

TEXTE

141/2026

Abschlussbericht

Kriterien für eine nachhaltige Bereitstellung und klimagerechte Integration von strombasierten erneuerbaren Energieträgern

von:

Thomas Fröhlich, Axel Liebich, Sabrina Ludmann, Daniel Münter, Marian Rosental, Clemens Wingenbach, Horst Fehrenbach

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH, Heidelberg

Simon Schreck, Leonie Beaucamp, Rosa Stubenberg
Germanwatch e.V., Berlin

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 141/2026

KLIFOPLAN des Bundesministeriums für Umwelt,
Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3722 43 506 0

Abschlussbericht

Kriterien für eine nachhaltige Bereitstellung und klimagerechte Integration von strombasierten erneuerbaren Energieträgern

von

Thomas Fröhlich, Axel Liebich, Sabrina Ludmann, Daniel
Münter, Marian Rosental, Clemens Wingenbach, Horst
Fehrenbach
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
gGmbH, Heidelberg

Simon Schreck, Leonie Beaucamp, Rosa Stubenberg
Germanwatch e.V., Berlin

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:

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg

Germanwatch e.V.
Stresemannstr. 72
10963 Berlin

Abschlussdatum:

März 2026

Redaktion:

Fachgebiet V 1.2 Strategien und Szenarien für Klimaschutz und Energie
Maximilian Pagel, Kirsten op de Hipt - Layout

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8348>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, September 2026

© Alle Rechte vorbehalten

Zur Übersetzung der Texte ins Englische und Überprüfung der Rechtschreibung wurde bei der Erstellung dieses wissenschaftlichen Dokuments Künstliche Intelligenz (AI translation and language tools - Multilingualism, translation and language-based AI services) eingesetzt. Es handelt sich ausschließlich um redaktionelle und stilistische Optimierungen selbst verfasster Inhalte. Die Nutzung erfolgt rein unterstützend und wird aus Gründen der Transparenz hiermit offengelegt.

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

Kurzbeschreibung: Kriterien für eine nachhaltige Bereitstellung und klimagerechte Integration von strombasierten erneuerbaren Energieträgern

Das zentrale Ziel des Forschungsvorhabens „Kriterien für eine nachhaltige Bereitstellung und klimagerechte Integration von strombasierten erneuerbaren Energieträgern“ ist die wissenschaftliche Bewertung, wie strombasierten erneuerbaren Energieträgern (PtGLS: Power-to-Gas, -Liquid, -Solid) eine nachhaltige und klimagerechte Rolle in der Transformation des Energiesystems zukommen kann. Im Fokus stehen: die klimapolitisch notwendige Hochskalierung dieser Technologien, die regulatorischen Rahmenbedingungen, die ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen sowie die Entwicklung von Nachhaltigkeitskriterien entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Der vorliegende Abschlussbericht enthält Zusammenfassungen der einzeln veröffentlichten Teilberichte.

Abstract: Criteria for the sustainable provision and climate-friendly integration of electricity-based renewable energy sources

