

CLIMATE CHANGE

63/2025

Kurzbericht

Woran messen wir Treibhausgasreduktionen von Energiepfaden?

**Analysen zu Treibhausgas-Referenzsystemen bei einer
voranschreitenden Transformation des Energiesystems
am Beispiel der Biomasse**

von:

Dr. Klaus Hennenberg, Prof. Dr. Dierk Bauknecht
Öko-Institut, Darmstadt

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 63/2025

KLIFOPLAN

Forschungskennzahl 3722 43 501 0

FB001872

Kurzbericht

Woran messen wir Treibhausgasreduktionen von Energiepfaden?

Analysen zu Treibhausgas-Referenzsystemen bei einer voranschreitenden Transformation des Energiesystems am Beispiel der Biomasse

von

Dr. Klaus Hennenberg, Prof. Dr. Dierk Bauknecht
Öko-Institut, Darmstadt

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Öko-Institut
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt

Abschlussdatum:

August 2025

Redaktion:

Fachgebiet V 1.3 Erneuerbare Energien
Jan Seven, Katja Hofmeier

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8050>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Oktober 2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Kurzbeschreibung: Woran messen wir Treibhausgasreduktionen von Energiepfaden?

Vergleichende Treibhausgasbilanzen (THG-Bilanzen) ermöglichen eine informierte Entscheidung, welche Energieträger in Zukunft bevorzugt eingesetzt werden sollten, um zur Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 beizutragen. Vergleichende THG-Bilanzen werden z. B. in der Erneuerbaren Energien-Richtlinie der EU eingesetzt, um festzustellen, wie stark Bioenergieträger die THG-Emissionen gegenüber fossilen Energieträgern mindern. Die fossilen Energieträger stellen das sogenannte Referenzsystem für diesen Vergleich dar. Mit zunehmender Verbreitung erneuerbarer Energien erscheint diese Wahl des Referenzsystems aber als weniger angemessen. Dieser Kurzbericht untersucht daher am Beispiel von Bioenergiepfaden, wie Referenzsysteme gewählt werden sollten, um der dynamischen Transformation des Energiesystems gerecht zu werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die THG-Emissionen im Gesamtsystem durch die fortschreitende Dekarbonisierung abnehmen. Für die Bewertung einzelner Bioenergiepfade spielt die Wahl des Referenzsystems eine bedeutende Rolle. „Strom aus Holzpellets“ emittiert z.B. 100 g CO₂-Äq./kWh (Mittelwert über die Laufzeit von 2025-2040). Gegenüber der fossilen Referenz werden 85 % an THG eingespart. Die Emissionen sind aber 5-mal so hoch wie für das Referenzsystem „Strom aus neuen Photovoltaik- und Windenergieanlagen“. Es wird vorgeschlagen, für eine Bewertung absolute THG-Grenzwerte auf Grundlage unterschiedlicher Referenzsysteme – wie die fossile Referenz, Energiemix während der Anlagenlaufzeit und Erneuerbare mit niedrigen THG-Emissionen – zusammen zu nutzen, oder das für eine Fragestellung jeweils passende Referenzsystem auszuwählen. Abschließend formulierte Forschungsfragen sollen eine Diskussion zur Erarbeitung eines konzeptionellen Ansatzes zur Herleitung von Referenzsystemen, zur nötigen Datenverfügbarkeit sowie zur politischen Umsetzung anstoßen.

Abstract: How do we measure greenhouse gas reductions from energy pathways?

Comparative greenhouse gas balances (GHG balances) enable an informed decision on which energy sources should be preferred in the future in order to contribute to greenhouse gas neutrality by 2045. Comparative GHG balances are used, for example, in the EU Renewable Energy Directive to determine the extent to which bioenergy sources reduce GHG emissions compared to fossil fuels. Fossil energy sources represent the so-called reference system for this comparison. However, with the increasing spread of renewable energies, this choice of reference system appears less appropriate. This short study therefore uses the example of bioenergy pathways to examine how reference systems should be selected to take account of the dynamic transformation of the energy system. The results show that GHG emissions in the overall system are decreasing as decarbonization progresses. The choice of reference system plays an important role in the assessment of individual bioenergy pathways. “Electricity from wood pellets”, for example, emits 100 g CO₂ eq./kWh (average value over the period 2025-2040). Compared to the fossil reference, 85 % of GHG are mitigated. However, the emissions are 5 times higher than for the reference system “electricity from new PV and wind power plants”. It is proposed to use several reference systems – such as the fossil reference, energy mix during the plant lifetime as well as renewables with low GHG emissions – together for an assessment of absolute GHG limit values, or to select the reference system that is suitable for a specific issue. Finally, research questions are formulated to initiate a discussion on the development of a conceptual approach for the derivation of reference systems, the necessary data availability and political implementation.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis.....	7
Abkürzungsverzeichnis.....	8
Zusammenfassung.....	9
Summary.....	11
1 Einleitung.....	13
2 Zeitliche Ausrichtung von Referenzsystemen.....	15
3 Referenzsysteme am Beispiel der Bioenergie.....	17
3.1 Bioenergiepfade im Stromsektor.....	17
3.2 Holzenergiepfade im Wärmesektor.....	18
4 Diskussion und Forschungsbedarf.....	20
4.1 Einordnung der Ergebnisse.....	20
4.2 Datenverfügbarkeit.....	22
4.3 Forschungs- und Entwicklungsbedarf.....	22
5 Quellenverzeichnis.....	24
A Datenauswahl und Fortschreibung in die Zukunft im Stromsektor.....	26
A.1 THG-Emissionen für ausgewählte erneuerbare und fossile Energiepfade im Jahr 2022.....	26
A.2 THG-Emissionen für ausgewählte erneuerbare Energiepfade im Jahr 2045.....	27
A.3 Entwicklungen im Energiemix für Strom.....	28
A.4 THG-Emissionen für Energiepfade zwischen den Jahren 2022 und 2045.....	29

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung möglicher Referenzsysteme.....	16
Abbildung 2:	Treibhausgasemissionen für drei Bioenergiepfade im Vergleich zu möglichen Referenzsystemen im Stromsektor	17
Abbildung 3:	Netto-Treibhausgasbilanz der Holzenergienutzung im BioSINK-Referenz-Szenario für Deutschland im Zeitverlauf unterteilt nach Holzbrennstoffen für drei Varianten der Berücksichtigung der CO ₂ -Verbrennungsemissionen	19
Abbildung 4:	Entwicklung der THG-Emissionen für die Bereiche Strom in den Szenarien MWMS und Agora-KNDE	29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ausrichtung des Vergleichssystems auf die Vergangenheit oder die Zukunft.....	15
Tabelle 2:	THG-Minderungen von Bioenergiepfaden im Vergleich zur fossilen Referenz nach RED, dem Strommix (2025-2040) und neuen Windenergie- und PV-Anlagen	21
Tabelle 3:	Primärenergiebezogene Emissionsfaktoren für erneuerbare und fossile Energiepfade im Stromsektor, Bezug 2022.....	26
Tabelle 4:	Strom – primärenergiebezogene Emissionsfaktoren für erneuerbare Energiepfade, Bezug 2045.....	27

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BioSt-NachV	Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung
BHKW	Blockheizkraftwerk
CO ₂ -Äq.	Kohlendioxid-Äquivalente
EE	Erneuerbare Energien
EU	Europäische Union
EU-ETS	Europäische Union Emissions Trading System
GEG	Gebäudeenergiegesetz
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KNDE	Klimaneutrales Deutschland
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
LULUCF	Land use, land use change and forestry
MWMS	Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario
PB	Projektionsbericht der Bundesregierung
PV	Photovoltaik
RED	Renewable Energy Directive (Erneuerbare Energien-Richtlinie)
THG	Treibhausgase
UBA	Umweltbundesamt

Zusammenfassung

Treibhausgasbilanzierung (THG-Bilanzierung) ist eine bewährte Methode, um THG-Emissionen unterschiedlicher Energieträger miteinander zu vergleichen. So kann eine informierte Entscheidung getroffen werden, welche Energieträger in Zukunft eingesetzt werden sollten, um Ziele wie Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 laut Bundes-Klimaschutzgesetz zu erreichen. Vergleichende Treibhausgasbilanzen werden z. B. in der Erneuerbare Energien-Richtlinie (RED) eingesetzt, um festzustellen, wie stark Bioenergieträger die THG-Emissionen gegenüber fossilen Energieträgern mindern. Die fossilen Energieträger stellen das sogenannte **Referenzsystem** für diesen Vergleich dar. Die zugrunde liegende Annahme ist, dass eingesetzte erneuerbare Energieträger fossile Energieträger ersetzen. Dies traf mit hoher Wahrscheinlichkeit in der Vergangenheit zu, als fossile Energieträger das Energiesystem dominierten. Heute stammen aber schon 54 % des Stroms und 18 % der Wärme aus erneuerbaren Quellen, und mit der fortschreitenden Transformation des Energiesektors wird dieser Anteil stetig steigen. In einigen Bereichen konkurrieren bereits heute ausschließlich erneuerbare Energien miteinander, wie bei der Pflichterfüllung von 65 % erneuerbarer Energien in einigen Gebäuden nach dem Gebäudeenergiegesetz (GEG). Hier stellt sich nicht mehr die Frage, wie viel an fossilen Energieträgern substituiert wird, sondern, welcher erneuerbare Energiepfad die niedrigsten THG-Emissionen verursacht und im Jahr 2045 das Ziel der Treibhausgasneutralität am stärksten unterstützt. Das anzulegende Referenzsystem wäre „null THG-Emissionen“ als Blick in die Zukunft.

Vor diesem Hintergrund befasst sich dieser Kurzbericht mit der Frage: **Wie sollten Referenzsysteme im Energiesektor gewählt werden, um der Dynamik einer voranschreitenden Transformation des Energiesystems gerecht zu werden?**

Hierzu werden beispielhaft die THG-Emissionen von Bioenergiepfaden im Strom- und Wärmesektor gegenüber unterschiedlichen zeitlichen Referenzsystemen eingeordnet: (1) der fossilen Referenz als Blick in die Vergangenheit, (2) dem heutigen Energiemix als Status quo, (3) dem mittleren Energiemix während der Laufzeit einer Anlage in den Perioden 2025-2040 sowie 2030-2045, (4) dem Energiemix im Jahr 2045, (5) den THG-Emissionen von Photovoltaik- und Windenergieanlagen in den genannten Perioden oder im Jahr 2045 und (6) null THG-Emissionen.

