.³³ Daraus folgt ein Einsparpotenzial dieser Maßnahme in Höhe von 16 kt CO₂-Äq.

In einer Trendentwicklung ist aber auch ohne zusätzliche politische Maßnahmen mit einem Anstieg der Neuanschaffung von Elektro-Pkw zu rechnen. Zwar war dieser Anstieg zwischen 2018 und 2020 gering (der Anteil an den gesamten Neubeschaffungen stieg von 2,1 auf 2,6 %), allerdings wird hier aufgrund der starken Dynamik im allgemeinen Pkw-Markt in Richtung Elektroautos (insbesondere seit dem Jahr 2020) angenommen, dass dieser Anstieg in den kommenden Jahren auch in einer Trendentwicklung an Dynamik gewinnen würde. Folglich wird hier unterstellt, dass im Jahr 2030 in einer Trendentwicklung 10 % des Dienst-Pkw-Bestands des Freistaats Bayern aus Elektroautos bestehen würde. Damit lägen die zusätzlich zur Trendentwicklung erwarteten THG-Einsparungen dieser Maßnahme bei **14 kt CO₂-Äq.**

Niedrige Abschätzung

In der niedrigen Abschätzung wird angenommen, dass die reinen Verbrenner-Pkw im Jahr 2030 pro km (real und inkl. Vorkettenemissionen der Kraftstoffe) 150 g CO₂-Äq. verursachen. Der angenommene durchschnittliche Stromverbrauch von elektrischen Pkw beträgt in dieser Abschätzung (inkl. Ladeverlusten) 22 kWh pro 100 km. Zudem wird angenommen, dass die Fahrleistung der Dienst-Pkw des Freistaats Bayern im Jahr 2030 nur 70 % der durchschnittlichen Fahrleistung aller Pkw in Deutschland im Jahr 2020 entspricht, nämlich rund 9.300 km. Schließlich wird in dieser niedrigen Abschätzung angenommen, dass es bis 2030 nur gelingt, den Anteil der Elektro-Pkw am Dienst-Pkw-Bestand des Freistaats Bayern auf 80 % zu erhöhen. Unter sonst gleichen Annahmen können die THG-Emissionen im Jahr 2030 durch diese Maßnahme – über die Trendentwicklung hinaus – dann um **5 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

³³ Die Emissionen lägen dann im Jahr 2030 ähnlich hoch wie sie hier für das Jahr 2020 abgeschätzt werden (31 kt CO₂-Äq.).

Hohe Abschätzung

In der hohen Abschätzung wird angenommen, dass die reinen Verbrenner-Pkw im Jahr 2030 pro km (real und inkl. Kraftstoff-Vorkettenemissionen) 200 g CO₂-Äq. verursachen. Der angenommene durchschnittliche Stromverbrauch von elektrischen Pkw beträgt in dieser Abschätzung (inkl. Ladeverlusten) 18 kWh pro 100 km. Zudem wird angenommen, dass die Fahrleistung der Dienst-Pkw des Freistaats Bayern im Jahr 2030 150 % der durchschnittlichen Fahrleistung aller Pkw in Deutschland im Jahr 2020 entspricht, nämlich rund 20.000 km. Schließlich wird in dieser hohen Abschätzung angenommen, dass es bis 2030 gelingt, den Anteil der Elektro-Pkw am Dienst-Pkw-Bestand des Freistaats Bayern auf 100 % zu erhöhen. Unter sonst gleichen Annahmen können die THG-Emissionen im Jahr 2030 durch diese Maßnahme – über die Trendentwicklung hinaus – dann um **28 kt CO₂-Äq.** reduziert werden.

4 Zusammenfassung und Einordnung der Einsparpotenziale

Dieses abschließende Kapitel liefert eine zusammenfassende Übersicht über die in Kapitel 3 abgeleiteten THG-Einsparpotenziale der 23 betrachteten Maßnahmen. Dabei werden zum einen die Einsparpotenziale der einzelnen Maßnahmen gegenübergestellt und zum anderen auch die Summe der durch alle Maßnahmen erzielbaren Einsparungen abgebildet. Schließlich wird auch abgeschätzt, wie stark der Erdgasbedarf bis zum Jahr 2030 durch die einzelnen Maßnahmen reduziert werden könnte.

Zunächst werden in den Abbildungen 4-1 bis 4-5 die THG-Einsparpotenziale der einzelnen Maßnahmen in den fünf unterschiedlichen Bereichen dargestellt. Gezeigt werden dabei jeweils die in dieser Studie im Mittelpunkt stehenden Gesamt-Netto-THG-Einsparungen, d. h. zum einen sind dort auch solche THG-Minderungen enthalten, die außerhalb Bayerns bilanziert werden würden, zum anderen sind die THG-Minderungen nicht enthalten, die im Bereich der jeweiligen Maßnahmen auch in einer Trendentwicklung erwartet werden.

Die Abbildungen zeigen anhand der blauen Balken die Spannweiten der erwarteten THG-Minderungen, die durch frühzeitige und erfolgreiche Umsetzungen der Maßnahmen im Jahr 2030 realisiert werden können. Die mittlere „best-guess“-Schätzung ist mit einem schwarzen Strich und der Angabe der im Jahr 2030 erwarteten THG-Minderung gekennzeichnet.

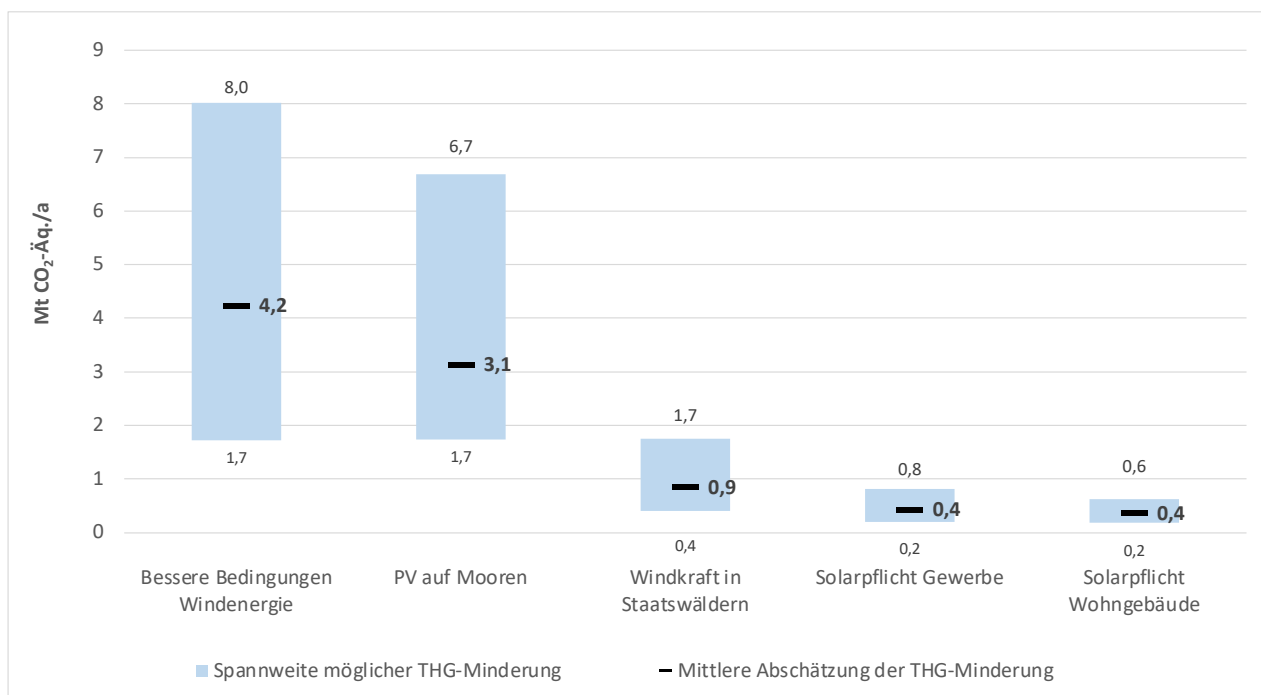


Abb. 4-1 Erwartete THG-Minderungen der untersuchten Maßnahmen im Bereich „Windenergie und Fotovoltaik“ im Jahr 2030 zusätzlich zu den Minderungen in einer Trendentwicklung (in Mt CO₂-Äq. pro Jahr)