The central objective of the research project ‘Criteria for the sustainable provision and climate-friendly integration of electricity-based renewable energy sources’ is to scientifically evaluate how electricity-based renewable energy sources (PtGLS: power-to-gas, -liquid, -solid) can play a sustainable and climate-friendly role in the transformation of the energy system. The focus is on: the upscaling of these technologies, the regulatory framework, the ecological and socio-economic impacts, and the development of sustainability criteria along the entire value chain. This final report contains summaries of the individually published sub-reports.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	8
Zusammenfassung.....	9
Summary	12
1 Einleitung und Hintergrund.....	15
1.1 Die Transformation des Energiesystems.....	15
1.2 Rolle strombasierter erneuerbarer Energieträger.....	15
1.3 Importnotwendigkeit und globale Implikationen.....	15
1.4 Umwelt- und Klimawirkungen	16
1.5 Ziele und Vorgehensweise	16
2 Bewertung der Nachhaltigkeitsanforderungen in der Renewable Energy Directive (RED)	18
2.1 Regulatorischer Rahmen und Entwicklung	18
2.2 Technische Anforderungen – Grünstrom-Kriterien	18
2.3 Kritische Aspekte und identifizierte Fehlstellen	19
2.4 Exemplarische Berechnung anhand von drei Fallbeispielen.....	20
2.5 Schlussfolgerungen zur regulatorischen Bewertung	20
3 Ökologisch nachhaltige Bereitstellung von (Pt)GLS- Produkten	22
3.1 Methodischer Rahmen der Ökobilanzierung.....	22
3.2 Untersuchte Produkte und Bereitstellungsprozesse	22
3.3 Prozessketten zur Herstellung von PtGLS-Produkten.....	23
3.4 Klima- und Umwelteffekte der PtGLS-Produkte	23
3.4.1 Klimawirkung:	24
3.4.2 Weitere Umweltwirkungen	24
3.5 Möglichkeiten zur Minderung von Umwelteffekten	25
4 Optionen und Potenziale für die Nutzung von biogenem CO ₂ für die Herstellung von strombasierten erneuerbaren Energieträgern.....	28
4.1 Technische Optionen und Potenziale biogener CO ₂ -Quellen	28
4.2 Nachhaltigkeitsbewertung biogener CO ₂ -Quellen.....	28
4.3 Konkurrierende Nutzungen.....	29
5 Nachhaltige Bereitstellung von (Pt)GLS-Produkten in ausgewählten Ländern außerhalb Europas.....	30
5.1 Methodischer Ansatz: Kriterienkatalog und Instrumentenanalyse.....	30
5.2 Kriterienbasierte Bewertung und Herausforderungen der Nachhaltigkeit bei Wasserstoffpartnerschaften	31

6	Überblick zur Kostenentwicklung von strombasierten erneuerbaren Energieträgern.....	32
6.1	Methodischer Ansatz der Kostenanalyse.....	32
6.2	Ergebnisse der Kostenanalyse.....	32
7	Schlussfolgerungen.....	34
8	Quellenverzeichnis	35

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
ATR	Autotherme Reformierung
BECCS	Bioenergie mit Carbon Capture and Storage
CCS	Carbon Capture and Storage (CO ₂ -Abscheidung und Speicherung)
CO₂	Kohlendioxid
DAC	Direct Air Capture (CO ₂ -Abscheidung aus der Luft)
DME	Dimethylether
EE	Erneuerbare Energien
ETS	Emissions Trading System (Emissionshandelssystem)
FT	Fischer-Tropsch (Verfahren/Kraftstoff)
H₂	Wasserstoff
LCA	Life Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse)
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier (flüssige organische Wasserstoffträger)
N₂O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
NH₃	Ammoniak
NO_x	Stickoxide
PPA	Power Purchase Agreement (Stromlieferverträge)
PtGLS	Power-to-Gas, -Liquid, -Solid (strombasierte Energieträger)
RED	Renewable Energy Directive (EU-Richtlinie für erneuerbare Energien)
RED II	Zweite Version der Renewable Energy Directive (EU)
RED III	Dritte Version der Renewable Energy Directive (EU)
RFNBO	Renewable Fuels of Non-Biological Origin (strombasierte Kraftstoffe nicht biogenen Ursprungs)
SMR	Steam Methane Reforming (Dampfreformierung)
SNG	Synthetic Natural Gas (Synthetisches Erdgas)
SO₂	Schwefeldioxid
THG	Treibhausgas
UBA	Umweltbundesamt, Dessau

Zusammenfassung

Das zentrale Ziel des Forschungsvorhabens „Kriterien für eine nachhaltige Bereitstellung und klimagerechte Integration von strombasierten erneuerbaren Energieträgern“ ist die wissenschaftliche Bewertung, wie strombasierten erneuerbaren Energieträgern (PtGLS: Power-to-Gas, -Liquid, -Solid) eine nachhaltige und klimagerechte Rolle in der Transformation des Energiesystems zukommen kann. Im Fokus stehen: die klimapolitisch notwendige Hochskalierung dieser Technologien, die regulatorischen Rahmenbedingungen, die ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen, sowie die Entwicklung von Nachhaltigkeitskriterien entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Der vorliegende Abschlussbericht enthält Zusammenfassungen der einzeln veröffentlichten Teilberichte. Für ein tieferes Verständnis der Thematik und für Details zur jeweiligen Methodik, zu Datengrundlagen, Ergebnissen und Schlussfolgerungen sei auf die jeweiligen Teilberichte verwiesen:

- ▶ Beaucamp, L.; Stubenberg, R.; Schreck, S. (2026): Kriterienentwicklung für die nachhaltige Bereitstellung von PtGLS-Produkten. TEXTE. 140/2026 Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8248>
- ▶ Fehrenbach, H.; Fröhlich, T. (2026): Bewertung der Nachhaltigkeitsanforderungen der RED. TEXTE 137/2026, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8347>
- ▶ Fröhlich, T.; Liebich, A.; Ludmann, S.; Münter, D.; Rosental, M.; Wingenbach, C. (2026): Klima- und Umwelteffekte der Herstellung von PtGLS-Produkten und technische Maßnahmen zur Minderung. TEXTE 138/2026, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8171>
- ▶ Münter, D.; Fehrenbach, H.; Fröhlich, T. (2025): Optionen und Potenziale für die Nutzung von biogenem CO₂ für die Herstellung von strombasierten erneuerbaren Energieträgern. TEXTE 95/2025, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7849>
- ▶ Schreck, S. (2025): Überblick zur Kostenentwicklung von strombasierten erneuerbaren Energieträgern. TEXTE 96/2025, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7963>

Hintergrund:

Die vollständige Abkehr von der Nutzung fossiler Energieträger bis zur zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts ist Voraussetzung für die Erreichung der nationalen und europäischen Klimaziele. Während die direkte Elektrifizierung in vielen Sektoren voranschreitet, bleiben für schwer zu elektrifizierende Bereiche wie internationale Schifffahrt, Luftfahrt und chemische Industrie flüssige oder gasförmige Energieträger unverzichtbar. PtGLS ermöglichen die Umwandlung erneuerbaren Stroms in speicher- und transportierbare Energieträger und sind zentrales Element der Sektorenkopplung. Die Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse ist begrenzt, weshalb PtGLS-Technologien als weniger ressourcenbeschränkt gelten. Entscheidend ist die Bereitstellung ausreichender Mengen an zusätzlichem erneuerbarem Strom – eine der größten Herausforderungen der Energiewende. Szenarien zeigen, dass der deutsche Bedarf an PtGLS-Produkten nicht allein durch inländische Produktion gedeckt werden kann. Importe aus sonnen- und windreichen Ländern werden notwendig, was neue sozioökonomische und ökologische Fragestellungen aufwirft.

Bewertung der Nachhaltigkeitsanforderungen (RED II/III):

Die europäische Renewable Energy Directive (RED) und ihre Weiterentwicklungen in Form von überarbeiteten Richtlinien (RED II und RED III)¹ sowie von Delegierten Rechtsakten² setzen erstmals verbindliche Anforderungen an strombasierten Wasserstoff und dessen Derivate (RFNBO). Zentrale Kriterien sind die vollständige Erneuerbarkeit des eingesetzten Stroms und eine Mindest-Treibhausgaseinsparung von 70 % gegenüber fossilen Referenzen. Die RED III erweitert den Anwendungsbereich und führt ambitionierte Quoten für die Industrie ein. Dennoch bestehen Lücken, etwa bei der Berücksichtigung weiterer Umweltwirkungen und bei der Nachweisführung der Zusätzlichkeit erneuerbarer Stromquellen.

Ökobilanzielle Bewertung:

Für 56 Produktionspfade von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten wurden Lebenszyklusanalysen (LCA) durchgeführt, ergänzt um 12 Zielszenarien in denen Zukunftstechnologien und Maßnahmen zur Minderung von Umweltwirkungen einbezogen wurden. Die untersuchten Produkte umfassen Wasserstoff (grün, blau, türkis), Ammoniak, Methan, Methanol, Dimethylether (DME) und Fischer-Tropsch-Produkte.

Die Ergebnisse zeigen, dass PtGLS-Produkte in den meisten Fällen deutliche Klimavorteile gegenüber fossilen Referenzen bieten können – vorausgesetzt, die gesamte Prozesskette wird mit erneuerbarem Strom betrieben. Allerdings können in anderen Umweltkategorien (z. B. Versauerung, Eutrophierung, Flächenbedarf) höhere Belastungen auftreten. Die Wahl der Stromquelle (Wind, PV) und die Transportoptionen (Pipeline, Schiff, Ammoniak, LOHC) beeinflussen die Umweltwirkungen maßgeblich.