Die Analysen der zusammengestellten THG-Bilanzen der Bioenergiepfade und der genannten Referenzsystemen zeigen folgende Muster:

- ▶ Durch die fortschreitende Dekarbonisierung reduzieren sich über die Zeitachse die THG-Emissionen im Gesamtsystem. Über Vorketten und Hilfsenergie wirkt sich dies in allen Prozessen aus, und die THG-Emissionen nehmen grundsätzlich im Zeitverlauf ab.
- ▶ Der Energiemix des Stromsektors weist bereits im Jahr 2022 niedrigere THG-Emissionen auf als die fossile Referenz nach RED, da im Strommix bereits hohe Anteile erneuerbarer Energiequellen mit geringen THG-Emissionen einfließen. Durch die fortschreitende Dekarbonisierung wird der Unterschied zwischen der fossilen Referenz und dem Strommix als Mittel der Perioden 2025-2040, 2030-2045 oder dem Jahr 2045 immer größer.
- ▶ Nicht alle Prozesse reagieren in gleichem Maße auf die Dekarbonisierung. Beispielsweise nehmen die Emissionen für Biogas aus Anbaubiomasse unterdurchschnittlich ab. Dies liegt insbesondere an verbleibenden Lachgasemissionen beim Ackerbau. Holzenergiepfade im Wärmesektor hingegen erreichen gemäß konventioneller Bilanzierung hohe THG-Minderungen – solange die direkten CO₂-Verbrennungsemissionen nicht in die THG-Bilanz eingehen. Werden die direkten CO₂-Verbrennungsemissionen von Bioenergie berücksichtigt,

verschlechtert sich die THG-Bilanz gegenüber den Referenzsystemen sehr stark. Hierbei handelt es sich – unabhängig von der Wahl des Referenzsystems – um eine wichtige Diskussion zur Erweiterung der Systemgrenzen der THG-Bilanzierung von Bioenergie.

- ▶ THG-Emissionen für Strom aus PV- und Windenergieanlagen sind generell sehr niedrig, insbesondere gegenüber Strom aus Biomasseanlagen. Für den Fall, dass Biomasse für eine flexible Strombereitstellung verwendet wird, wäre es nötig, in die Bilanz für Windenergie- und PV-Strom zusätzlich dynamische Stromspeicher einzubeziehen.

Die Analyse zu den Bioenergiepfaden zeigt deutlich, dass die Wahl des Referenzsystems sehr stark das Ergebnis der Bewertung beeinflusst. Dies wird am Beispiel der Stromerzeugung aus Holzpellets in einem Blockheizkraftwerk deutlich: mit THG-Emissionen von 100 g CO₂-Äq./kWh (Mittelwert über die Laufzeit von 2025-2040) kann gegenüber der fossilen Referenz aus der RED eine THG-Minderung von 85 % erreicht werden. Gegenüber den THG-Emissionen neuer PV- und Windenergieanlagen sind die THG-Emissionen des Stroms aus Pellets mehr als 5-mal so hoch (538 %). Im Vergleich zum Referenzsystem „Strommix der Periode 2025-2040“ ist Strom aus Pellets nur leicht besser (7 %). Strom aus Pellets verbessert den Strommix also nur noch leicht, und Strom sollte bevorzugt aus PV- und Windenergieanlagen erzeugt werden. Strom aus Altholz, erzeugt in einer Dampfturbine, ist mit 30 g CO₂-Äq./kWh deutlich besser als das Referenzsystem „Strommix der Periode 2025-2040“ und führt zu einer THG-Minderung von gut 70 %. Ein Zubau verbessert also den Energiemix während der Anlagenlaufzeit. Strom aus Biogasanlagen hingegen verursacht Emissionen von gut 260 g CO₂-Äq./kWh (vgl. Abbildung 2). Diese liegen etwa 2,5-mal so hoch wie das Referenzsystem „Strommix der Periode 2025-2040“, und ein Zubau von Strom aus Biogasanlagen verschlechtert die THG-Bilanz im Strommix dieser Referenzperiode.

Für die Weiterentwicklung von Bewertungssystemen sollte geprüft werden, ob verschiedene Referenzsysteme – wie die fossile Referenz, Energiemix während der Anlagenlaufzeit und Erneuerbare mit niedrigen THG-Emissionen – zusammen genutzt werden könnten, da Bewertungsergebnisse stark von dem gewählten Referenzsystem abhängen und so eine Spannweite sichtbar wird. Wenn nur ein Referenzsystem verwendet werden soll, sollte dasjenige Referenzsystem gewählt werden, welches zur Bewertung gegenüber einem gesetzten Ziel am besten geeignet ist. Generell vorteilhaft erscheinen Referenzsysteme, die absolute THG-Emissionen nutzen, die ggf. auch dynamisch angepasst werden. Beispielsweise wird im Rahmen der EU-Taxonomie festgelegt, dass eine Stromerzeugungsanlage einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz leistet, wenn ein Grenzwert von 100 g CO₂-Äq./kWh nicht überschritten wird. Analysen in diesem Kurzbericht zeigen, dass der Grenzwert ab 2030 auf 50 g CO₂-Äq./kWh oder auf einen niedrigeren Wert angepasst werden sollte, um weiterhin eine Verbesserung der EU-weiten THG-Bilanz im Stromsektor anzureizen. Die absoluten THG-Grenzwerte lassen sich auch in die RED-Logik einer THG-Minderung gegenüber der fossilen Referenz rückübersetzen: Die genannten Grenzwerte von 100 bzw. 50 g CO₂-Äq./kWh entsprechen THG-Minderungen von 85 % bzw. 92 %. In der Kommunikation spiegelt aber die stärkere THG-Minderung um 7 %-Punkte nicht wider, dass die absoluten THG-Emissionen nochmals halbiert werden.

Dieser Kurzbericht kann und soll keine bereits abschließenden Antworten geben, sondern vielmehr einen Diskurs zur Wahl von Referenzsystemen anzustoßen. Dazu werden abschließend Forschungsfragen zur Erarbeitung eines konzeptionellen Ansatzes zur Herleitung von Referenzsystemen, zur nötigen Datenverfügbarkeit sowie zur politischen Umsetzung formuliert.

Summary

Greenhouse gas (GHG) accounting is a proven method for comparing the GHG emissions of different energy sources. It enables informed decisions about which energy sources should be used in the future to meet targets such as GHG neutrality by 2045, as stipulated in the Federal Climate Protection Act. Comparative GHG balances are used, for example, in the Renewable Energy Directive (RED) to determine how significantly bioenergy sources reduce GHG emissions compared to fossil fuels. Fossil fuels serve as the so-called reference system for these comparisons. The underlying assumption is that renewable energy sources replace fossil fuels. This was likely true in the past when fossil fuels dominated the energy system. However, today 54% of electricity and 18% of heat already come from renewable sources, and this share continues to grow with the ongoing energy transition. In some area—such as the legal requirement that 65% of heating in certain buildings must come from renewables—only renewable energy sources are already competing with each other. In such cases, the question is no longer how much fossil energy is substituted, but which renewable pathway causes the lowest GHG emissions and best supports the 2045 climate neutrality target. In this context, the reference system shifts to “zero GHG emissions” as a future-oriented benchmark.

This brief study addresses the question: **How should reference systems in the energy sector be selected to reflect the dynamics of the ongoing energy transformation?**

To explore this, GHG emissions from bioenergy pathways in the electricity and heating sectors are assessed against various temporal reference systems: (1) the fossil reference (a view to the past); (2) the current energy mix (status quo); (3) the average energy mix over the lifetime of a facility from 2025–2040 and 2030–2045; (4) the energy mix in the year 2045; (5) GHG emissions from photovoltaic and wind power plants in the specified periods or in 2045; and (6) zero GHG emissions.

The analysis of compiled GHG balances for bioenergy pathways and the reference systems mentioned shows several patterns:

- ▶ With ongoing decarbonization, GHG emissions in the overall system decrease over time. This affects all processes, including upstream chains and auxiliary energy, leading to a general decline in GHG emissions.
- ▶ The electricity sector's energy mix showed lower GHG emissions than the fossil reference from RED already by 2022, due to the high share of low-emission renewable energy. The gap between the fossil reference and the energy mix (2025–2040, 2030–2045, or 2045) continues to widen as decarbonization progresses.
- ▶ Not all processes respond equally to decarbonization. For instance, emissions from biogas based on energy crops decrease only slightly, mainly due to residual nitrous oxide emissions from agriculture. In contrast, wood-based heating pathways achieve high GHG reductions according to conventional accounting—provided that direct CO₂ combustion emissions are excluded. When these emissions are included, the GHG balance worsens significantly across all reference systems. This highlights a key discussion point on expanding system boundaries in bioenergy GHG accounting.
- ▶ GHG emissions from PV and wind electricity are generally very low, especially compared to biomass electricity. If biomass is used for flexible electricity supply, it would be necessary to also include dynamic electricity storage in the GHG-balance for PV and wind power.

The analysis of bioenergy pathways clearly shows that the choice of reference system significantly affects evaluation outcomes. This is illustrated by electricity production from wood

pellets in a combined heat and power plant: with GHG emissions of 100 g CO₂-eq./kWh (average for 2025–2040), an 85% reduction compared to the RED fossil reference is achieved. Compared to emissions from new PV and wind plants, however, emissions from pellet-based electricity are over five times higher (538%). Relative to the "2025–2040 electricity mix" reference, pellet-based electricity performs only slightly better (7%). Thus, it only slightly improves the energy mix, and PV/wind installations should be installed as a priority. Electricity from waste wood (via steam turbine) emits 30 g CO₂-eq./kWh, significantly lower than the 2025–2040 mix, resulting in a 70% GHG reduction and contributing to an improved energy mix. In contrast, biogas-based electricity emits about 260 g CO₂-eq./kWh — around 2.5 times higher than the 2025–2040 mix — worsening the GHG balance.