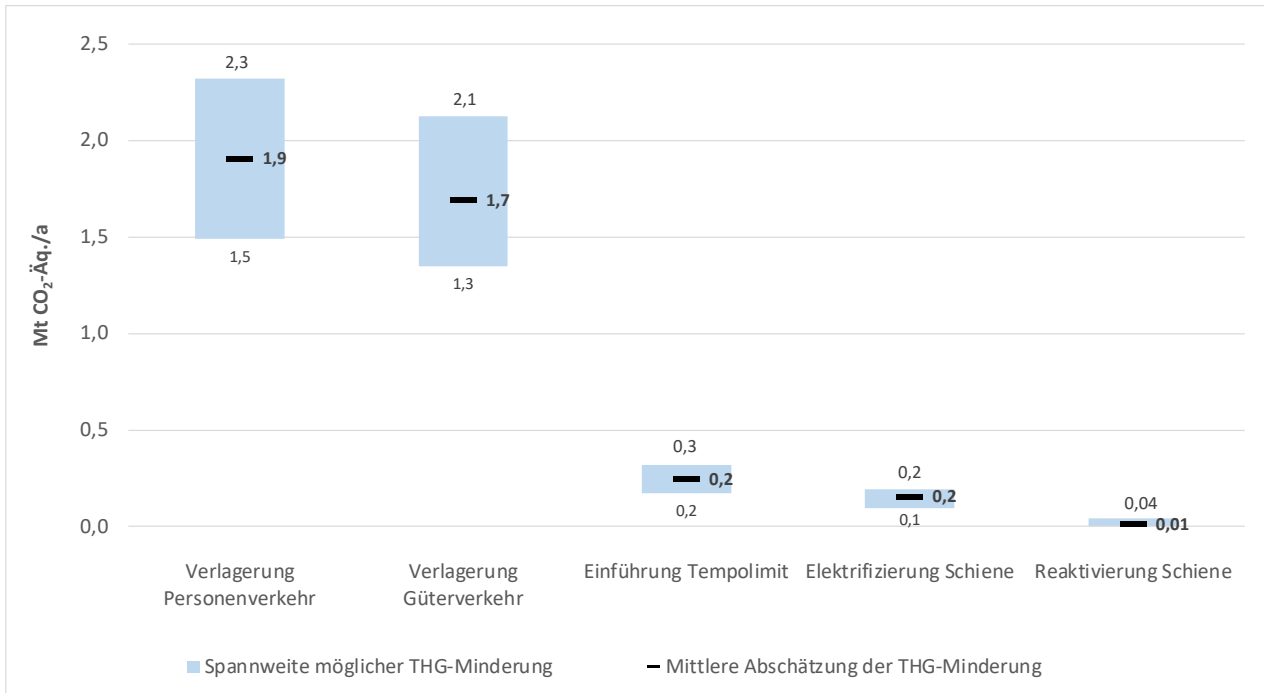


Abb. 4-2 Erwartete THG-Minderungen der untersuchten Maßnahmen im Bereich „Mobilität“ im Jahr 2030 zusätzlich zu den Minderungen in einer Trendentwicklung (in Mt CO₂-Äq. pro Jahr)

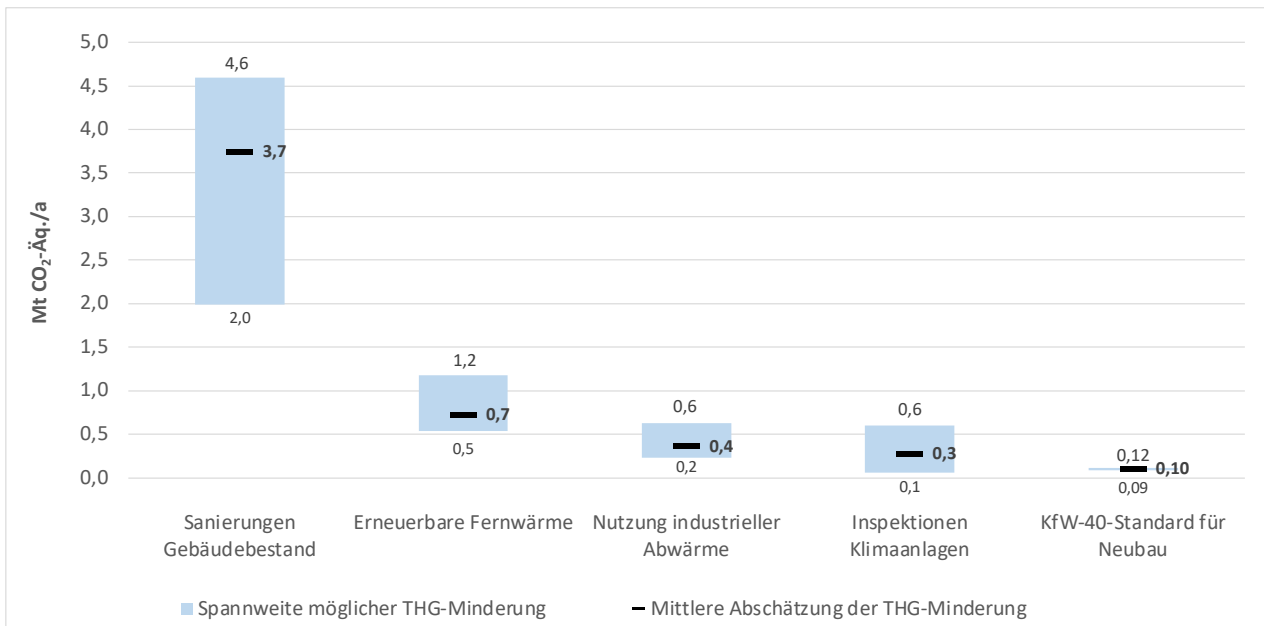


Abb. 4-3 Erwartete THG-Minderungen der untersuchten Maßnahmen im Bereich „Gebäudewärme und Effizienz“ im Jahr 2030 zusätzlich zu den Minderungen in einer Trendentwicklung (in Mt CO₂-Äq. pro Jahr)

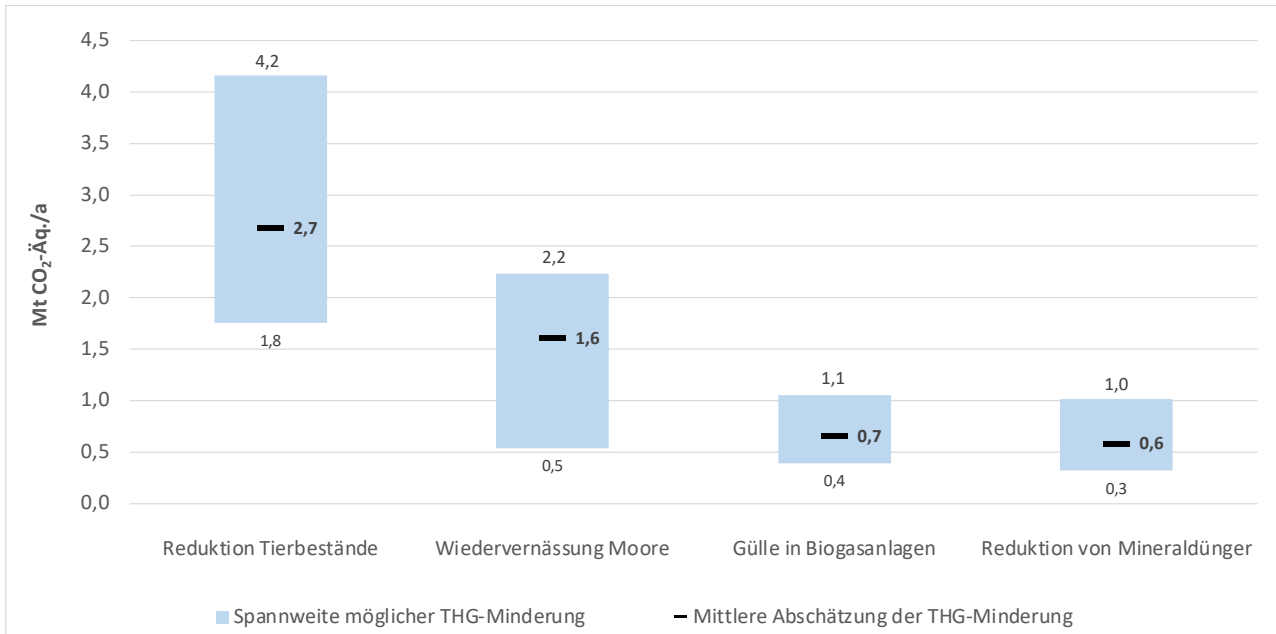


Abb. 4-4 Erwartete THG-Minderungen der untersuchten Maßnahmen im Bereich „Landwirtschaft und Landnutzung“ im Jahr 2030 zusätzlich zu den Minderungen in einer Trendentwicklung (in Mt CO₂-Äq. pro Jahr)