Maßnahmen zur Minderung von Umwelteffekten:

Die konsequente Nutzung erneuerbaren Stroms in allen Prozessschritten, der Einsatz alternativer Membranmaterialien, effektive Abgasnachbehandlung und die Nutzung von Meerwasserentsalzung sind zentrale Hebel zur Verbesserung der Umweltbilanz. Zielkonflikte, etwa zwischen Klimaschutz und Flächenverbrauch, müssen adressiert werden.

Biogenes CO₂ als Rohstoff:

Für kohlenstoffhaltige PtGLS-Produkte wird neben Wasserstoff eine Kohlenstoffquelle benötigt. Die Nutzung biogener CO₂-Quellen wird als Alternative zu Direct Air Capture (DAC) diskutiert. Nachhaltigkeitsvorteile ergeben sich vor allem bei der Nutzung von Abfall- und Reststoffen. Die Konkurrenz zu anderen Nutzungspfaden und die begrenzte Verfügbarkeit setzen jedoch enge Grenzen.

Nachhaltigkeit bei internationalen Partnerschaften:

Ein umfassender Kriterienkatalog mit 46 Kriterien verteilt auf die fünf Dimensionen Soziales, Governance, Wirtschaft, Umwelt und Technisches für den Import von PtGLS-Produkten wurde entwickelt. Dieser ermöglicht die Bewertung der Ausgangssituation potenzieller Exportländer für PtGLS-Produkte hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit.

Die Analyse zeigt, dass bestehende Instrumente (z. B. EU-Lieferkettengesetz, Zertifizierungsmechanismen und Musterabnehmerverträge) Nachhaltigkeitsaspekte nur lückenhaft abdecken. Besonders soziale, Governance- und ökonomische Kriterien werden oft

¹ RED: Renewable Energy Directive, ausgehend von der ersten Fassung (Richtlinie 2009/28/EC des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009

RED II: Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018

RED III: Richtlinie (EU) 2023/2413 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Oktober 2023

² Delegierte Rechtsakte (EU) 2023/1184 und (EU) 2023/118)

vernachlässigt. Eine nachhaltige Ausgestaltung internationaler Wasserstoffpartnerschaften erfordert daher eine verbesserte Zusammenarbeit und regelmäßige Wirkungsanalysen.

Kostenentwicklung:

Die Kostenanalyse bietet einen umfassenden Überblick über die Kostenentwicklung ausgewählter strombasierter Energieträger bis 2050. Betrachtet werden Produktions- und Transportkosten differenziert nach Herstellungsregionen (MENA-Region, Nord- und Südamerika, Subsahara-Afrika, Australien, Nord- und Südeuropa, Deutschland).

Die Produktions- und Transportkosten von PtGLS-Produkten variieren stark je nach Region, Technologie und Annahmen. Grüner Wasserstoff weist die geringsten Produktionskosten auf, Derivate sind teurer. Die Kosten werden voraussichtlich bis 2050 sinken, wobei die Verfügbarkeit günstigen erneuerbaren Stroms entscheidend bleibt.

Zentrale Ergebnisse und Schlussfolgerungen

- ▶ **Klimaschutzpotenzial:** PtGLS-Produkte können einen signifikanten Beitrag zur Dekarbonisierung leisten, insbesondere in schwer zu elektrifizierenden Sektoren. Die Klimawirkung hängt maßgeblich von der vollständigen Nutzung erneuerbaren Stroms ab.
- ▶ **Regulatorische Lücken:** Die RED III und die zugehörigen Verordnungen setzen wichtige Mindeststandards, adressieren aber nicht alle relevanten Nachhaltigkeitsaspekte. Insbesondere fehlen umfassende Kriterien zu Biodiversität, Wasserverbrauch, Landnutzung und sozialen Auswirkungen.
- ▶ **Importabhängigkeit:** Deutschland wird auf Importe in relevantem Umfang angewiesen sein. Die Nachhaltigkeit der Produktionsbedingungen in Exportländern muss durch internationale Standards und Partnerschaften sichergestellt werden.
- ▶ **Umweltwirkungen:** Neben der Treibhausgasminderung können PtGLS-Produkte in anderen Umweltkategorien höhere Belastungen verursachen. Eine ganzheitliche Bewertung und gezielte Maßnahmen zur Minderung dieser Effekte sind notwendig.
- ▶ **Kosten und Markthochlauf:** Die Kostenentwicklung bleibt ein Unsicherheitsfaktor. Staatliche Förderung, klare regulatorische Vorgaben und der Ausbau der Infrastruktur sind neben der damit einhergehenden Planungssicherheit entscheidend für einen erfolgreichen Markthochlauf.