To further develop assessment systems, it should be examined whether multiple reference systems—such as the fossil baseline, average energy mix during plant lifetime, and low-emission renewables—could be used in combination, as assessment results can depend strongly on the chosen reference system and thus a range becomes visible. If only one is used, it should be the one best suited for assessing progress toward set targets. Reference systems based on absolute GHG emissions are generally beneficial. They can also be dynamically adjusted if necessary. For example, the EU Taxonomy defines a power plant as contributing significantly to climate protection if emissions do not exceed 100 g CO₂-eq./kWh. This study suggests that, starting in 2030, this threshold should be reduced to 50 g CO₂-eq./kWh (or lower) to continue driving improvements in EU-wide power sector emissions. These absolute limits can also be back-calculated into the RED logic of reductions from fossil baselines: 100 and 50 g CO₂-eq./kWh correspond to reductions of 85% and 92%, respectively. However, the 7-percentage-point difference in reduction does not reflect the fact that absolute emissions have halved.

This brief study does not aim to provide final answers but rather to initiate a debate on the choice of reference systems. Accordingly, it concludes with research questions on the development of a conceptual approach for deriving reference systems, on necessary data availability, and on policy implementation.

1 Einleitung

Vergleichende Treibhausgasbilanzen sind eine bewährte Methode, um zu analysieren, welches Produkt oder welcher Prozess mehr oder weniger Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) verursacht. Ergebnisse vergleichender THG-Bilanzen können hilfreich sein, um diejenigen Produkte und Prozesse auszuwählen, die Klimaschutzziele wie im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)¹ am besten unterstützen. Beispielsweise ist es wissenschaftlich anerkannte Praxis, die THG-Emissionen erneuerbarer Energien mit den THG-Emissionen fossiler Energieträger zu vergleichen (Lauf et al. 2023 und 2025, Ortner et al. 2022).

Vergleichende THG-Bilanzen werden auch in Rechtssystemen eingesetzt. So wird in der Erneuerbare Energien-Richtlinie (Renewable Energy Directive, RED, EC 2018) als Voraussetzung für die Anrechnung von Bioenergie auf die nationalen Ziele für den Ausbau erneuerbarer Energien bzw. für die Förderfähigkeit von Bioenergie verlangt, dass eine prozentuale Minderung gegenüber einer festgelegten fossilen Referenz jeweils für Strom, Wärme und Verkehr erreicht wird. Dieser Ansatz wurde zu einem Zeitpunkt entwickelt, als fossile Energieträger das Energiesystem stark dominierten. Dabei ist die Grundannahme, dass z. B. ein eingesetzter Bioenergieträger mit hoher Wahrscheinlichkeit fossile Energieträger ersetzt. Zudem werden vergleichende THG-Bilanzen in der Privatwirtschaft und in der Verbraucherberatung eingesetzt.

Die Energiewende schreitet stetig voran und erneuerbare Energien kommen immer stärker zum Einsatz. So wurden im Jahr 2024 bereits 54,4 % des Bruttostromverbrauchs und 18,1 % des Endenergieverbrauchs für Wärme und Kälte durch erneuerbare Energien gedeckt.² Laut Gebäudeenergiegesetz (GEG) müssen in einigen Gebäuden 65 % des Energieverbrauchs aus erneuerbaren Energien bereitgestellt werden; fossile Energieträger sind schlicht keine Option mehr. Damit stellt sich die grundsätzliche Frage, ob fossile Energien heute und in Zukunft als (alleiniges) Referenzsystem geeignet sind, um politische und privatwirtschaftliche Entscheidungsprozesse zu unterstützen oder um – wie in der RED – als Entscheidungsgrundlage in Gesetzen und Verordnungen verwendet zu werden.

In diesem Kurzbericht liegt der Fokus auf der RED sowie der Bioenergie, da sich zahlreiche andere Gesetzestexte und Regelungen (z.B. EU-ETS³, BEHG⁴, THG-Minderungsquote bei Kraftstoffen⁵, BioSt-NachV⁶) auf die Anforderung der RED beziehen. Bioenergie eignet sich als Beispiel, da sich die Höhe der THG-Emissionen einzelner Bioenergiepfade deutlich voneinander unterscheiden kann. Fragen zur Wahl des Referenzsystems sind aber grundsätzlich auch für andere Bereiche relevant, um aus Sicht von THG-Bilanzen zielgerichtete Empfehlungen für die Wahl von Produkten und Prozessen geben zu können. Es ist explizit darauf hinzuweisen, dass dieser Kurzbericht vorrangig dazu dienen soll, einen Diskurs zur Wahl von Referenzsystemen anzustoßen. Er kann und soll keine bereits abschließenden Antworten geben. Der Kurzbericht ist folgendermaßen gegliedert:

- In einem ersten Schritt werden die unterschiedlichen zeitlichen Ausrichtungen eines Referenzsystems beschrieben (Kapitel 2).

¹ <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BjNR251310019.html> (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)

² <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick> (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)

³ https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)

⁴ <https://www.gesetze-im-internet.de/behg/BjNR272800019.html> (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)

⁵ <https://www.gesetze-im-internet.de/bimsg/BjNR007210974.html#BjNR007210974BjNG011202116> (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)

⁶ https://www.gesetze-im-internet.de/biost-nachv_2021/ (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)

- ▶ Darauf aufbauend wird in einem zweiten Schritt anhand von Bioenergie-Beispielen gezeigt, welche Relevanz die Wahl des Referenzsystems mit unterschiedlichen zeitlichen Ausrichtungen haben kann (Kapitel 3).
- ▶ Abschließend werden die Ergebnisse eingeordnet und der weitere Forschungs- und Entwicklungsbedarf beschrieben (Kapitel 4).

2 Zeitliche Ausrichtung von Referenzsystemen

Im Energiesektor wird angestrebt, das Ausgangssystem mit seinen hohen Anteilen an fossilen Energieträgern und entsprechend hohen THG-Emissionen zu verbessern. Der Ansatz ist, fossile Energieträger durch erneuerbare zu substituieren. Mit der vergleichenden THG-Bilanz werden die erreichte Substitution bewertet, z.B. gegenüber festgelegten THG-Minderungszielen. Der Blick dieses Ansatzes richtet sich in die Vergangenheit (vgl. Tabelle 1). Referenzsystem für diese Bewertung sind z. B. bei der nationalen THG-Berichterstattung nach IPCC und im KSG bis zum Jahr 2040 die Emissionen im Basisjahr 1990, oder in der RED die Referenzwerte für fossile Emissionen bei der Bereitstellung von Strom, Wärme und Fahrleistung.

Tabelle 1: Ausrichtung des Vergleichssystems auf die Vergangenheit oder die Zukunft

	Blick in die Vergangenheit	Blick in die Zukunft
Ziel	Wir müssen die THG-Emissionen gegenüber dem Jahr 1990 verringern.	Im Jahr 2045 soll Netto-Treibhausgas-neutralität erreicht werden.
Hauptziel bei Energie	Fossile Energieträger durch effizient genutzte erneuerbare Energien ersetzen; für den Übergang auch z. B. Kohle durch Erdgas.	Energiebedingte Emissionen müssen im Jahr 2045 null sein.
Frage	Wie stark reduziert ein Energieträgerwechsel die THG-Emissionen gegenüber der Referenz?	Wie hoch sind die absoluten Emissionen eines Energieträgers?
Referenzsystem	Fossiler Mix an Energieträgern oder fossile Energieträger mit den höchsten Emissionen	Energieträger mit null THG-Emissionen bzw. THG-Emissionen des EE-Mix
Beispiel	RED, KSG-Ziele bis zum Jahr 2040	KSG-Ziele im Jahr 2045, EU-Flottenziele für PKW

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Gegenüber dem Blick in die Vergangenheit steht der Blick in die Zukunft, etwa im Bundes-Klimaschutzgesetz: „Bis zum Jahr 2045 werden die Treibhausgasemissionen so weit gemindert, dass Netto-Treibhausgasneutralität erreicht wird“ (siehe § 3 Abs. 2, KSG⁷). Hierzu müssen die energiebedingten Emissionen im Jahr 2045 möglichst nahe bei null liegen. Dies ist also das anzulegende, auf die Zukunft ausgerichtete Referenzsystem. Heranzuziehen sind die absoluten Emissionen der Energiebereitstellung und keine relativen Veränderungen wie in der RED, denn es ist zukünftig nicht mehr relevant, wie gut ein eingesetzter Energieträger gegenüber der historischen Referenz abschneidet. Vielmehr konkurrieren unterschiedliche erneuerbare Energieoptionen miteinander bzw. ergänzen sich gegenseitig, und die Option mit den niedrigsten absoluten Emissionen sowie deren Höhe sollte direkt erkennbar sein. Ein Beispiel ist das EU-Flottenziel, laut dem ab dem Jahr 2035 nur noch PKW mit null THG-Emissionen zugelassen werden dürfen⁸ (vgl. Tabelle 1).

Diese beiden Blickwinkel in Vergangenheit und Zukunft sowie eine Zwischenstufe können beispielhaft auch für eine Holzheizung dargestellt werden, die im Jahr 2025 gebaut wird:

- Es wird eine Erdgasheizung ersetzt. Unter der Annahme, dass alternativ zur neuen Holzheizung weiterhin eine Erdgasheizung eingebaut worden wäre, kann über die Laufzeit

⁷ <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html> (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)

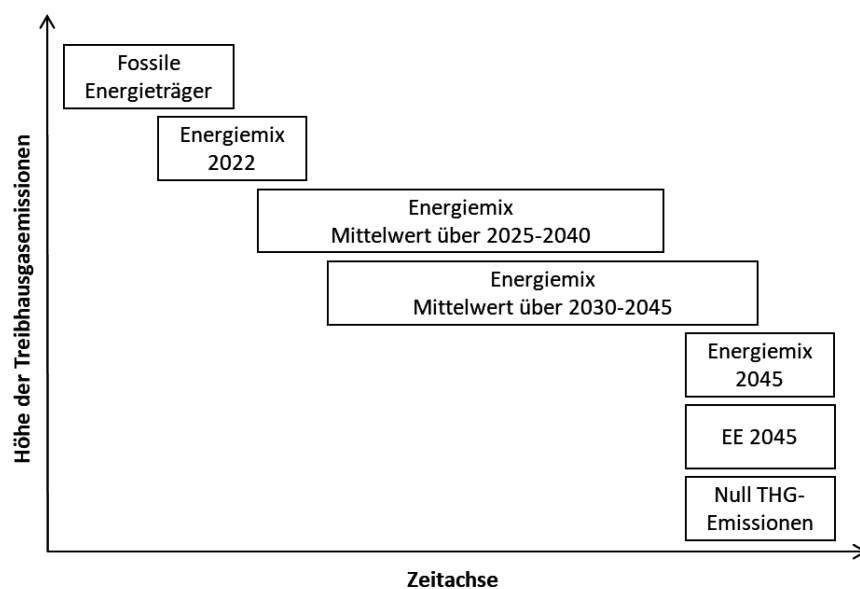
⁸ <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20230210IPR74715/fit-fur-55-neue-pkw-und-leichte-nutzfahrzeuge-ab-2035-emissionsfrei> (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)

der Anlage von z. B. 20 Jahren die THG-Minderung aus einem Vergleich mit der Erdgasheizung als Referenzsystem angesetzt werden.