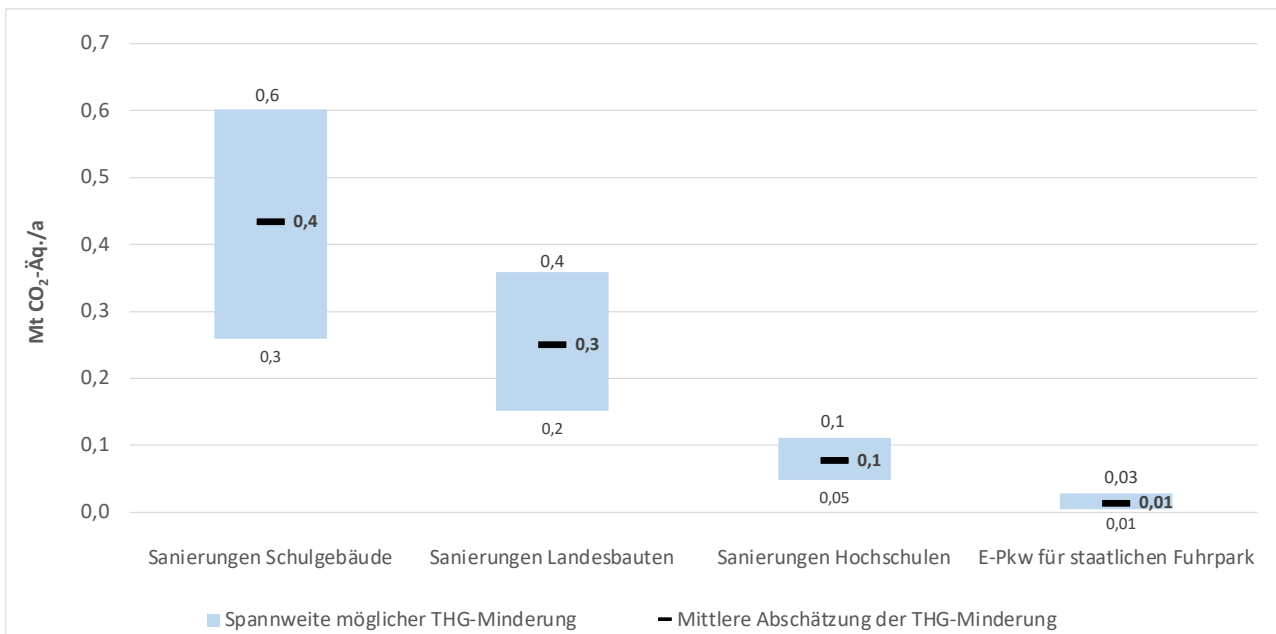


Abb. 4-5 Erwartete THG-Minderungen der untersuchten Maßnahmen im Bereich „Öffentliche Hand“ im Jahr 2030 zusätzlich zu den Minderungen in einer Trendentwicklung (in Mt CO₂-Äq. pro Jahr)

Die Abbildungen verdeutlichen, dass einige der untersuchten Maßnahmen besonders hohe Einsparpotenziale aufweisen. Die folgenden sieben Maßnahmen könnten den mittleren Schätzungen zufolge im Jahr 2030 die THG-Emissionen um jeweils deutlich über 1 Mt CO₂-Äq. reduzieren:

- Verbesserung der Rahmenbedingungen für die Windenergie (– 4,2 Mt)
- Energetische Sanierung des vermieteten Wohngebäudebestands (– 3,7 Mt)
- PV-Anlagen auf einem Teil der Anmoor- und Niedermoorflächen (– 3,1 Mt)
- Reduktion der Tierbestände (– 2,7 Mt)
- Verdopplung des ÖPNV und des Rad- und Fußverkehrsanteils (– 1,9 Mt)
- Steigerung des Schienen-Güterverkehrs auf einen Anteil von 40 % (– 1,7 Mt)
- Wiedervernässung der Moore (– 1,6 Mt)

Für die Minderung der energiebedingten Emissionen ist folglich ein Ausbau der Stromerzeugung aus Wind- und Fotovoltaik sowie eine ambitionierte energetische Gebäudesanierung von besonders hoher Relevanz. Aber auch Verlagerungen des Personen- und Güterverkehrs auf klimafreundlichere Verkehrsmittel können sehr bedeutende Emissionsreduktionen mit sich bringen. Im Bereich der Landwirtschaft und der Landnutzung liegen wiederum erhebliche Potenziale in einer Reduktion der Tierbestände sowie einer Wiedervernässung von Moorflächen.

Angesichts der Tatsache, dass zur Erreichung der Klimaschutzziele des Bundes und des Freistaats für das Jahr 2030 in den kommenden Jahren sehr weitgehende Emissionsreduktionen notwendig sein werden, sollten allerdings auch die Einsparpotenziale der weiteren hier betrachteten Maßnahmen nicht außer Acht gelassen werden. Zumal es oft spezifische Gründe gibt, die einzelne Maßnahmen mit mittleren oder auch relativ geringen THG-Einsparpotenzialen attraktiv machen können. Im Folgenden werden ein paar Beispiele genannt:

- Die im Bereich „Öffentliche Hand“ betrachteten Maßnahmen haben den Vorteil, dass sie infolge der direkten Zugriffsmöglichkeit durch den Freistaat bzw. die Kommunen bei entsprechendem politischem Willen relativ einfach umsetzbar sein können. Zudem können in diesem Bereich durch die Vorbildwirkung des Staates und die bei Schulen und Hochschulen mögliche Einbindung der Schüler*innen bzw. Studierenden indirekte positive Effekte für mehr Klimaschutz-Engagement in breiten Teilen der Gesellschaft auftreten.
- Die Einführung eines Tempolimits auf bayerischen Autobahnen könnte sehr kurzfristig bereits zu relevanten THG-Minderungen führen und könnte zudem die Unfall- und Todeszahl auf Autobahnen reduzieren.
- Die Reaktivierung von Schienenstrecken kann die Mobilität, und damit auch Lebenszufriedenheit von Menschen verbessern, die nicht über ein eigenes Auto verfügen. Zudem können durch die Streckenreaktivierungen die Anbindung und die Attraktivität der ländlichen Räume gesteigert werden.

Die folgende Abbildung 4-6 stellt die Summe der in der vorliegenden Studie berechneten THG-Minderungspotenziale dem Minderungsbedarf gegenüber, der zur Erreichung des Klimaschutzziels der bayerischen Staatsregierung für 2030 (65 % Minderung der THG-Emissionen gegenüber 1990) über die bis 2018 erreichten Emissionsminderungen hinaus noch realisiert werden muss. Dabei zeigt sich, dass die 23 hier betrachteten Maßnahmen in der mittleren Abschätzung und inkl. der in einer Trendentwicklung bereits erwarteten THG-Minderungen knapp die Hälfte (47 %) der benötigten Emissionsminderungen erbringen könnten.

Allerdings ist bei diesem Vergleich zu beachten, dass sich das bayerische Klimaziel auf Minderungen nach der Quellenbilanz bezieht, während die hier ausgewiesenen Minderungen der Maßnahmen nach dem Verursacherprinzip bestimmt wurden, also auch THG-Minderungen beinhalten, die statistisch außerhalb Bayerns erfasst werden. (Bei ähnlichen Klimaschutzmaßnahmen in anderen Bundesländern und europäischen Nachbarländern würden freilich auch von dort aus THG-Reduktionen ausgehen, die sich in der Quellenbilanz Bayerns in Form von Emissionsrückgängen manifestieren würden.)

Der Unterschied zwischen der Ermittlung des THG-Minderungspotenzials im Rahmen einer Verursacherbilanz und der entsprechenden Ermittlung im Rahmen einer Quellenbilanz wird für die einzelnen Maßnahmen im Anhang in Tabelle 5-2 verdeutlicht. Die großen Differenzen bei vielen der betrachteten Maßnahmen legen nahe, dass für eine ganzheitliche Bewertung landespolitischer Klimaschutzmaßnahmen eine Ausweisung der THG-Emissionen eines Bundeslandes in Form einer Verursacherbilanz (zusätzlich zu einer Quellenbilanz) von hoher Bedeutung ist.