Fazit:

Strombasierte erneuerbare Energieträger sind ein zentraler Baustein für die Energiewende und den Klimaschutz. Ihr nachhaltiger Hochlauf erfordert jedoch nicht nur ambitionierte Klimaziele, sondern auch umfassende Nachhaltigkeitskriterien, internationale Kooperation und eine konsequente Ausrichtung auf erneuerbare Energien entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Die im Bericht identifizierten Lücken und Zielkonflikte bieten wichtige Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung von Politik, Regulierung und Praxis.

Summary

The central objective of the research project 'Criteria for the sustainable provision and climate-friendly integration of electricity-based renewable energy sources' is to scientifically evaluate how electricity-based renewable energy sources (PtGLS: power-to-gas, -liquid, -solid) can play a sustainable and climate-friendly role in the transformation of the energy system. The focus is on the upscaling of these technologies, the regulatory framework, the ecological and socio-economic impacts, and the development of sustainability criteria along the entire value chain. This final report contains summaries of the individually published sub-reports. For a deeper understanding of the topic and for details on the respective methodology, data basis, results, and conclusions, please refer to the respective sub-reports:

- ▶ Beaucamp, L.; Stubenberg, R.; Schreck, S. (2026): Kriterienentwicklung für die nachhaltige Bereitstellung von PtGLS-Produkten. TEXTE 140/2026 Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8248>
- ▶ Fehrenbach, H.; Fröhlich, T. (2026): Bewertung der Nachhaltigkeitsanforderungen der RED. TEXTE 137/2026, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8347>
- ▶ Fröhlich, T.; Liebich, A.; Ludmann, S.; Münter, D.; Rosental, M.; Wingenbach, C. (2026): Climate and environmental effects of the manufacture of PtGLS products and technical measures for mitigation. TEXTE 139/2026, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8329>
- ▶ Münter, D.; Fehrenbach, H.; Fröhlich, T. (2025): Optionen und Potenziale für die Nutzung von biogenem CO₂ für die Herstellung von strombasierten erneuerbaren Energieträgern. TEXTE 95/2025, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7849>
- ▶ Schreck, S. (2025): Überblick zur Kostenentwicklung von strombasierten erneuerbaren Energieträgern. TEXTE 96/2025, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7963>

Background:

The complete decarbonisation of the society by the second half of the 21st century is a prerequisite for achieving national and European climate targets. While direct electrification is progressing in many sectors, liquid or gaseous energy sources remain indispensable for areas that are difficult to electrify, such as international shipping, aviation and the chemical industry. PtGLS enable the conversion of renewable electricity into storable and transportable energy sources. The availability of sustainable biomass is limited, which is why PtGLS technologies are considered less resource-constrained. The key factor is the provision of sufficient quantities of additional renewable electricity – one of the greatest challenges of the energy transition. Scenarios show that Germany's demand for PtGLS products cannot be met by domestic production alone. Imports from countries with abundant sun and wind resources will be necessary, raising new socio-economic and environmental issues.

Assessment of sustainability requirements (RED II/III):

The European Renewable Energy Directive (RED) and its further developments set binding requirements for electricity-based hydrogen and its derivatives (RFNBO) for the first time. Key criteria are the complete renewability of the electricity used and a minimum greenhouse gas

saving of 70% compared to fossil fuel references. RED III expands the scope of application and introduces ambitious quotas for industry. Nevertheless, there are still gaps, for example in the consideration of other environmental impacts and in the verification of the additionality of renewable electricity sources.