- ▶ Im Jahr 2045 muss sich die Holzheizung in die Anforderungen der THG-Neutralität einpassen. Ein Betrieb der Anlage würde verlangen, dass möglichst wenige bis keine THG-Emissionen der Prozesskette freigesetzt werden. Das Referenzsystem wäre dann null THG-Emissionen.
- ▶ Bereits heute steht die Holzheizung – je nach Gebäudetyp und Förderkulisse – in Konkurrenz zur Wärmepumpe und nicht zur Erdgasheizung.⁹ Ein sinnvolles Referenzsystem wäre also ein Vergleich der THG-Bilanz der Holzheizung mit der Wärmepumpe, und zwar unter Annahme eines sich verändernden Strommixes über die Lebensdauer der Anlagen.

Diese zeitliche Komponente zur Wahl des Referenzsystems ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Je nach Fragestellung und Ausgangssituation kann es sinnvoll sein, eines der Referenzsysteme auszuwählen oder Ergebnisse mit Bezug auf mehrere Referenzsysteme auszuweisen.

Abbildung 1: Schematische Darstellung möglicher Referenzsysteme



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Die Wahl eines Referenzsystems und die Wahl der Systemgrenzen sollten voneinander getrennt betrachtet werden: Beispielsweise wird bei der Nutzung von Bioenergie CO₂ emittiert. Diese direkten CO₂-Verbrennungsemissionen werden i.d.R. in der THG-Bilanz mit null bewertet (siehe insbesondere THG-Methode der RED), mit einer Begründung auf Basis der Annahme, dass die freiwerdenden CO₂-Mengen gleichzeitig im Wald gespeichert werden. Im Projekt BioSINK wurde für Waldenergieholz anhand der THG-Bilanzmethoden für die Nationale THG-Berichterstattung hergeleitet und mit Waldwachstumsszenarien untermauert, dass diese Argumentation nicht zutreffend ist. Hierbei spielen dynamische Prozesse und zeitliche Verzögerungen eine wichtige Rolle. Wird die Walddynamik berücksichtigt, ist es berechtigt, die direkten CO₂-Verbrennungsemissionen aus Holz in die Produkt-THG-Bilanz aufzunehmen (Hennenberg et al. 2024). Auch Rüter (2023) und SRU (2022) vertreten diese Position. Damit geht es an dieser Stelle nicht um die Wahl des Referenzsystems, sondern um die Wahl einer Systemgrenze bei der THG-Bilanz von Bioenergie. Dies wird in Kapitel 3.2 wieder aufgegriffen.

⁹ z. B. nach GEG in Neubauten oder bei hoher Förderung bei fossilen Altanlagen.

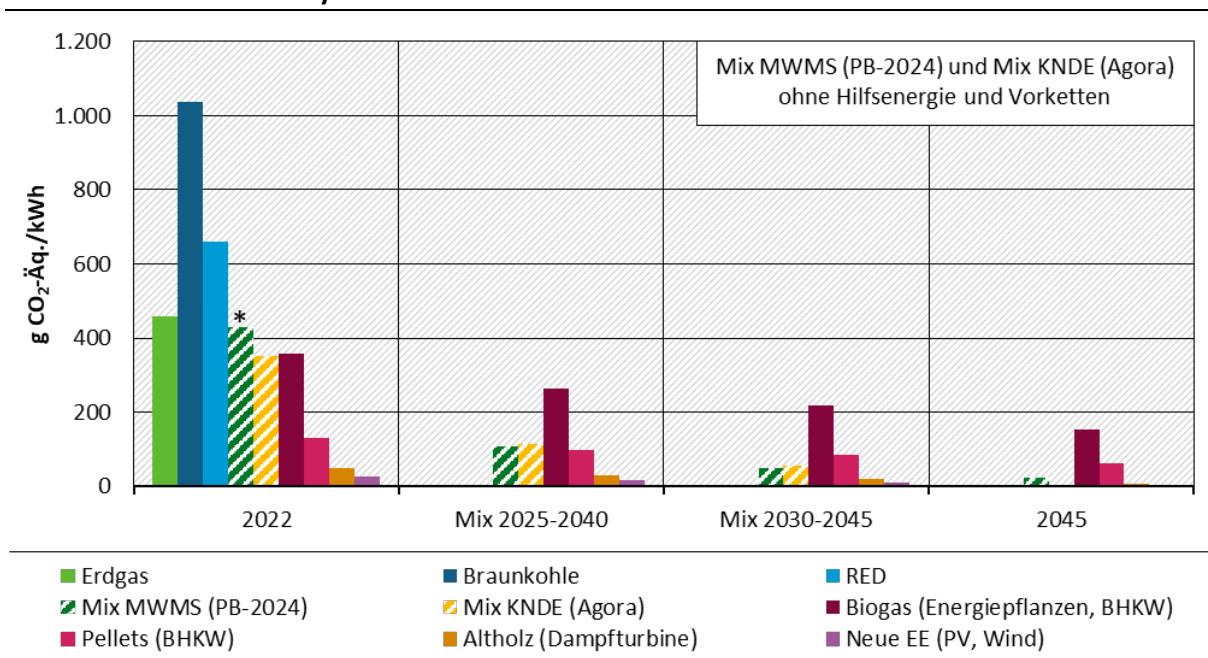
3 Referenzsysteme am Beispiel der Bioenergie

3.1 Bioenergiepfade im Stromsektor

In Abbildung 2 sind im Stromsektor drei Bioenergiepfade jeweils möglichen Referenzsystemen gegenübergestellt. Der methodische Ansatz zur Herleitung der Ergebnisse ist in Anhang A beschrieben.

Im Jahr 2022 liegen die THG-Emissionen für Strom aus Braunkohle bei über 1.000 g CO₂-Äq./kWh und für Strom aus Erdgas bei 459 g CO₂-Äq./kWh (Abbildung 2). Die fossile Referenz der RED, die einen Mittelwert verschiedener fossiler Energieträger darstellt, beträgt 659 g CO₂-Äq./kWh. Der Strommix im Jahr 2022 mit bereits deutlichen Anteilen an erneuerbaren Energien nimmt laut Projektionsbericht der Bundesregierung und der Studie KNDE (Agora et al. 2024) eine Größenordnung von 350 bis 430 g CO₂-Äq./kWh ein. Bei den beiden Werten für den Strommix ist zu berücksichtigen, dass Vorketten und Hilfsenergie nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt werden (siehe Anhang A.3). Diese Unterschätzung liegt als grober Richtwert bei ca. 10 % bis 20 %.

Abbildung 2: Treibhausgasemissionen für drei Bioenergiepfade im Vergleich zu möglichen Referenzsystemen im Stromsektor



EE = Erneuerbare Energien, PV = Photovoltaik, BHKW = Blockheizkraftwerk, RED = Renewable Energy Directive (EC 2018), KNDE = Klimaneutrales Deutschland, MWMS = Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario, PB = Projektionsbericht der Bundesregierung. Mix MWMS (PB-2024) und Mix KNDE (Agora) ist zu berücksichtigen, dass Vorketten und Hilfsenergie nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt sind. In den dargestellten THG-Bilanzen werden direkte THG-Verbrennungsemissionen mit null bewertet (vgl. Kapitel 2 und Kapitel 3.2).

Quelle: Eigenen Darstellung auf Basis von Lauf et al. (2023), EC (2018), Agora et al. (2024) und Harthan et al. (2024). *Die THG-Emissionen für den Strommix in Deutschland im Jahr 2022 stammen aus Icha und Lauf (2024).

Strom aus Biogas auf Basis von Energiepflanzen weist im Jahr 2022 mit 359 g CO₂-Äq./kWh hohe Emissionswerte auf, hingegen sind sie für Strom aus Pellets mit 131 g CO₂-Äq./kWh und aus Altholz mit 48 g CO₂-Äq./kWh deutlich niedriger. Im Jahr 2022 liegen aber die Emissionen

für Strom aus Windenergie- und PV-Anlagen mit nur 28 g CO₂-Äq./kWh¹⁰ am niedrigsten (Abbildung 2).

Wird nicht die fossile Referenz für das Jahr 2022 als Referenzsystem herangezogen, sondern der Mittelwert der Jahre 2025 bis 2040 als diejenige Periode, in der die Anlagen betrieben werden, sinken die THG-Emissionen für den Strommix deutlich auf Werte von ca. 110 g CO₂-Äq./kWh (Abbildung 2). Die THG-Emissionen von Biogas verbleiben deutlich höher, denn THG-Emissionen, z. B. aus dem Anbau von Biogassubstraten, gehen nur zum Teil zurück.

Strom aus Pellets zeigt bezogen auf die Jahre 2025 bis 2040 noch eine leicht bessere THG-Bilanz als der Strommix. Mit Bezug zur Periode 2030 bis 2045 ist dies aber nicht mehr der Fall; die THG-Emissionen für Strom aus Pellets liegen dann höher als die THG-Emissionen im Strommix (Abbildung 2). Dies liegt daran, dass im Strommix über die Jahre der Anteil an Windenergie und Solarstrom mit deren sehr niedrigen THG-Emissionen je kWh stark zunimmt. Eine Pelletanlage zur Stromerzeugung, die im Jahr 2030 installiert würde, würde dazu beitragen, dass die THG-Emissionen im Strommix sich erhöhen, anstatt sich zu verringern. Gegenüber der fossilen Referenz der RED erreicht dieser Strompfad aber eine THG-Minderung von über 70 % und würde die RED-Anforderungen erfüllen. Die RED-Systematik kann also nicht richtungssichere Aussagen dazu treffen, ob Strom aus Pellets zur Verbesserung der THG-Bilanz für Deutschland beiträgt.