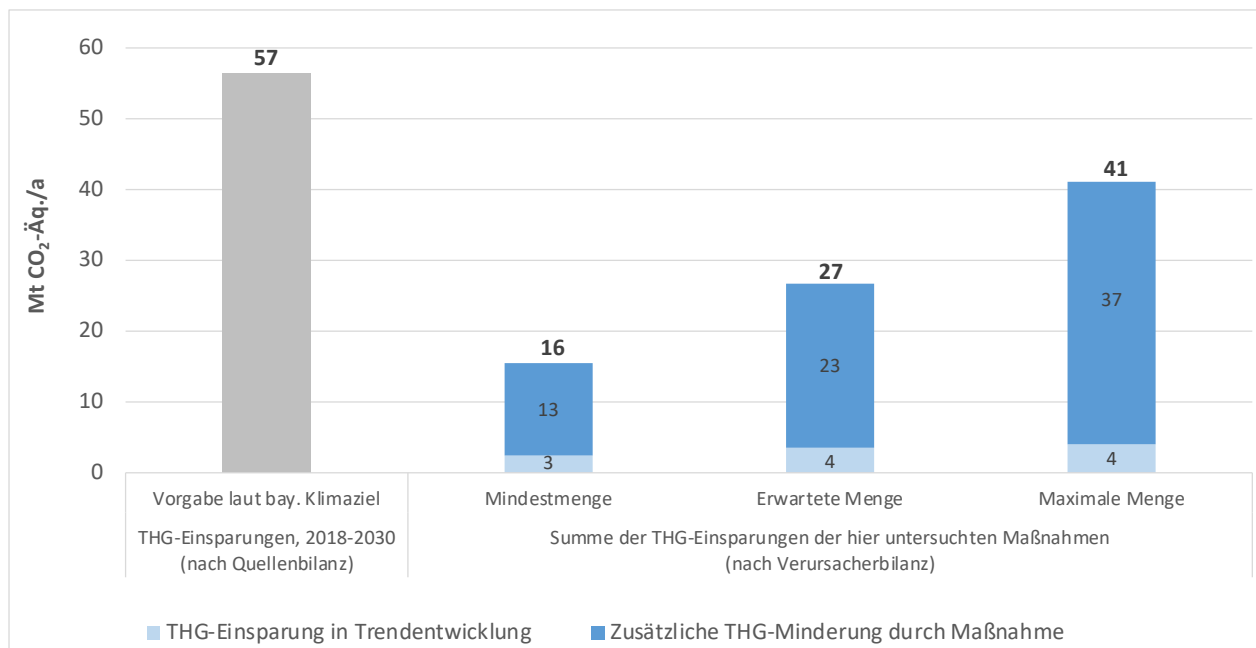


Abb. 4-6 Potenzielle THG-Minderungen im Jahr 2030 der untersuchten Maßnahmen im Vergleich zur notwendigen jährlichen THG-Einsparung zwischen 2018 und 2030 nach aktuellem bayerischen Klimaziel (in Mt CO₂-Äq. pro Jahr)

Hinweis: Zu beachten ist bei dieser Abbildung die eingeschränkte Vergleichbarkeit der dargestellten THG-Einsparungen: Die Vorgabe des bayerischen Klimaziels bezieht sich auf die THG-Emissionen nach Quellenbilanz, während die Maßnahmen-Einsparungen auf Grundlage einer Betrachtung der THG-Emissionen nach Verursacherbilanz berechnet wurden (s. auch Ausführungen hierzu im Text).

Bei der in Abbildung 4-6 sowie auch den Tabellen im Anhang vorgenommenen Aufsummierung der THG-Einsparungen der einzelnen Maßnahmen wurden Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen berücksichtigt und die THG-Einsparungen entsprechend angepasst, um Doppelzählungen zu vermeiden. So wurde angenommen, dass die Emissionsminderungen durch den Ausbau der Windenergie in Staatswäldern bereits vollständig in den Emissionseinsparungen durch Verbesserungen der Rahmenbedingungen für Windenergie enthalten sind. Gleiches gilt für die

Emissionsminderungen der Hochschulsanierungen, die annahmegemäß komplett in den Minderungen der Sanierungen der Landesbauten enthalten sind. Die THG-Minderungen durch das Tempolimit wurden infolge von Wechselwirkungen mit der Maßnahme der Verlagerung des Personenverkehrs genauso um 10 % reduziert wie die THG-Minderungen durch die Güllebehandlung aufgrund der Wechselwirkungen mit der Maßnahme einer über die Trendentwicklung hinausgehenden Reduktion des Tierbestands. Schließlich wurde bei den THG-Minderungen durch den Rückgang der Mineraldüngernutzung angenommen, dass 50 % dieser Minderungen bereits in den THG-Minderungen enthalten sind, die für die Reduktion der Tierbestände ermittelt wurden. Die Tatsache, dass die Emissionsminderungen der in der vorliegenden Arbeit untersuchten Maßnahmen alleine nicht ausreichen werden, um das Emissionsreduktionsziel Bayerns für 2030 zu erreichen, verdeutlicht, dass über diese Maßnahmen hinaus weitere Maßnahmen notwendig sein werden. Beispiele für Maßnahmen, die in der vorliegenden Studie nicht quantifiziert wurden, von denen aber bis 2030 relevante Emissionsminderungen in Bayern zu erwarten sind, sind folgende:

- Umstieg auf Elektroautos (über den staatlichen Fuhrpark hinaus)
- Energetische Gebäudesanierungen in den hier nicht betrachteten Gebäudesegmenten (v. a. Wohngebäude in Eigennutzung)
- Austausch von fossil betriebenen Heizungen in Bestandsgebäuden durch Wärmepumpen (über die energetisch sanierten Gebäude hinaus)
- Energieeffizienzverbesserungen und Elektrifizierung von Teilen des Wärmebedarfs in Industrie und Gewerbe

Aufgrund der infolge des russischen Angriffskriegs gegen die Ukraine ausgelösten Diskussionen um die hohe Abhängigkeit Deutschlands von russischen Energieträgerimporten, insbesondere von Erdgas, wird abschließend in der folgenden Tabelle 4-1 dargestellt, wie stark die einzelnen Maßnahmen zur Reduktion des Erdgasbedarfs bis zum Jahr 2030 beitragen könnten. Es werden dabei in der Tabelle nur die Netto-Einsparungen der Maßnahmen zugrunde gelegt, nicht zusätzliche Einsparungen, die sich annahmegemäß bereits in einer Trendentwicklung ergeben würden.

Tab. 4-1 Minderungen des Erdgasbedarfs im Jahr 2030 bei Umsetzung der Maßnahmen (basierend auf mittleren Abschätzungen; zusätzlich zur Trendentwicklung; Annahme von Erdgas-Grenzkraftwerk) (in TWh/a)

Maßnahmenbereich	Maßnahme	Erdgasminderung in TWh/a
Windenergie und Fotovoltaik	Bessere Rahmenbedingungen für Wind	18,7
	PV auf Mooren	13,9
	Windkraft in Staatswäldern	3,8
	Solarpflicht Gewerbe	2,1
	Solarpflicht Wohngebäude	1,8
	Mobilität	Verlagerung Personenverkehr
Verlagerung Güterverkehr		0,5
Einführung Tempolimit		0,1
Elektrifizierung Schiene		- 0,6
Reaktivierung Schiene		0
Gebäudewärme und Effizienz	Sanierungen Gebäudebestand	7,6
	Erneuerbare Fernwärme	1,7
	Nutzung industrieller Abwärme	0,9
	Inspektionen Klimaanlage	1,2
	KfW-40-Standard für Neubau	0,5
Landwirtschaft und Landnutzung	Reduktion Tierbestände	0
	Wiedervernässung von Mooren	0
	Gülle in Biogasanlagen	1,0
	Reduktion Mineraldünger	0,8
Öffentliche Hand	Sanierungen Schulgebäude	1,7
	Sanierungen Landesbauten	0,8
	Sanierungen Hochschulen	0,2
	E-Pkw für staatlichen Fuhrpark	- 0,05
SUMME (Wechselwirkungen berücksichtigt)		48,6

Hinweis: Negative Zahlen bedeuten, dass es bei diesen Maßnahmen infolge eines ausgelösten höheren Strombedarfs zu einem Erdgas-Mehrverbrauch kommt. (Da es bei diesen Maßnahmen gleichzeitig zu deutlichen Rückgängen fossiler (flüssiger) Kraftstoffe kommt, tragen sie dennoch zum Klimaschutz bei.)

Die Tabelle 4-1 zeigt, dass die hier beschriebenen Maßnahmen im Jahr 2030 zu Erdgaseinsparungen in Höhe von schätzungsweise knapp 49 TWh führen könnten. Dies entspricht 44 % des Erdgasverbrauchs in Bayern im Jahr 2020 (StMWi 2022). Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die abgeschätzten Minderungen des Erdgasverbrauchs überwiegend in anderen Bundesländern manifestieren würden, denn die Einsparungen erfolgen den hier getroffenen Annahmen zufolge größtenteils durch eine reduzierte Stromerzeugung in Erdgaskraftwerken, und dieser Effekt verteilt sich über ganz Deutschland. Bezogen auf den gesamtdeutschen Erdgasverbrauch des Jahres 2020 (873 TWh) können die hier beschriebenen bayerischen Maßnahmen bis 2030 zu jährlichen Einsparungen von knapp 6 % führen.

Die beiden Maßnahme mit dem größten Einspareffekt auf den Erdgasverbrauch im Jahr 2030 sind „Bessere Bedingungen für den Windenergieausbau“ (– 19 TWh) sowie „Installation von PV-Anlagen auf bayerischen Mooren“ (– 14 TWh). Eine verstärkte und fokussierte Sanierung des Gebäudebestandes folgt an dritter Stelle. Den hier getroffenen Annahmen zufolge könnten durch diese Maßnahme – als Summe der Sanierungen von vermieteten Wohngebäuden, von Schulgebäuden und von Landesbauten (inkl. Hochschulen) – bis 2030 jährlich gut 10 TWh Erdgas eingespart werden.