Life cycle assessment:

Life cycle assessments (LCA) were carried out for 56 production pathways for hydrogen and its derivatives, supplemented by 12 target scenarios which included future technologies and measures to mitigate environmental impacts. The products examined include hydrogen (green, blue, turquoise), ammonia, methane, methanol, dimethyl ether (DME) and Fischer-Tropsch products.

The results show that PtGLS products can offer significant climate benefits over fossil references in most cases – provided that the entire process chain is powered by renewable electricity. However, higher impacts may occur in other environmental categories (e.g. acidification, eutrophication, land use). The choice of electricity source (wind, PV) and transport options (pipeline, ship, ammonia, LOHC) have a significant impact on environmental effects.

Measures to mitigate environmental impacts:

The consistent use of renewable electricity in all process steps, the use of alternative membrane materials, effective exhaust gas aftertreatment and the use of seawater desalination are key levers for improving the environmental balance. Conflicting goals, such as between climate protection and land use, must be addressed.

Biogenic CO₂ as a raw material:

In addition to hydrogen, a carbon source is required for carbon-based PtGLS products. The use of biogenic CO₂ sources is being discussed as an alternative to direct air capture. Sustainability advantages arise primarily from the use of waste and residual materials. However, competition with other uses and limited availability set narrow limits.

Sustainability in international partnerships:

A comprehensive catalogue of 46 criteria covering the five dimensions of social, governance, economic, environmental and technical aspects for the import of PtGLS products has been developed. This enables the initial situation of potential export countries for PtGLS products to be assessed in terms of their sustainability.

The analysis shows that existing instruments (e.g. EU Supply Chain Act, certification mechanisms and model purchase agreements) only cover sustainability aspects in a fragmentary manner. Social, governance and economic criteria in particular are often neglected. The sustainable design of international hydrogen partnerships therefore requires improved cooperation and regular impact analyses.

Cost development:

The cost analysis provides a comprehensive overview of the cost development of selected electricity-based energy sources until 2050. Production and transport costs are considered, differentiated by manufacturing region (MENA region, North and South America, Sub-Saharan Africa, Australia, Northern and Southern Europe, Germany).

The production and transport costs of PtGLS products vary greatly depending on the region, technology and assumptions. Green hydrogen has the lowest production costs, while derivatives are more expensive. Costs are expected to fall by 2050, with the availability of cheap renewable electricity remaining crucial.

Key findings and conclusions

- ▶ **Climate protection potential:** PtGLS products can make a significant contribution to decarbonisation, especially in sectors that are difficult to electrify. The climate impact depends largely on the full use of renewable electricity.
- ▶ **Regulatory gaps:** RED III and the associated regulations set important minimum standards, but do not address all relevant sustainability aspects. In particular, there is a lack of comprehensive criteria on biodiversity, water consumption, land use and social impacts.
- ▶ **Import dependency:** Germany will be dependent on a relevant amount of imports. The sustainability of production conditions in exporting countries must be ensured through international standards and partnerships.
- ▶ **Environmental impacts:** In addition to reducing greenhouse gas emissions, PtGLS products can cause higher impacts in other environmental categories. A holistic assessment and targeted measures to mitigate these effects are necessary.
- ▶ **Costs and market ramp-up:** Cost development remains a factor of uncertainty. Government funding, clear regulatory requirements and infrastructure expansion, along with the resulting planning certainty, are crucial for a successful market ramp-up.

Conclusion:

Electricity-based renewable energy sources are a central component of the energy transition and climate protection. However, their sustainable ramp-up requires not only ambitious climate targets, but also comprehensive sustainability criteria, international cooperation and a consistent focus on renewable energies along the entire value chain. The gaps and conflicting goals identified in the report offer important starting points for the further development of policy, regulation and practice.

1 Einleitung und Hintergrund

1.1 Die Transformation des Energiesystems

Die Umsetzung der nationalen und europäischen Klimaschutzziele erfordern, die Erzeugung von Treibhausgasen bis zur zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts auf ein Minimum zu reduzieren um das Ziel der Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen. Das EU-Klimaschutzpaket „Fit für 55“ sieht vor, die Netto-Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55% zu senken und den Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendverbrauch auf 45% zu steigern.