Die Stromproduktion aus Altholz hingegen weist stets niedrigere THG-Emissionen als der Strommix auf (Abbildung 2). Ihr Einsatz trägt demnach zur Minderung der THG-Emissionen im Stromsektor bei.

3.2 Holzenergiepfade im Wärmesektor

Ein weiteres Beispiel, das die Bedeutung der Auswahl des Referenzsystems deutlich macht, ist der Wärmesektor. Im UBA-Projekt REFINE (siehe Biemann et al. 2024) wurde analysiert, wie sich die THG-Bilanzen von Energiesystemen im Zeitverlauf ändern, wenn eine fortschreitende Energiewende angenommen wird. Im UBA-Projekt BioSINK () wurden unveröffentlichte Datensätze aus REFINE genutzt, um die Netto-Treibhausgasbilanz der Holzenergie inklusive Substitution für Deutschland im Zeitverlauf bis zum Jahr 2050 zu erstellen (siehe Abbildung 3).

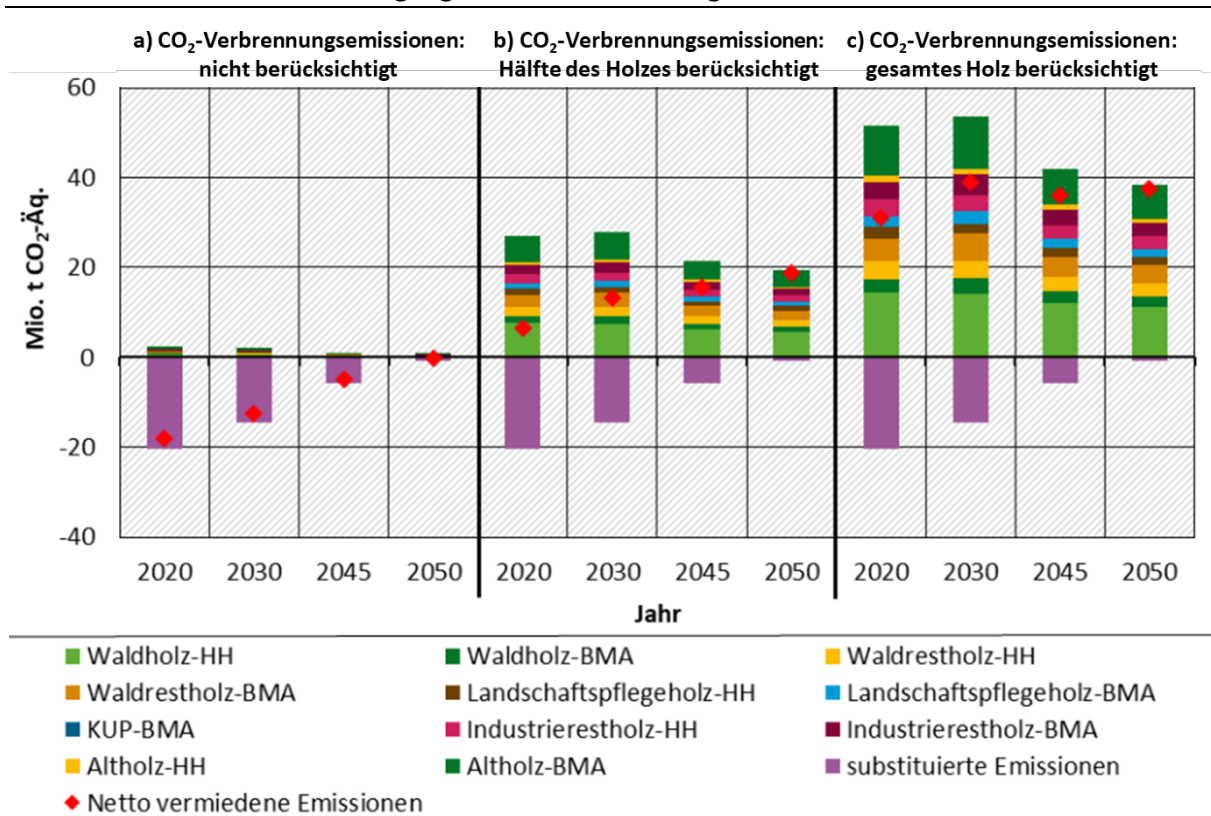
In der Betrachtung werden die netto-vermiedenen THG-Emissionen aus den Emissionen der Holzenergie und den substituierten Emissionen gegenüber dem Energiemix in einem Jahr berechnet. Das Referenzsystem ist also der Energiemix für den Wärmesektor in einem Jahr. Werden die direkten CO₂-Verbrennungsemissionen – wie z.B. nach RED – nicht in die THG-Bilanz aufgenommen (Abbildung 3a), erreicht Holzenergie in Summe in den Jahren 2020 bis 2045 eine deutliche THG-Minderung gegenüber dem Energiemix. Mit fortschreitender Energiewende sinken jedoch die Emissionen im Referenzsystem „Energiemix“ und damit die Substitutionseffekte der Holzenergie. Im Jahr 2050 liegen die Substitutionseffekte nahe null. Da für Holzenergiesysteme zur Wärmeerzeugung gemäß Konvention aber relativ geringe THG-Emissionen bilanziert werden, verbessert der Einsatz von Holzenergie in den Jahren 2030 und 2040 die THG-Bilanz des Energiemixes. Im Jahr 2050 ist die Nettobilanz etwa null – selbst wenn gemäß Konvention die direkten CO₂-Verbrennungsemissionen nicht berücksichtigt werden.

Wie in Kapitel 2 angesprochen gibt es deutliche Argumente dafür, die direkten CO₂-Verbrennungsemissionen von Holzenergie in die THG-Bilanz aufzunehmen. In Abbildung 3b und c sind die Ergebnisse dargestellt, wenn 50 % bzw. 100 % der direkten CO₂-Verbrennungsemissionen in den Produkt-THG-Bilanzen von Holzenergiepfaden berücksichtigt

¹⁰ Um den gleichen Nutzen sicherzustellen, werden in Zukunft Aufwendungen für Speicher und Netzausbau nötig, die in der THG-Bilanz noch nicht einbezogen sind. Auch saisonale Unterschiede im Strommix können eine Rolle spielen.

werden. Mit dieser Erweiterung der Systemgrenzen ist die THG-Bilanz der Holzenergienutzung für Deutschland höher als die zu erwartenden Substitutionseffekte, und Holzenergie trägt selbst bei nur 50 % Berücksichtigung der direkten Verbrennungsemissionen schon heute nicht mehr zur Erreichung von Klimaschutzziele bei. Es wird deutlich, dass die Wahl der Systemgrenzen einen starken Einfluss auf das Ergebnis der THG-Bilanz von Bioenergie hat. In diesem Beispiel wird aber nicht die Wahl des Referenzsystems „Energimix im Wärmesektor“ verändert, sondern eine Erweiterung der Methode zur THG-Bilanzierung beispielsweise der RED angenommen.

Abbildung 3: Netto-Treibhausgasbilanz der Holzenergienutzung im BioSINK-Referenz-Szenario für Deutschland im Zeitverlauf unterteilt nach Holzbrennstoffen für drei Varianten der Berücksichtigung der CO₂-Verbrennungsemissionen



HH = private Haushalte, BMA = Biomasseanlagen, KUP = Kurzumtriebsplantagen. Substituierte Emissionen werden gegenüber dem Energiemix berechnet.

Quelle: Hennenberg et al. (2024)

4 Diskussion und Forschungsbedarf

4.1 Einordnung der Ergebnisse

Die in diesem Kurzbericht zusammengestellten Beispiele für THG-Bilanzen verschiedener Energiepfade zeigen folgende Muster:

- ▶ Durch die fortschreitende Dekarbonisierung reduzieren sich über die Zeitachse die THG-Emissionen im Gesamtsystem (siehe Abbildung 2 und Abbildung 3). Über Vorketten und Hilfsenergie wirkt sich dies in allen Prozessen aus, und die THG-Emissionen nehmen grundsätzlich im Zeitverlauf ab.
- ▶ Der Energiemix des Stromsektors weist bereits im Jahr 2022 niedrigere THG-Emissionen auf als die fossile Referenz, da im Strommix bereits hohe Anteile erneuerbarer Energiequellen mit geringen THG-Emissionen einfließen. Durch die fortschreitende Dekarbonisierung wird der Unterschied zwischen der fossilen Referenz und dem Strommix als Mittel der Perioden 2025-2040, 2030-2045 oder dem Jahr 2045 immer größer.
- ▶ Nicht alle Prozesse reagieren in gleichem Maße auf die Dekarbonisierung. Beispielsweise nehmen die Emissionen für Biogas aus Anbaubiomassee unterdurchschnittlich ab. Dies liegt insbesondere an verbleibenden Lachgasemissionen beim Ackerbau. Holzenergiepfade im Wärmesektor hingegen erreichen gemäß konventioneller Bilanzierung hohe THG-Minderungen – solange die direkten CO₂-Verbrennungsemissionen nicht in die THG-Bilanz eingehen (siehe Abbildung 3).
- ▶ THG-Emissionen für Strom aus Windenergie- und Solaranlagen sind generell sehr niedrig, insbesondere gegenüber Strom aus Biomasseanlagen. Für den Fall, dass Biomasse für eine flexible Strombereitstellung verwendet wird, wäre es nötig, in die Bilanz für Windenergie- und PV-Strom zusätzlich dynamische Stromspeicher zu bilanzieren, was deren THG-Bilanz verschlechtern würde.