5 Anhang

Tab. 5-1 Vergleich der THG-Einsparungen der Maßnahmen (mittlere Abschätzung, zusätzlich zur Trendentwicklung) nach Methodik der Quantifizierung von erzeugtem oder eingespartem Strom (in Mt CO₂-Äq.)

		Quantifizierung von zusätzlich erzeugtem oder eingespartem Strom über...		Änderung (Strommix gegenüber Grenzkraftwerk)
		Erdgaskraftwerk als Grenzkraftwerk	Strommix 2030 (80 % Erneuerbare, 20 % Erdgas)	
Windenergie und Fotovoltaik	Bessere Bedingungen für Wind	4,2	0,8	- 80 %
	PV auf Mooren	3,1	0,6	- 80 %
	Windkraft in Staatswäldern	0,9	0,2	- 80 %
	Solarpflicht Gewerbe	0,4	0,1	- 80 %
	Solarpflicht Wohngebäude	0,4	0,1	- 80 %
Mobilität	Verlagerung Personenverkehr	1,9	2,5	+ 30 %
	Verlagerung Güterverkehr	1,7	1,6	- 6 %
	Einführung Tempolimit	0,24	0,22	- 10 %
	Elektrifizierung Schiene	0,2	0,3	+ 64 %
	Reaktivierung Schiene	0,01	0,01	- 2 %
Gebäude- wärme und Effizienz	Sanierungen Gebäudebestand	3,7	3,8	+ 2 %
	Erneuerbare Fernwärme	0,7	0,6	- 15 %
	Nutzung industrieller Abwärme	0,4	0,3	- 15 %
	Inspektionen Klimaanlage	0,3	0,2	- 38 %
	KfW-40-Standard für Neubau	0,11	0,08	- 32 %
Landwirtschaft und Landnutzung	Reduktion Tierbestände	2,7	2,7	0 %
	Wiedervernässung von Mooren	1,6	1,6	0 %
	Gülle in Biogasanlagen	0,7	0,5	- 24 %
	Reduktion Mineraldünger	0,6	0,6	0 %
Öffentliche Hand	Sanierungen Schulgebäude	0,4	0,3	- 14 %
	Sanierungen Landesbauten	0,3	0,2	- 14 %
	Sanierungen Hochschulen	0,1	0,1	+ 1 %
	E-Pkw für staatlichen Fuhrpark	0,01	0,02	+ 61 %
SUMME (Wechselwirkungen berücksichtigt)		23,2	16,8	- 28 %

Hinweis: Positive Zahlen bedeuten, dass es bei diesen Maßnahmen infolge eines ausgelösten höheren Strombedarfs zu einer höheren THG-Minderung kommen würde, wenn statt eines Erdgas-Grenzkraftwerks die Emissionen des für das Jahr 2030 angenommenen Strommixes herangezogen würden.

Tab. 5-2 Vergleich der THG-Einsparungen der Maßnahmen (mittlere Abschätzung, zusätzlich zur Trendentwicklung) zwischen Verursacherbilanz und Quellenbilanz, in Mt CO₂-Äq.

		Berechnung der Einsparung nach...		Änderung (Quellenbilanz gegenüber Verursacherbilanz)
		Verursacherbilanz	Quellenbilanz	
Windenergie und Fotovoltaik	Bessere Bedingungen für Wind	4,2	0,4	- 90 %
	PV auf Mooren	3,1	0,3	- 90 %
	Windkraft in Staatswäldern	0,9	0,1	- 90 %
	Solarpflicht Gewerbe	0,4	0,04	- 90 %
	Solarpflicht Wohngebäude	0,4	0,04	- 90 %
Mobilität	Verlagerung Personenverkehr	1,9	2,3	+ 21 %
	Verlagerung Güterverkehr	1,7	1,2	- 32 %
	Einführung Tempolimit	0,24	0,2	- 29 %
	Elektrifizierung Schiene	0,2	0,2	+ 37 %
	Reaktivierung Schiene	0,01	0,01	- 22 %
Gebäudewärme und Effizienz	Sanierungen Gebäudebestand	3,7	3,4	- 12 %
	Erneuerbare Fernwärme	0,7	0,5	- 30 %
	Nutzung industrieller Abwärme	0,4	0,3	- 29 %
	Inspektionen Klimaanlage	0,3	0,1	- 50 %
	KfW-40-Standard für Neubau	0,11	0,1	- 40 %
Landwirtschaft und Landnutzung	Reduktion Tierbestände	2,7	2,2	- 17 %
	Wiedervernässung von Mooren	1,6	1,6	0 %
	Gülle in Biogasanlagen	0,7	0,3	- 47 %
Öffentliche Hand	Reduktion Mineraldünger	0,6	0,4	- 30 %
	Sanierungen Schulgebäude	0,4	0,3	- 35 %
	Sanierungen Landesbauten	0,3	0,2	- 32 %
	Sanierungen Hochschulen	0,1	0,1	- 18 %
	E-Pkw für staatlichen Fuhrpark	0,01	0,02	- 25 %
SUMME (Wechselwirkungen berücksichtigt)		23,2	13,8	- 41 %

Tab. 5-3 Vergleich der THG-Einsparungen der Maßnahmen (mittlere Abschätzung) zwischen Nettoeinsparung (ohne Minderungen der Referenzentwicklung) und Bruttoeinsparung (inkl. Minderungen der Referenzentwicklung), in Mt CO₂-Äq.

		Hinzuzählen der Emissionsminderungen einer Referenzentwicklung?		Änderung (mit Hinzuzählen gegenüber ohne Hinzuzählen der Referenzentwicklung)
		Nein	Ja	
Windenergie und Fotovoltaik	Bessere Bedingungen für Wind	4,2	4,6	+ 8 %
	PV auf Mooren	3,1	3,5	+ 12 %
	Windkraft in Staatswäldern	0,9	0,9	0 %
	Solarpflicht Gewerbe	0,4	0,6	+ 27 %
	Solarpflicht Wohngebäude	0,4	0,4	+ 18 %
Mobilität	Verlagerung Personenverkehr	1,9	2,1	+ 11 %
	Verlagerung Güterverkehr	1,7	1,7	0 %
	Einführung Tempolimit	0,24	0,2	0 %
	Elektrifizierung Schiene	0,2	0,2	0 %
	Reaktivierung Schiene	0,01	0,01	0 %
Gebäudewärme und Effizienz	Sanierungen Gebäudebestand	3,7	4,6	+ 22 %
	Erneuerbare Fernwärme	0,7	0,9	+ 18 %
	Nutzung industrieller Abwärme	0,4	0,4	+ 18 %
	Inspektionen Klimaanlage	0,3	0,3	+ 11 %
	KfW-40-Standard für Neubau	0,11	0,1	+ 16 %
Landwirtschaft und Landnutzung	Reduktion Tierbestände	2,7	3,6	+ 33 %
	Wiedervernässung von Mooren	1,6	1,6	+ 1 %
	Gülle in Biogasanlagen	0,7	0,8	+ 23 %
	Reduktion Mineraldünger	0,6	0,8	+ 43 %
Öffentliche Hand	Sanierungen Schulgebäude	0,4	0,5	+ 18 %
	Sanierungen Landesbauten	0,25	0,30	+ 18 %
	Sanierungen Hochschulen	0,08	0,09	+ 18 %
	E-Pkw für staatlichen Fuhrpark	0,01	0,02	+ 9 %
SUMME (Wechselwirkungen berücksichtigt)		23,2	26,7	+ 15 %