Der Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung, insbesondere durch Wind- und Solarenergie, nimmt dabei eine zentrale Schlüsselrolle ein. Die fortschreitende Elektrifizierung erfasst bereits heute große Bereiche der Gesellschaft: Wärmepumpen im Gebäudesektor, elektrische Antriebe im Verkehr und zunehmend auch industrielle Prozesse. Diese Sektorkopplung stellt ein zentrales Element der Energiewende dar.

Dennoch bleiben Anwendungsbereiche, in denen die direkte Nutzung erneuerbaren Stroms technisch oder wirtschaftlich nicht praktikabel ist. Dies betrifft insbesondere die internationale Schifffahrt, den Flugverkehr sowie stoffliche Anwendungen z.B. in der chemischen Industrie. Für diese Bereiche sind flüssige oder gasförmige Energieträger unverzichtbar.

1.2 Rolle strombasierter erneuerbarer Energieträger

Strombasierte erneuerbare Energieträger (Power-to-Gas/Liquid/Solid, PtGLS) bieten die Möglichkeit, erneuerbaren Strom durch Umwandlung in chemische Energie speicher- und transportierbar zu machen. Diese synthetischen Kraft- und Grundstoffe können fossile Energieträger in aktuell schwer zu elektrifizierenden Sektoren ersetzen.

Die Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse ist hingegen stark begrenzt. Ob die derzeitigen Mindestquoten für fortschrittliche Biokraftstoffe gemäß RED II und RED III sowie der deutschen Treibhausgasminderungsquote³ bis 2030 ohne Nachhaltigkeitskonflikte erfüllbar sind, ist fraglich. Höhere Biomasseanteile, die im Rahmen einer vollständigen Defossilisierung immer wieder diskutiert werden, sind nachhaltig nicht darstellbar.

PtGLS-Technologien unterliegen geringeren Ressourcenrestriktionen. Wasser als zentraler Rohstoff für die Elektrolyse ist bei Nutzung von Meerwasser nicht knapp. CO₂ und N₂ können aus der Atmosphäre gewonnen werden. Entscheidend ist die Bereitstellung ausreichender Mengen zusätzlichen erneuerbaren Stroms, was angesichts aktueller Diskussionen zum weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien die größte Herausforderung darstellt.

1.3 Importnotwendigkeit und globale Implikationen

Szenarioanalysen⁴ zeigen deutlich, dass der deutsche Bedarf an PtGLS-Produkten nicht vollständig durch inländische Produktion gedeckt werden kann. Importe in relevantem Umfang sind erforderlich, wobei sonnen- bzw. windreiche Länder des globalen Südens zunehmend in den Fokus rücken.

³ „Entwurf eines Gesetzes zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote“, Drucksache 19/27435 vom 09.03.2021, <https://dserver.bundestag.de/btd/19/274/1927435.pdf>

⁴ Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - RESCUE Studie (Purr et al (2019)), Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 (Sensfuss et al. (2021)); Klimaneutrales Deutschland 2045 (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021))

Erste Projekte wie die Porsche-Initiative in Chile⁵ oder Pilotanlagen in Marokko sind bereits angelaufen. Diese Entwicklung wirft wichtige sozioökonomische Fragen auf: Wie können lokale Gesellschaften von derartigen Großprojekten profitieren? Welche Auswirkungen haben PtGLS-Projekte mit Volumina in der Größenordnung des jeweiligen Bruttoinlandsprodukts auf die volkswirtschaftliche Entwicklung? Können solche Projekte die lokale Energie- und Wasserversorgung verbessern oder verschärfen sie bestehende Knappheiten?

Neben klassischen Umweltfragen – etwa den Auswirkungen großflächiger Solaranlagen in sensiblen Ökosystemen – sind sozioökonomische Nachhaltigkeitskriterien von herausragender Bedeutung. Dabei müssen sowohl EU-rechtliche Mindeststandards als auch internationale Prozesse und zivilgesellschaftliche Initiativen einbezogen werden.

1.4 Umwelt- und Klimawirkungen

Ein zentraler Aspekt für die Bewertung von PtGLS-Produkten ist deren tatsächliche Klima- und Umweltentlastung. Während bereits verschiedene Ökobilanzen vorliegen, fehlen übergreifende Analysen, die sowohl die Umweltwirkungen als auch Substitutionseffekte systematisch bewerten.