Das übergeordnete Ziel, die THG-Emissionen in Deutschland stetig zu verringern, um bis 2045 THG-Neutralität zu erreichen, wird am effektivsten mit Energiepfaden unterstützt, die möglichst geringe spezifische THG-Emissionen aufweisen. Aber auch Pfade mit höheren THG-Emissionen können – je nach Betrachtungsweise – zu einer THG-Minderung führen. Wird beispielsweise im Jahr 2025 eine neue Biogasanlage installiert und Strom aus Biogas auf Basis von Anbaubiomassee produziert, ist in der Periode 2025 bis 2040 mit mittleren THG-Emissionen von 264 g CO₂-Äq/kWh zu rechnen. Folgende Betrachtungen sind möglich (vgl. Tabelle 2):

- a. Gegenüber der fossilen Referenz nach RED wird mit Strom aus der Biogasanlage eine THG-Minderung von 60 % erreicht. Diese Bewertung ist aber nur dann plausibel, wenn erwartet werden kann, dass ausschließlich fossile Strompfade ersetzt werden.
- b. Gegenüber dem Strommix in der Periode 2025-2040 führt die Biogasanlage zu einer Steigerung der THG-Emissionen von 147 %. Diese Bewertung nimmt an, dass eine Substitution anteilig für alle Strompfade, also inklusive fossiler und erneuerbarer, erfolgt.
- c. Gegenüber neuen Windenergie- und PV-Anlagen sind die Emissionen der Biogasanlage deutlich höher (Steigerung der THG-Emissionen von 1.589 %).¹¹ Dieser Vergleich ist gerechtfertigt, wenn zu entscheiden ist, ob beim Anlagenneubau eine Biogasanlage oder eine Windenergie-bzw. PV-Anlage zugebaut werden soll.

¹¹ Diese Relation kann sich geringfügig zu Gunsten des Biogasstroms verändern, wenn für Windenergie- und PV-Strom zusätzliche Speicher berücksichtigt werden.

Zwei weitere Bioenergiepfade, Strom aus Pellets und aus Altholz, sind in Tabelle 2 dargestellt. Auch diese beiden Pfade weisen gemäß RED eine THG-Minderung von 85 % und 95 % gegenüber der fossilen Referenz auf. Gegenüber der Periode 2025 bis 2040 erreicht Strom aus Altholz eine THG-Minderung von 72 %, wohingegen die THG-Emissionen für Strom aus Pellets etwa gleichauf liegen mit dem Strommix. Im Vergleich zu neuen PV- und Windenergieanlagen sind aber THG-Steigerungen zu erwarten.

Tabelle 2: THG-Minderungen von Bioenergiepfaden im Vergleich zur fossilen Referenz nach RED, dem Strommix (2025-2040) und neuen Windenergie- und PV-Anlagen

Strompfade	Bioenergiepfade (g CO ₂ -Äq./kWh)	Fossile Referenz (RED)	Mix MWMS (PB-2024)	Neue EE (PV, Wind)
Spezifische THG-Emissionen (g CO₂-Äq./kWh)		658,8	106,9	15,7
Biogas (Energiepflanzen, BHKW)	264,4	60 %	-147 %	-1.589 %
Pellets (BHKW)	100,0	85 %	7 %	-538 %
Altholz (Dampfturbine)	29,7	95 %	72 %	-90 %

Quelle: Eigene Darstellung. PB-2024 = Projektionsbericht der Bundesregierung (Harthan et al. 2024), RED = Erneuerbare Energien-Richtlinie (EC 2018), siehe Anhang A zur Herleitung und Abbildung 2 zur Darstellung spezifischer THG-Emissionen für neue installierte PV- und Windenergieanlagen sowie drei Bioenergiepfade.

Diese Beispiele illustrieren, dass eine Entscheidung für oder gegen einen Bioenergiepfad stark von der Wahl des Referenzsystems abhängt. Es ist unwahrscheinlich, dass ausschließlich fossile Strompfade oder ausschließlich neue Windenergie- und PV-Anlagen substituiert werden. Für die Weiterentwicklung von Bewertungssystemen sollte geprüft werden, ob verschiedene Referenzsysteme wie in Tabelle 2 genutzt werden könnten, oder – wenn nur ein Referenzsystem verwendet werden soll – welches Referenzsystem zur Bewertung gegenüber einem gesetzten Ziel am besten geeignet ist.

In der RED, als einem der zentralen europäischen Instrumente zur Förderung erneuerbarer Energien, werden zur THG-Bilanzierung absolute Referenzwerte für fossile Energieträger verwendet und hierauf bezogen relative Minderungsziele formuliert. Diese relativen Minderungsziele können auch als absolute THG-Werte ausgedrückt werden, da der Referenzwert als statischer Wert in der RED festgelegt ist. Für die Stromerzeugung beträgt die fossile Referenz 659 g CO₂-Äq./kWh. Biomasseanlagen zur Stromerzeugung, die ab 2016 installiert werden, müssen nach RED demgegenüber eine THG-Minderung von 80 % erreichen. Dies entspricht einer zulässigen absoluten THG-Emission von 132 g CO₂-Äq./kWh. Für den Strommix der Periode 2025 bis 2040 ist mit Werten von 107 g CO₂-Äq./kWh (PB-2024, Harthan et al. 2024) bzw. von 115 g CO₂-Äq./kWh (Agora et al. 2024) zu rechnen (vgl. Abbildung 2). Der Grenzwert der RED für Strom aus Biomasse liegt also über der zu erwartenden mittleren THG-Emission im Stromsektor in dieser Periode. Dieses Rechenbeispiel wirft zum einen die Frage auf, ob eine zu niedrige THG-Minderung gegenüber der fossilen Referenz gewählt ist. Zum anderen stellt sich die Frage, ob es zur Erhöhung der Transparenz einer Bewertung sinnvoller sein kann, absolute Grenzwerte auszuweisen, anstatt relative Grenzwerte mit Bezug zur fossilen Referenz.

Die Verwendung absoluter Referenzwerte hat den Vorteil, dass sie in Bezug auf verschiedene Referenzsysteme abgeleitet werden können, wie beispielsweise aus der anteiligen THG-Minderung gegenüber einer fossilen Referenz und aus dem zu erwartenden Energiemix in einer zukünftigen Periode (siehe oben), aber auch auf Basis von zu erreichenden THG-

Minderungspfaden wie im KSG. Beispielsweise wird im Rahmen der EU-Taxonomie festgelegt, dass eine Stromerzeugungsanlage einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz leistet, wenn ein Grenzwert von 100 g CO₂-Äq./kWh nicht überschritten wird (EC 2022). Für die Periode 2025 bis 2040 erscheint dieser Wert gegenüber dem erwarteten Strommix als sinnvoll (PB-2024: 107 g CO₂-Äq./kWh; Agora: 115 g CO₂-Äq./kWh). Für die Periode 2030 bis 2045 liegen die erwarteten Werte für die THG-Emissionen des Strommixes bei 48 g CO₂-Äq./kWh (PB-2024, Harthan et al. 2024) bzw. 57 g CO₂-Äq./kWh (Agora et al. 2024; vgl. Abbildung 2). Dies zeigt, dass eine dynamische Weiterentwicklung von Grenzwerten sinnvoll sein kann, um zu bewerten, ob mit einer Aktivität ein wesentlicher Beitrag zum Klimaschutz geleistet wird. Beispielsweise sollte in der EU-Taxonomie der Grenzwert von 100 g CO₂-Äq./kWh ab 2030 auf 50 g CO₂-Äq./kWh oder auf einen niedrigeren Wert angepasst werden.

Die absoluten THG-Grenzwerte lassen sich in die RED-Logik einer THG-Minderung gegenüber der fossilen Referenz rückübersetzen. Grenzwerte von 100 bzw. 50 g CO₂-Äq./kWh entsprechen THG-Minderungen gegenüber einer fossilen Referenz von 85 % bzw. 92 %. In der Kommunikation spiegelt die um 7 %-Punkte verbesserte THG-Minderung nicht wider, dass die absoluten THG-Emissionen halbiert wurden.

4.2 Datenverfügbarkeit

Eine grundsätzliche Herausforderung stellt die Verfügbarkeit von Datensätzen dar, die die zukünftigen THG-Emissionen von Prozessen abbilden. In diesem Kurzbericht wurde für den Stromsektor ein einfacher Fortschreibungsansatz beispielhaft auf Literaturwerte zu THG-Bilanzen angewandt und zusammen mit Ergebnissen aus Szenarienanalysen zum Energiemix dargestellt (siehe Anhang A). Die Qualität dieser Datengrundlage ist als vergleichsweise niedrig einzustufen. Um die Überlegungen dieses Kurzberichts beispielhaft mit Daten zu hinterlegen, wurde dennoch dieser Ansatz gewählt, da keine anderen Daten mit ausreichender Detailtiefe zur Verfügung standen. So sind in der Ökobilanz-Software GEMIS 5.1¹² für zahlreiche Prozesse zwar Datensätze für die Zeitscheiben 2010, 2020 und 2030 hinterlegt. Diese Struktur ermöglicht grundsätzlich die Analyse von Entwicklungen entlang der Zeitachse. Allerdings wäre eine grundlegende Aktualisierung der vorhandenen Datensätze sinnvoll; weiterhin fehlen Datensätze zu den Zeitscheiben 2040 und 2050. Im Projekt UBA-REFINE (siehe Teilergebnisse in Biemann et al. 2024) wurde die zukünftige Entwicklung der THG-Emissionen von Prozessen bearbeitet. Teilergebnisse wurden für Holzenergie im Projekt BioSINK verwendet (siehe Kapitel 3.2). Die in REFINE erstellten Datensätze, die auf bestehenden Datenbanken wie ecoinvent¹³ aufbauen, sind aber nicht frei verfügbar.

4.3 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die Ergebnisse und die Diskussion in diesem Kurzbericht zeigen anhand von Bioenergie-Beispielen auf, dass noch deutlicher Forschungsbedarf besteht, um die Wahl des Referenzsystems im Energiesektor auf eine wissenschaftlich fundierte Basis zu stellen, die der Dynamik einer voranschreitenden Transformation des Energiesystems gerecht wird.