6 Literaturverzeichnis

- AEE (2013): Bioenergie in den Bundesländern. Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (AEE). https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/235.AEE_Potenzialatlas_Bioenergie_Bayern_jan13.pdf
- Baumann, M.; Schuller, O. (2021): Emissionsfaktoren der Stromerzeugung - Betrachtung der Vorkettenemissionen von Erdgas und Steinkohle. No. 61/2021. Climate Change. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/cc_61-2021_emissionsfaktoren-stromerzeugung.pdf
- Bayerische Staatsforsten (2016): 2016 - Bayerische Staatsforsten Statistikband. Statistikband. Bayerische Staatsforsten AÖR. https://www.baysf.de/fileadmin/user_upload/BaySF_Statistikband_2016.pdf
- Bayerische Staatsforsten (2017): 2017 - Bayerische Staatsforsten Statistikband. Statistikband. Bayerische Staatsforsten AÖR. https://www.baysf.de/fileadmin/user_upload/07-publikationen/2017/BaySF_Statistikband_2017.pdf
- Bayerische Staatsforsten (2018): 2018 - Bayerische Staatsforsten Statistikband. Statistikband. Bayerische Staatsforsten AÖR. https://www.baysf.de/fileadmin/user_upload/07-publikationen/2018/BaySF_Statistikband_2018_akt.pdf
- Bayerische Staatsforsten (2019): 2019 - Bayerische Staatsforsten Statistikband. Statistikband. Bayerische Staatsforsten AÖR. https://www.baysf.de/fileadmin/user_upload/Bayerische_Staatsforsten_Statistikband_2019.pdf
- Bayerische Staatsforsten (2020): 2020 - Bayerische Staatsforsten Statistikband. Statistikband. Bayerische Staatsforsten AÖR. https://www.baysf.de/fileadmin/user_upload/Bayerische_Staatsforsten_Statistikband_2020_FINAL.pdf
- Bayerische Staatsforsten (2021): 2021 - Bayerische Staatsforsten Statistikband. Statistikband. Bayerische Staatsforsten AÖR. https://www.baysf.de/fileadmin/user_upload/BaySF_Statistikband_2021.pdf
- Bayerische Staatsregierung (o. J.): Energie-Atlas Bayern - Wind - Daten und Fakten. https://www.energieatlas.bayern.de/thema_wind/daten.html.
- Bayerischer Landtag (2020): Schriftliche Anfrage der Abgeordneten Martin Stümpfig, Ursula Sowa BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN vom 04.09.2020 - Energieverbrauch Liegenschaften – Energetische Sanierung des Gebäudebestandes. http://www1.bayern.landtag.de/www/ElanTextAblage_WP18/Drucksachen/Schriftliche%20Anfragen/18_0010208.pdf
- Bayerischer Landtag (2021a): Gesetzentwurf zum Schutz des Klimas und zur Anpassung an den Klimawandel im Freistaat Bayern – Bayerisches Klimagesetz (BayKlimaG). 18/16050. http://www1.bayern.landtag.de/www/ElanTextAblage_WP18/Drucksachen/Basisdrucksachen/0000010000/0000010344.pdf
- Bayerischer Landtag (2021b): Gesetzentwurf zur klimagerechten Modernisierung der Bereiche Wärmeversorgung und Gebäudeenergie (Bayerisches Wärmegesetz – BayWärmeG). 18/19043. https://www.martin-stuempfig.de/fileadmin/assets/Redaktion/PDFS/Downloads/2021/18-19043-Bayerisches_Waermege-setz_BayWaermeG.pdf
- Bayerischer Landtag (2021c): Anfragen zum Plenum (zur Plenarsitzung am 08.06.2021) mit den dazu eingegangenen Antworten der Staatsregierung Verzeichnis der Fragenden. https://www.bayern.landtag.de/ElanTextAblage_WP18/Drucksachen/Basisdrucksachen/0000010000/0000010494.docx

- Bayerischer Oberster Rechnungshof (2021): Beratende Äußerung zur Renaturierung von Mooren. https://www.orh.bayern.de/media/com_form2content/documents/c7/a908/f43/21-10-21%20Renaturierung%20von%20Mooren%20finale%20Fassung%20Internet%20mit%20Lesezeichen.pdf
- Bayerisches Landesamt für Statistik (2018): Viehbestände in Bayern 2018 - Viehzählung im Mai. Statistische Berichte. https://www.statistik.bayern.de/mam/produkte/veroeffentlichungen/statistische_berichte/c3122c_201800_63904.pdf
- Bayerisches Landesamt für Statistik (2019a): Bestand an Wohngebäuden und Wohnungen in Bayern. Statistische Berichte. https://www.statistik.bayern.de/mam/produkte/veroeffentlichungen/statistische_berichte/f2400c_201800.pdf
- Bayerisches Landesamt für Statistik (2019b): Viehbestände in Bayern 2019 - Viehzählung im Mai. Statistische Berichte. https://www.statistik.bayern.de/mam/produkte/veroeffentlichungen/statistische_berichte/c3122c_201900.pdf
- Bayerisches Landesamt für Statistik (2021a): Baufertigstellungen in Bayern 2020. Statistische Berichte. https://www.statistik.bayern.de/mam/produkte/veroeffentlichungen/statistische_berichte/c3122c_201900.pdf
- Bayerisches Landesamt für Statistik (2021b): XV. Verkehr und Dienstleistungen. Bayerisches Landesamt für Statistik. https://www.statistik.bayern.de/mam/produkte/jahrbuch/20_statistisches_jahrbuch_f%C3%BCr_bayern_2021_-_xv._verkehr_und_dienstleistungen__seite_329_.pdf
- Bayerisches Landesamt für Statistik (2021c): Studierende an den Hochschulen in Bayern - Wintersemester 2021/2022, Vorläufige Ergebnisse.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2021): Moorbodenkarte von Bayern im Maßstab 1:25.000 (MBK25) - LfU Bayern. <https://www.lfu.bayern.de/natur/moore/moorbodenkarte/index.htm>.
- Bayerischer Staatsminister für Wohnen, Bau und Verkehr (2022): Antwort auf die schriftliche Anfrage der Abgeordneten Martin Stümpfig und Dr. Sabine Weigand vom 15.02.2022 betreffend "Solarnutzung auf staatlichen Liegenschaften". https://www.martin-stuempfig.de/fileadmin/assets/Redaktion/PDFS/_Anfragen/22-03-14_SAN-Solaranlagen_staetliche_Liegen-schaften.pdf.
- Bayerisches Staatsministerium für Finanzen und für Heimat (2019): Schriftliche Anfrage des Herrn Abgeordneten Dr. Markus Büchler, MdL, vom 8. Januar 2019 betreffend „Dienstfahrzeuge des Freistaates Bayern“. https://www.gruene-fraktion-bayern.de/fileadmin/bayern/user_upload/download_dateien_2018/Anfragen_Antraege_Gutachten/2019/19-06-03_SAN-AW-Dienstfahrzeuge_des_Freistaates_Bayern.pdf
- Bayerisches Staatsministerium für Finanzen und für Heimat (2021): Analge zur Schriftlichen Anfrage des Herrn Abgeordneten markus Rinderspacher vom 29. Dezember 2020 betreffend Bayerns elektromobiler Fuhrpark 2020. <https://bayernspd-landtag.de/workspace/media/static/rinderspacher-979-f-anl-607e9fcdebe39.pdf>
- Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus (2021): Bayerns Schulen in Zahlen 2020/2021. München. https://www.km.bayern.de/download/4051_Bayerns_Schulen_in_Zahlen_2020-2021_Onlineausgabe.pdf

- Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr (2021): Bahnausbau Region München - Dialogforum Region Süd 2021. München. https://www.stmb.bayern.de/assets/stmi/vum/schiene/211217_dialogforum_s%C3%BCd_internet.pdf
- BCG (2021): Klimapfade 2.0 - Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. <https://web-assets.bcg.com/59/8a/77a561e04a33b1ea31fc1d76a749/klimapfade2-gesamtstudie-vorabversion-de.pdf>.
- BDEW (2022): Entwicklung der Beheizungsstruktur im Wohnungsneubau : 10-Jahre-Rückblick bis heute. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW). <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/entwicklung-beheizungsstruktur-wohnungsneubau/>.
- BfN (2010): Pressehintergrundinfo - Hintergrundpapier zu Mooren und deren Klimarelevanz (auch vor dem Hintergrund der Wald- und Moorbrände in Russland). Bundesamt für Naturschutz (BfN). https://biologischesvielfalt.bfn.de/fileadmin/NBS/documents/df_Presse2010_Hintergrund_Moore.pdf
- Blömer, S.; Görtz, C.; Pehnt, M.; Hering, D.; Ochse, S.; Hespeler, S.; et al. (2019): EnEff:Wärme - netzgebundene Nutzung industrieller Abwärme (NENIA). Schlussbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. IFEU-Institute / Wuppertal Institute / Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU). https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Schlussbericht_EnEffW%C3%A4rme-NENIA.pdf
- BMDV (2021): BMDV - Mit der Elektrobahn klimaschonend in die Zukunft – Das Bahn-Elektrifizierungsprogramm des Bundes. Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV). <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/schiene-aktuell/elektrobahn-klimaschonend-zukunft-bahn-elektrifizierungsprogramm.html>.
- BMEL (2018): Tierhaltung muss klimafreundlicher werden. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). <https://www.bmel.de/SharedDocs/Interviews/DE/2018/2018-11-19-RheinischePost.html>.
- BMEL (2022a): BMEL-Statistik: Fleisch - Versorgung mit Fleisch und Geflügelfleisch Fleischbilanz 2020 vorläufig. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). <https://www.bmel-statistik.de/ernaehrung-fischerei/versorgungsbilanzen/fleisch>.
- BMEL (2022b): BMEL-Statistik: Futtermittel - Vorläufiges Futteraufkommen im Wirtschaftsjahr 2019/20. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/tierhaltung/futtermittel/>.
- BMWi (2020): Langfristige Renovierungsstrategie der Bundesregierung. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/J-L/langfristige-renovierungsstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- BMWK (2022): Eröffnungsbilanz Klimaschutz - Kernaussagen. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111_eroeffnungsbilanz_klimaschutz.pdf?__blob=publicationFile&v=22
- bpb (2020): Bevölkerung nach Bundesländern. Bundeszentrale für politische Bildung (bpb). <https://www.bpb.de/kurz-knapp/zahlen-und-fakten/soziale-situation-in-deutschland/61535/bevoelkerung-nach-bundeslaendern/>.

- Bundesnetzagentur (2021): Kraftwerksliste Bundesnetzagentur (bundesweit; alle Netz- und Umspannebenen) Stand 15.11.2021. https://www.google.com/url?q=https://www.bundesnetzagentur.de/Shared-Docs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/Kraftwerksliste_2021.xlsx?__blob%3Dpublication-File%26v%3D9&sa=D&source=editors&ust=1647439390781769&usg=AOvVaw3C9b9rg8HGHkVxdum3QLrj
- Bundesverband Geothermie (2022): Hydrothermale Geothermie. Bundesverband Geothermie e. V. <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/h/hydrothermale-geothermie.html>.
- BWE (2022): Zahlen und Fakten. Bundesverband WindEnergie e.V. <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/>.
- Corrado, S.; Luzzani, G.; Trevisan, M.; Lamastra, L. (2019): Contribution of different life cycle stages to the greenhouse gas emissions associated with three balanced dietary patterns. *Science of The Total Environment* 660622–630. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.267.
- de Vries, M.; de Boer, I.J.M. (2010): Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science* 128, 1-11. doi: 10.1016/j.livsci.2009.11.007.
- dena (2021): dena-Gebäudereport 2021 - Fokusthemen zum Klimaschutz im Gebäudereich. Deutsche Energie - Agentur GmbH. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/dena-GEBAEUDEREPORT_2021_Fokusthemen_zum_Klimaschutz_im_Gebaeudebereich.pdf
- DEPI (2018): DEPI-Informationsblatt - Emissionsfaktoren Wärmebereitstellung. Deutsches Pelletinstitut (DEPI). <https://depv.de/assets/fd6abafe-6d1f-4805-a1e4-86ace2a4dc4d>
- Destatis (2020): Bautätigkeit und Wohnungen (2019). Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Bautaetigkeit/bautaetigkeit-2050100197004.pdf?__blob=publicationFile
- Destatis (2021a): Verkehr- Eisenbahnverkehr - Betriebsdaten des Schienenverkehrs (2020). Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Unternehmen-Infrastruktur-Fahrzeugbestand/Publikationen/Downloads-Betriebsdaten-Schienenverkehr/betriebsdaten-schienenverkehr-2080210207004.pdf;jsessionid=150ECFCB94B766BA80165E334ECD9F23.live721?__blob=publication-File
- Destatis (2021b): Niedrigster Schweinebestand in Deutschland seit 25 Jahren. Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/12/PD21_596_413.html.
- Destatis (2021c): Landwirtschaftliche Betriebe insgesamt und Betriebe mit ökologischem Landbau nach Bundesländern. Statistisches Bundesamt. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Landwirtschaftliche-Betriebe/Tabellen/oe-kologischer-landbau-bundeslaender.html>.
- Destatis (2021d): Produzierendes Gewerbe - Düngemittelversorgung (2020/2021). Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/Publikationen/Downloads-Fachstatistiken/duengemittelversorgung-jahr-2040820217004.pdf?__blob=publicationFile

- Destatis (2022): Land und Forstwirtschaft, Fischerei, Viehbestand (2021). https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Tiere-Tierische-Erzeugung/Publikationen/Downloads-Tiere-und-tierische-Erzeugung/viehbestand-2030410215324.pdf?__blob=publicationFile
- Destatis (o. J.): Viehbestände nach den Erhebungen zum 1. März 2020. <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/MBT-0117290-0000.xlsx>
- DGE (2017): Vollwertig essen und trinken nach den 10 Regeln der DGE. Deutsche Gesellschaft für Volwertige Ernährung e. V. <https://www.dge.de/fileadmin/public/doc/fm/10-Regeln-der-DGE.pdf>
- Diedrich, A. (2018): Energetische Sanierung von Bildungsstätten – Entwicklung von kostenoptimierten Sanierungsmaßnahmen. Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Abgerufen von URL: https://www.reiner-lemoine-stiftung.de/en/pdf/dissertationen/Dissertation-Arne_Diedrich.pdf
- DUH (2019): Ehrliche Spritverbrauchsangaben bei Pkw Für Verbraucherrechte und Klimaschutz. Deutsche Umwelthilfe (DUH). https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Verkehr/Get_Real/GetReal_Hintergrundpapier_dt_2019.pdf
- DUH (2020): Grüne Fernwärme - Klimafreundliche Alternativen zu Kohle und Erdgas. Positionspapier. Deutsche Umwelthilfe (DUH). https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energiewende/201026_DUH_Positionspapier_Gruene-Fernwaerme.pdf
- DWD (o. J.): Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Leistungen - Globalstrahlung (mittlere 30-jährige Monats- und Jahressummen). Deutscher Wetterdienst (DWD). https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/strahlungskarten_mv.html
- Eberhart et al. (2019): Ökobilanz von Elektro- und fossilen Lkw. <http://esu-services.ch/fileadmin/download/eberhart-2019-poster-Elektro-Lkw.pdf>
- Eggers, J.-B.; Behnisch, M.; Eisenlohr, J.; Poglitsch, H.; Phung, W.-F.; Münzinger, M.; Ferrara, C.; Kuhn, T. E. (2020): 35. PV-Symposium - 01./02. September 2020 - PV-Ausbauerfordernisse versus Gebäudepotenzial: Ergebnis einer gebäudescharfen Analyse für ganz Deutschland. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/conference-paper/PV-Potenzial-gebäude-scharf.pdf>
- Fertilizers Europe (o. J.): Carbon Footprint Reference Values - Energy efficiency and greenhouse gas emissions. https://www.researchgate.net/profile/Prem_Baboo/post/Can_anybody_suggest_CED_and_a_CO2-eq_emission_factors_for_Vinasse_fertilizer/attachment/59d634dc79197b80779927e4/AS%3A381587746246658%401467989016955/download/carbon_footprint_web_V4.pdf
- Fraunhofer IBP (2013): Eneff:Schule - Energieeffiziente Schulen. <https://eneffschule.de/>
- Fraunhofer ISE (2021): Neues Strommarktdesign - Studie - Neues Strommarktdesign für die Integration fluktuierender Erneuerbarer Energien. http://klima-neutrales-stromsystem.de/pdf/Strommarktdesignstudie_BEE_financial_Stand_14_12_2021.pdf
- Fraunhofer ISE (2022): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer ISE. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>

- Fraunhofer ISI; PTV (2017): Verlagerungswirkung bei einer Reaktivierung stillgelegter Schienenstrecken. Schlussbericht. Karlsruhe: PTV Planung Transport Verkehr AG.
- Fraunhofer IWES (2012): Vorstudie zur Integration großer Anteile Photovoltaik in die elektrische Energieversorgung - Studie im Auftrag des BSW - Bundesverband Solarwirtschaft e.V., Ergänzte Fassung vom 29.05.2012. Kassel. https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/IWES_Netzintegration_lang.pdf
- Fritsche, U. R.; Rausch, L. (2008): Bestimmung spezifischer TreibhausgasEmissionsfaktoren für Fernwärme. No. 08/08. Climate Change. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3476.pdf>
- Ganz, K.; Freiburger, L. (2021): PV auf Bayerischen Schulen - Eine Kurzstudie im Auftrag der Landtagsfraktion Bündnis 90 / die Grünen -Version 2. Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH. https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2021/03/20210316_Schul-PV_Version2.pdf
- Göke, L.; Kemfert, C.; Kendziorowski, M.; von Hirschhausen, C. (2021): 100 Prozent erneuerbare Energien für Deutschland: Koordinierte Ausbauplanung notwendig. https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.821870.de/21-29-1.pdf
- Hauschild, M.; Weckenbrock, P.; Gattinger, A. (2021): Ökolandbau - besser für das Klima? - Über Landwirtschaft in Zeiten des Klimawandels und die Potenziale der Ökologischen Landwirtschaft. In: Schneider, M; Fink-Kessel, A.; Stodieck, F. (Hrsg.): Der kritische Agrarbericht 2021.
- Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (2014): Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf - Ein Campus. Fünf Fakultäten. Tausend Möglichkeiten. Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. https://www.hhu.de/fileadmin/studiengaenge/HHU_Image_D_07032014-web_1__01.pdf
- Icha, P. (2021): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2020. No. 45/2021. Climate Change. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-26_cc-45-2021_strommix_2021_0.pdf
- Industrieverband Agrar (2020): Wichtige Zahlen - Düngemittel, Produktion, Markt, Landwirtschaft (2019 - 2020). https://www.iva.de/sites/default/files/benutzer/%25uid/publikationen/wichtige_zahlen_2019_2020.pdf
- IWU (2018): Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016 - Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU). https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2018_IWU_CischinskyEtDiefenbach_Datenerhebung-Wohngeb%C3%A4udebestand-2016.pdf
- Jöhrens, J.; Räder, D.; Kräck, J.; Lucien, M.; Blanck, R.; Kasten, P. (2020): Plug-in hybrid electric cars: Market development, technical analysis and CO₂ emission scenarios for Germany. Heidelberg / Brussels / Berlin: ifeu - Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg Germany. <https://www.oeko.de/uploads/oeko/oekodoc/PHEV-Report-Market-Technology-CO2.pdf>