Erarbeiten eines konzeptionellen Ansatzes

In diesem Kurzbericht wird die zeitliche Ausrichtung von Referenzsystemen konzeptionell betrachtet und diskutiert. Die Darstellung ist nicht abschließend, sondern sollte vielmehr in zukünftigen Forschungsprojekten neben anderen Quellen wie dem Projekt REFINE als ein Startpunkt herangezogen werden. Weitergehende konzeptionelle Arbeiten zu zukünftigen

¹² Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS): <https://iinas.org/downloads/gemis-downloads/>

¹³ <https://ecoinvent.org/>

Referenzsystemen – sowie mögliche Kombinationen von Referenzsystemen – sollten insbesondere Antworten zu folgenden Fragestellungen geben:

- ▶ Wie können Zielbilder ausgestaltet sein, um z. B. das Ziel, im Jahr 2045 Treibhausgasneutralität zu erreichen, richtungssicher zu unterstützen?
- ▶ Welche Rolle spielen welche Technologien zur Zielerreichung und ab wann sollten welche Technologien nicht mehr zugebaut werden, um Lock-in-Effekte zu verhindern?
- ▶ Wie wirken sich Anforderungen an natürliche und technische Senken¹⁴ auf die Ausgestaltung von Referenzsystemen aus und wie können insbesondere Emissionsbilanzen im LULUCF-Sektor¹⁵ in Referenzsysteme eingebunden werden (siehe z. B. Ergebnisse im Projekt BioSINK für Holzenergie, Hennenberg et al. 2024)?
- ▶ Wie können zu erwartende Aufwendungen für Energiespeicher und Systemanpassung in einem Referenzsystem berücksichtigt werden?

Datensätze und Anwendung

Treibhausgasbilanzen sollen auf Daten basieren, die für einen Zeitpunkt repräsentativ sind (siehe z. B. ISO 14064). Eine Herausforderung besteht darin, dies auch für THG-Bilanzen, die eine zukünftige Situation abbilden sollen, zu gewährleisten. Arbeiten wie im Projekt REFINE (Biemann et al. 2024) sollten ausgeweitet und z. B. um Szenarien für verschiedene mögliche Entwicklungspfade ergänzt werden.

Insbesondere sollte nach Lösungen gesucht werden, wie erstellte Datensätze für zukünftige THG-Emissionen für Prozesse öffentlich zugänglich gemacht werden können. Lösungen sollten bevorzugt kostenfrei sein oder könnten an Lizenzen der zugrunde gelegten Datensätze angebunden werden. Zudem sollten die zukünftigen Datensätze zu THG-Emissionen in den oben genannten konzeptionellen Ansätzen zu Referenzsystemen genutzt werden.

Politische Umsetzung

Referenzwerte zu THG-Bilanzen spielen in politischen Instrumenten wie der RED und die EU-Taxonomie eine wichtige Rolle. Es sollte geprüft werden, in welchen weiteren politischen Instrumenten in der EU und/oder in Deutschland THG-Bilanzen bereits verwendet werden bzw. verwendet werden sollten. Diese Arbeit sollte über den Energiesektor hinausgehen. Aufbauend auf wissenschaftlichen Ergebnissen zu den genannten konzeptionellen Ansätzen für Referenzsysteme und die Anwendung von Datensätzen zukünftiger THG-Emissionen sollten konkrete Vorschläge für verbesserte Referenzsysteme erarbeitet werden, die anschlussfähig an politische Instrumente sind und den in diesem Papier aufgezeigten Herausforderungen an Referenzsystemen gerecht werden.

¹⁴ Technische Senken umfassen z.B. DACCS, BECCS oder Holzprodukte. Zu natürlichen Senken zählen CO₂-Einbindungen in Ökosystemen (z.B. Wald, Agroforst oder Grünland).

¹⁵ Mit Ausnahme von Landnutzungsänderungen wie Wald zu Ackerland werden Emissionen, die im LULUCF-Sektor auftreten, in der konventionellen THG-Bilanzierung nicht berücksichtigt. Beispiele sind Emissionen oder CO₂-Einbindungen, die mit der Höhe der Holzentnahme im Wald, der Anlage von Agroforst oder mit dem Grünlandaufwuchs unter PV-Freiflächenanlagen zusammenhängen. Dies ist primär eine Systemerweiterung der THG-Bilanz. Sie kann aber die Ausgestaltung des Referenzsystems entsprechend beeinflussen, wenn sie auf das gewählte Referenzsystem anzuwenden ist.

5 Quellenverzeichnis

- Agora et al. (Agora Think Tanks) (2024): Klimaneutrales Deutschland. Von der Zielsetzung zur Umsetzung. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-30_DE_KNDE_Update/A-EW_344_Klimaneutrales_Deutschland_WEB.pdf (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)
- Biemann, K.; Helms, H.; Münter, D.; Liebich, A.; Pelzeter, J.; Kämper, C.; Müller, J. (2024): Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr. Endbericht. TEXTE 13/2024, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/13_2024_texte_analyse_der_umweltbilanz_von_kraftfahrzeugen_0.pdf (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)
- EC (European Commission) (2018): DIRECTIVE (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). Official Journal of the European Union, 21.12.2018, L 328/82-209. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001> (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)
- EC (European Commission) (2022): COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2022/1214 of 9 March 2022 amending Delegated Regulation (EU) 2021/2139 as regards economic activities in certain energy sectors and Delegated Regulation (EU) 2021/2178 as regards specific public disclosures for those economic activities. Official Journal of the European Union, 15.7.2022, L 188/1-45. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022R1214> (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)
- Harthan, R.; Förster, H.; Borkowski, K.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Cook, V. et al. (2024): Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024). TREIBHAUSGAS-PROJEKTIONEN FÜR DEUTSCHLAND. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/projektionen_technischer_anhang_0.pdf (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)
- Hennenberg, K.; Pfeiffer, M.; Benndorf, A.; Böttcher, H.; Reise, J.; Mantau, U.; Köppen, S.; Fehrenbach, H.; Bürck, S. (2024): Auswirkungen der energetischen Nutzung forstlicher Biomasse in Deutschland auf deutsche und internationale LULUCF-Senken (BioSINK). Endbericht. CLIMATE CHANGE 33/2024, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_33-2024_biosink.pdf (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)
- Icha, P.; Lauf, T. (2024): Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2023. CLIMATE CHANGE 23/2024, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/23_2024_cc_strommix_1_1_2024.pdf (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)
- Lauf, T.; Memmler, M.; Schneider, S. (2023): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2022. CLIMATE CHANGE 49/2023, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/20231219_49_2023_cc_e_missionsbilanz_erneuerbarer_energien_2022_bf.pdf (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)
- Lauf, T.; Memmler, M.; Schneider, S. (2025): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2023. CLIMATE CHANGE 03/2025, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/03_2025_cc_emissionsbilanz_erneuerbarer_energien_2023.pdf (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)
- Ortner, S.; Pehnt, M.; Seefeldt, F.; Rau, D.; Sahnoun, M.; Weinert, K.; Winiewska, B.; Oschatz, B. (2022): Untersuchungen zur Weiterentwicklung der Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger im Bereich erneuerbare Wärme. Analyse von Substitutionsfaktoren, Jahresnutzungsgrade und Hilfsenergie. TEXTE 138/2022, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_138-

2022_untersuchungen_zur_weiterentwicklung_der_emissionsbilanz_erneuerbarer_energetraeger_im_bereich_erneuerbare_waerme.pdf (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)

Rüter, S. (2023): Abschätzung von Substitutionspotentialen der Holznutzung und ihre Bedeutung im Kontext der Treibhausgas-Berichterstattung. Thünen Working Paper 214, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn066391.pdf (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025).

SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2022): Kurzstellungnahme des Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) zu den Eckpunkten der Nationalen Biomassestrategie (20.12.2022), https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2020_2024/2022_12_NABIS.html (zuletzt aufgerufen am 03.06.2025)

A Datenauswahl und Fortschreibung in die Zukunft im Stromsektor

A.1 THG-Emissionen für ausgewählte erneuerbare und fossile Energiepfade im Jahr 2022

Es wurden aus Lauf et al. (2023)¹⁶ für die Bereiche Strom drei Bioenergiepfade ausgewählt (Tabelle 3). Im Bezugsjahr 2022 bewegen sich die THG-Emissionen zwischen 40,3 g CO₂/kWh für Strom, erzeugt aus Altholz mit einer Dampfturbine, bis hin zu 169,4 g CO₂/kWh für Strom aus Biogas, erzeugt aus Energiepflanzen und eingesetzt in einem Blockheizkraftwerk. Es ist zu betonen, dass die direkten CO₂-Verbrennungsemissionen in diesen THG-Bilanzen mit null bewertet werden.

Für die Berechnung der THG-Emissionen der betrachteten Referenzsysteme wurden in Tabelle 3 zudem Werte für THG-Bilanzen für Strom aus Windenergie- und Solaranlagen sowie für fossile Energieträger aufgenommen (Lauf et al. 2023) und die Referenzwerte aus der RED (EC 2018) ergänzt.

Tabelle 3: Primärenergiebezogene Emissionsfaktoren für erneuerbare und fossile Energiepfade im Stromsektor, Bezug 2022

Strom	Vorkette				Direkte Emissionen				Hilfsenergie				Total
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Σ	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Σ	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Σ	
	(g CO ₂ -Äq./kWh)												
Biogas (Energiepflanzen, BHKW)	20,4	40,3	29,7	90,4	0	55,8	1,6	57,4	20,2	1,0	0,3	21,5	169
Pellets (BHKW)	9,6	0,4	0,3	10,2	0	31,5	1,6	33,1	9,7	0,5	0,3	10,5	53,8
Altholz (Dampfturbine)	0	31,5	1,6	33,1	0	1,1	2,9	4,0	3,0	0,1	0	3,2	40,3
Photovoltaik	51,9	3,8	0,5	56,2	0	0	0	0	0,5	>0,1	0	0,5	56,7
Windstrom onshore	15,9	0,8	0	16,7	0	0	0	0	0,9	0,1	0	1,0	17,7
Windstrom offshore	8,7	0,53	0	9,2	0	0	0	0	0,5	>0,1	0	0,5	9,7
Strom (Mittel aus PV u. Wind)													28,0
Braunkohle	10,4	0,3	0,0	10,7	399	0,0	3,4	403	0,0	0,0	0,0	0,0	413
Erdgas	29,6	17,6	0,5	47,7	201	7,3	1,1	209	0,0	0,0	0,0	0,0	257
Fossile Referenz (RED)													659

Quelle: Lauf et al. (2023); RED: fossile Referenzwerte aus der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie (EC 2018).

Die folgenden anlagenspezifischen bzw. energieträgerspezifischen Annahmen wurden für die Stromerzeugung in Anlehnung an Lauf et al. (2023) getroffen:

¹⁶ Die Analyse fand im Jahr 2024 statt, so dass die aktuellen Daten aus Lauf et al. (2025) nicht berücksichtigt werden konnten.

- ▶ Biogas (Energiepflanzen, BHKW): elektrischer Nutzungsgrad von 51 %, Eigenstromverbrauch von 8,5 %, Abwärmenutzung von 10 % des Biogaseinsatzes
- ▶ Pellets (BHKW): elektrischer Nutzungsgrad von 42 %, Eigenstromverbrauch von 5,0 %, Abwärmenutzung von 10 % des Biomasseeinsatzes
- ▶ Altholz (Dampfturbine): elektrischer Nutzungsgrad von 41 %, Eigenstromverbrauch von 2,5 %, Abwärmenutzung von 10 % des Biomasseeinsatzes
- ▶ Braunkohle: elektrischer Nutzungsgrad von 39,8 %
- ▶ Erdgas: elektrischer Nutzungsgrad von 56,0 %

A.2 THG-Emissionen für ausgewählte erneuerbare Energiepfade im Jahr 2045

Es wurde ein einfacher Fortschreibungsansatz gewählt, um die THG-Bilanzen für die ausgewählten erneuerbaren Energiepfade aus dem Jahr 2022 (siehe Kapitel A.1) bis ins Jahr 2045 fortzuschreiben. Für Anlagen, die im Jahr 2045 errichtet werden, wird als Expert*innenschätzung angenommen:

- ▶ Im Jahr 2045 sind im Zuge der Dekarbonisierung hin zur Treibhausgasneutralität die direkten CO₂-Emissionen in den Prozessen gleich null.
- ▶ Für fremdbezogene Hilfsenergie werden im Jahr 2045 aufgrund der erreichten THG-Neutralität keine THG-Emissionen mehr erwartet.
- ▶ Die CH₄- und N₂O-Emissionen in den Vorketten werden bis zum Jahr 2045 durch Effizienzmaßnahmen halbiert.

In Tabelle 4 sind die derart angepassten THG-Bilanzen zusammengestellt.

Tabelle 4: Strom – primärenergiebezogene Emissionsfaktoren für erneuerbare Energiepfade, Bezug 2045

Strom	Vorkette				Direkte Emissionen				Hilfsenergie				Total
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Σ	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Σ	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Σ	
	(g CO ₂ -Äq./kWh)												
Biogas (Energiepflanzen, BHKW)	0	20,2	14,8	35,0	0	55,8	1,6	57,4	0	0	0	0	92,4
Pellets (BHKW)	0	0,2	0,1	0,3	0	31,5	1,6	33,1	0	0	0	0	33,4
Altholz (Dampfturbine)	0	31,5	1,6	33,1	0	1,1	2,9	4,0	0	0	0	0	37,1
Photovoltaik	0	1,9	0,3	2,2	0	0	0	0	0	0	0	0	2,2
Windstrom onshore	0	0,4	0	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4
Windstrom offshore	0	0,27	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3
Strom (Mittel aus PV u. Wind)													0,9

Quelle: Angepasste Daten aus Lauf et al. (2023). Erläuterungen zur Anpassung siehe Text.

Die folgenden anlagenspezifischen Annahmen wurden für die Stromerzeugung in Anlehnung an Lauf et al. (2023) für das Jahr 2045 getroffen:

- ▶ Biogas (Energiepflanzen, BHKW): elektrischer Nutzungsgrad von 51 %, Eigenstromverbrauch von 8,5 %, Abwärmenutzung von 30 % des Biogaseinsatzes
- ▶ Pellets (BHKW): elektrischer Nutzungsgrad von 42 %, Eigenstromverbrauch von 5,0 %, Abwärmenutzung von 30 % des Biomasseeinsatzes
- ▶ Altholz (Dampfturbine): elektrischer Nutzungsgrad von 41 %, Eigenstromverbrauch von 2,5 %, Abwärmenutzung von 30 % des Biomasseeinsatzes

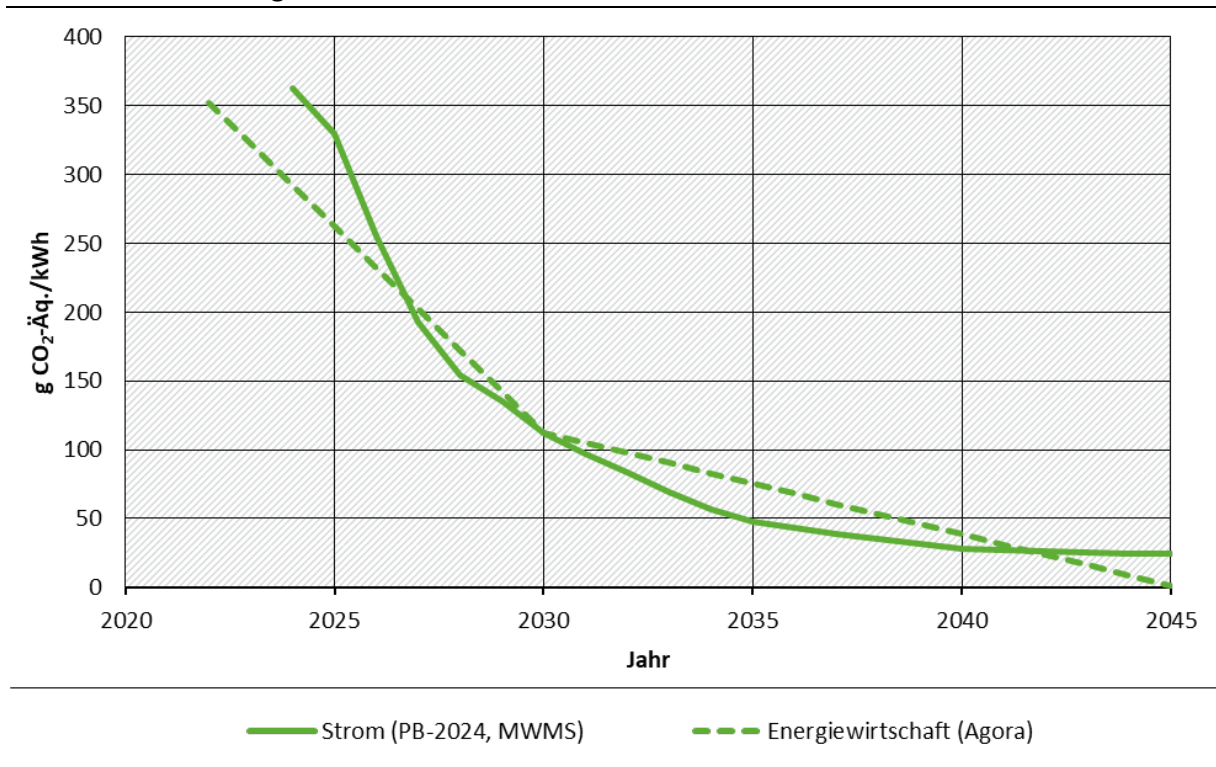
A.3 Entwicklungen im Energiemix für Strom

Zusätzlich zu den THG-Emissionen für beispielhafte Energiepfade (Kapitel A.1 und Kapitel A.2) sind in Abbildung 4 aus dem Projektionsbericht der Bundesregierung für das Jahr 2024 (PB-2024; Harthan et al. 2024) und aus der Studie KNDE (Agora et al. 2024) zusammenfassende, deutschlandweite Daten für die Entwicklung der THG-Emissionen in den Bereichen Strom, Wärme und Verkehr zusammengestellt. Diese Ergebnisse sind aber aus den folgenden Gründen nur bedingt mit den Ergebnissen zu den Energiepfaden in Kapitel A.1 und Kapitel A.2 vergleichbar:

- ▶ In diesen Berichten werden für Bereiche Strom nur die direkten THG-Emissionen¹⁷ ausgewiesen; Emissionen zu Vorketten werden in anderen Sektoren wie Industrie, Landwirtschaft und Energiewirtschaft berichtet.
- ▶ Für den Energiesektor sind für die Stromerzeugung differenzierte Ergebnisse veröffentlicht. In der KNDE-Studie (Agora et al. 2024) werden aber THG-Emissionen für die Stromerzeugung zusammen mit weiteren Energieerzeugungen wie Fernwärme ausgewiesen.
- ▶ PB-2024 (Harthan et al. 2024) spiegelt als Maßnahmenzenario den Stand der aktuellen Politik wider. Die Ergebnisse verfehlen oft die KSG-Ziele. Die KNDE-Studie (Agora et al. 2024) ist hingegen ein Zielszenario, und KSG-Ziele werden darin meist erreicht.

Die Ergebnisse werden trotz der schlechten Vergleichbarkeit herangezogen, da die Tendenz der zukünftigen Entwicklung ersichtlich ist: Die THG-Emissionen in den Bereichen Strom, Wärme und Verkehr nehmen von deutlichen Emissionen im Jahr 2022 bis zum Jahr 2045 stark ab (Abbildung 4). Dabei zeigt der Verkehrssektor eine verzögerte Reduktion der THG-Emissionen gegenüber den Bereichen Strom und Gebäude.

¹⁷ Die direkten CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von Bioenergie werden hier mit null bewertet.

Abbildung 4: Entwicklung der THG-Emissionen für die Bereiche Strom in den Szenarien MWMS und Agora-KNDE

MWMS = Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario.

Quelle: Agora (2024), Projektionsbericht der Bundesregierung (PB-2024, Harthan et al. 2024).

A.4 THG-Emissionen für Energiepfade zwischen den Jahren 2022 und 2045

Für die betrachteten Energiepfade wurden THG-Emissionen für das Jahr 2022 (Kapitel A.1) und das Jahr 2045 (Kapitel A.2) zusammengestellt. Zwischen diesen beiden Zeitpunkten erfolgte eine lineare Fortschreibung. Für die Berechnung der mittleren THG-Emissionen in den Zeitfenstern 2025 bis 2040 und 2030 bis 2045 wurden die Ergebnisse dieser Fortschreibung herangezogen. Für Strom aus neuen PV- und Windenergieanlagen ergibt sich für 2025 bis 2040 ein Wert von 15,7 g CO₂-Äq./kWh und für 2030 bis 2045 von 9,8 g CO₂-Äq./kWh. Für den Energiemix für Strom wurden die Mittelwerte dieser Zeitfenster anhand der Daten in Kapitel A.3 berechnet.