- KBA (2021): Inländerfahrleistung - Inländerfahrleistung. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/2020/2020_vk_kurzbericht.html?nn=3517388&fromStatistic=3517388&yearFilter=2020&fromStatistic=3517388&yearFilter=2020.
- Kiefer, L.R.; Menzel, F.; Bahrs, E. (2015): Integration of ecosystem services into the carbon footprint of milk of South German dairy farms. *Journal of Environmental Management* 152, 11-18. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.01.017.
- Kluttig, H.; Erhorn, H.; de Boer, J. (2002): Energieverbräuche von Bildungsgebäuden. IBP-Mitteilung No. 413. Fraunhofer-Institut für Bauphysik. <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/ibpmitteilungen/401-450/413.pdf>
- Koch, M.; Palacios, S.; Timpe, C. (2020): Betrachtungen zum Klimaschutz und zur Versorgungssicherheit der Bayerischen Stromversorgung im Jahr 2035 - Gutachten im Auftrag der Fraktion Bündnis 90/Die Grünen im bayerischen Landtag. Freiburg: Öko-Institut e.V. https://www.gruene-fraktion-bayern.de/fileadmin/bayern/user_upload/download_dateien_2018/Pressekonferenzen/2020-11-30_Gutachten_Klimaschutz_und_Versorgungssicherheit_der_Bayerischen_Stromversorgung_2035.pdf
- Lange, M. (2020): Klimaschutz durch Tempolimit - Wirkung eines generellen Tempolimits auf Bundesautobahnen auf die Treibhausgasemissionen. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-15_texte_38-2020_wirkung-tempolimit_bf.pdf
- LiKi (2021): LIKI Indikatoren - LANUV NRW. LiKi - Länderinitiative Kernindikatoren. <https://indikatoren-lanuv-2.nrw.de/liki/index.php?mode=indi&indikator=5#grafik>.
- Majer, S.; Kornatz, P.; Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N.; Brosowski, A.; Oehmichen, K.; Liebetrau, J. (2019): Stand und Perspektiven der Biogaserzeugung aus Gülle. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum. https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Broschueren/Broschuere_Peggie.pdf
- Memmler, M.; Lauf, T.; Wolf, K.; Schneider, S. (2017): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2016. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-10-26_climate-change_23-2017_emissionsbilanz-ee-2016.pdf
- Miehling, S.; Schweiger, B.; Wedel, W.; Hanel, A.; Spliethoff, H. (2021): 100 % erneuerbare Energien für Bayern. Potenziale und Strukturen einer Vollversorgung in den Sektoren Strom, Wärme und Mobilität. Garching bei München. https://www.mw.tum.de/fileadmin/woobtx/es/pictures/Projekte/Systemstudien/100-_-erneuerbare-Energien-fuer-Bayern_TUM_ZAE_2021.pdf
- Nobis, C. (2019): Mobilität in Deutschland – MiD Analysen zum Radverkehr und Fußverkehr. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH. http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Analyse_zum_Rad_und_Fussverkehr.pdf
- Öko-Institut (2021): Viel mehr Förderanträge für Energieeffizienz in Gebäuden 2020: Gut fürs Klima? #klimafreundlichWohnen. Öko-Institut e.V.: Blog. <https://blog.oeko.de/viel-mehr-foerderantraege-fuer-energieeffizienz-in-gebaeuden-2020-gut-fuers-klima/>.

- Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045.
- PTV (2020): Potenzialanalyse zur Reaktivierung von Schienenstrecken in Baden-Württemberg - Vergleichende relationsbezogene Ermittlung des Fahrgastpotenzials. PTV Transport Consult GmbH. https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/PDF/PM_Anhang/Potenzialanalyse_PTV_Bericht_01.pdf
- PTV Planung Transport Verkehr AG (2016): Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030. PTV Planung Transport Verkehr AG. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/BVWP/bvwp-methodenhandbuch.pdf?__blob=publicationFile
- Pulkkinen, H.; Joensuu, K.; Hietala, S. (2018): Including soil carbon and land use changes to comparison of carbon footprints of beef production systems. Natural Resources Institute Finland (Luke) 1. <https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/543146/posteri%20pdf.pdf?sequence=2>
- Rehfeldt, K.; Kruse, D. (2020): Volllaststunden von Windenergieanlagen an Land. Varel: WindGuard. <https://www.lee-nrw.de/data/documents/2020/11/23/532-5fbb61e5e6bb2.pdf>
- Scheffler, M.; Wiegmann, K. (2021): Landwirtschaft auf dem Weg zum Klimaziel - Maßnahmen für Klimaneutralität bis 2045. Öko-Institut e.V. https://greenwire.greenpeace.de/system/files/2021-10/studie_klimaneutralitaet_2045_landwirtschaft_30_10_2021.pdf
- Schiller, H.; Mai, R.; Händel, C. (2014): Chancen der Energetischen Inspektion für Gesetzgeber, Anlagenbetreiber und die Branche. Fraunhofer IRB Verlag. <https://www.irbnet.de/daten/rswb/14019025698.pdf>
- Schmied, M.; Knörr, W. (2011): Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik. DSLV Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V. <http://www.co2-sachverstaendiger.de/pdf/DSLV-Leitfaden%20Berechnung%20von%20THG-Emissionen%20in%20Spedition%20und%20Logistik.pdf>
- Stede, J.; May, N. (2019): Strikte Mindestabstände bremsen den Ausbau der Windenergie. DIW Wochenbericht. DIW - Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. doi: 10.18723/DIW_WB:2019-48-4.
- StMELF (2020): Bayerischer Agrarbericht (2020) - Ernährungssouveränität. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF). <https://www.agrarbericht.bayern.de/landwirtschaft-laendliche-entwicklung/ernaehrungssouveraenitaet.html>.
- StMWi (2021): Aiwanger: „300 potenzielle Standorte mit jeweils mehreren Windrädern im Wald“. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (StMWi). <https://www.stmwi.bayern.de/presse/presse-meldungen/presse-meldung/222-2021/>.
- Storch, L. (2021a): Kaniber gegen Aiwanger bei Windrädern im Staatswald. BR24. <https://www.br.de/nachrichten/bayern/kaniber-gegen-aiwanger-bei-windraedern-im-staatswald,SmsDZzB>.
- Storch, L. (2021b): Bahn-Reaktivierungen: Wo in Bayern wieder Züge fahren könnten. BR24. <https://www.br.de/nachrichten/bayern/bahn-reaktivierungen-wo-in-bayern-wieder-zuege-fahren-koennten,SdtkSur>.

- Thamling, N.; Wunsch, M.; Seefeldt, F. (2010): Untersuchung eines Instruments zur weiteren Anreizung von Aktivitäten zur Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudebestand. No. FKZ 03KSW016A und B. Berlin: Prognos AG. http://www.ifeu.de/energie/pdf/NKI_Zwischenbericht_Anlage4_Gebaeudefoerderung.pdf.
- Thünen-Institut (o. J.): Thünen-Institut: Treibhausgas-Emissionen aus der Landwirtschaft. Johann Heinrich von Thünen-Institut. <https://www.thuenen.de/de/thema/klima-und-luft/emissionsinventare-buchhaltung-fuer-den-klimaschutz/treibhausgas-emissionen-aus-der-landwirtschaft/>.
- Tiemeyer, B.; Bechtold, M.; Belting, S.; Freibauer, A.; Förster, C.; Schubert, E.; et al. (2017): Moorschutz in Deutschland - Optimierung des Moormanagements in Hinblick auf den Schtz der Biodiversität und der Ökosystemleistungen. Bundesamt für Naturschutz. https://www.moorschutz-deutschland.de/fileadmin/moorschutz/_projekt/BfN-Skript_462_Moorschutz_internet.pdf
- UBA (2019): Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus. Abschlussbericht No. 132/2019. Umweltbundesamt. http://digital.bib-bvb.de/webclient/DeliveryManager?custom_att_2=simple_viewer&pid=17447232
- UBA (2020): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen. Umweltbundesamt (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2020_12_08_em_entwicklung_in_d_trendtabelle_thg_v0.9.xlsx
- UBA (2021a): Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs im Personenverkehr. Umweltbundesamt (UBA). Image, Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/bild/entwicklung-des-spezifischen-energieverbrauchs-im-o>.
- UBA (2021b): Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr. <https://www.umweltbundesamt.de/bild/vergleich-der-durchschnittlichen-emissionen-o>.
- Weiss, F.; Leip, A. (2012): Greenhouse gas emissions from the EU livestock sector: A life cycle assessment carried out with the CAPRI model. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 149124–134. doi: 10.1016/j.agee.2011.12.015.