Besondere Aufmerksamkeit verdienen Vergleiche mit diskutierten Alternativen wie „blauem Wasserstoff“ auf Erdgasbasis. Hier können Ökobilanzen wichtige Erkenntnisse für die politische und gesellschaftliche Diskussion liefern und zur evidenzbasierten Bewertung verschiedener Technologiepfade beitragen.

1.5 Ziele und Vorgehensweise

Die politische und öffentliche Diskussion um strombasierte erneuerbare Energieträger hat sich in jüngster Zeit erheblich intensiviert⁶. Dabei findet die Frage nach Umwelteffekten und Nachhaltigkeit bislang unzureichende Beachtung. Während die RED II/III erstmals Ansatzpunkte für Nachhaltigkeitskriterien enthält und erste darauf aufbauende Zertifizierungssysteme entwickelt werden, fehlen umfassende Gesamtanalysen.

Das vorliegende Forschungsvorhaben zielt darauf ab, den klimapolitisch notwendigen Hochlauf von PtGLS-Produkten in eine nachhaltige, umwelt- und sozialverträgliche Defossilisierung einzuordnen. Als Ziel-Land für die Abnahme der PtGLS-Produkte wurde Deutschland gesetzt. Umweltfragen werden standortunabhängig aber spezifisch für verschiedene Herstellungspfade und Derivate untersucht. Sozioökonomische Fragestellungen zielen auf die jeweiligen Produktionsländer ab. Zentrale Forschungsfragen umfassen:

- ▶ Welchen Beitrag können PtGLS-Produkte zur Dekarbonisierung leisten?
- ▶ Welche regulatorischen Rahmenbedingungen - global und auf EU-Ebene - bestehen bereits und welche müssen entwickelt werden?
- ▶ Wie sind die spezifischen Umweltwirkungen entlang der Produktions- und Transportketten zu bewerten und wo bestehen Optimierungspotenziale?
- ▶ Welche sozioökonomischen Wechselwirkungen entstehen in den Produktionsländern bei großmaßstäblicher Implementierung, insbesondere mit dem Ziel des Exports?

⁵ <https://newsroom.porsche.com/de/2022/unternehmen/porsche-highly-innovative-fuels-hif-eroeffnung-efuels-pilotanlage-haruni-chile-synthetische-kraftstoffe-30730.html>

- Wie kann die Einhaltung von Nachhaltigkeitskriterien entlang der Lieferketten nachgewiesen werden?
- Welche Kostenentwicklung ist zu erwarten und welche Rolle spielen Kohlenstoffquellen?

Die Komplexität des Themenfelds erfordert einen multidisziplinären Ansatz mit verschiedenen methodischen Bausteinen. Die Bearbeitung der verschiedenen Fragestellungen erfolgte in separaten aber untereinander verbundenen Arbeitspaketen, aus denen mehrere Kurzpapiere entstanden sind. Diese Kurzpapiere wurden separat veröffentlicht. In den folgenden Kapiteln werden die wesentlichen Inhalte der Kurzpapiere zusammenfassend dargestellt. Für eine detaillierte Darstellung sei auf die jeweiligen Kurzpapiere verwiesen.

2 Bewertung der Nachhaltigkeitsanforderungen in der Renewable Energy Directive (RED)

Dieses Kapitel stellt zusammenfassend die Inhalte des Kurzpapiers *Fehrenbach, H.; Fröhlich, T. „Bewertung der Nachhaltigkeitsanforderungen der RED“* dar (Fehrenbach, Fröhlich 2026).

2.1 Regulatorischer Rahmen und Entwicklung

Die Erneuerbare Energien-Richtlinie (RED⁷) in ihren Fassungen RED II⁸ und RED III⁹ stellt das zentrale europäische Regelwerk für Nachhaltigkeitsanforderungen an erneuerbare Energieträger dar. Mit den Neufassungen werden erstmals verbindliche Anforderungen an strombasierte erneuerbare Kraftstoffe nicht-biologischen Ursprungs etabliert, die als RFNBO (Renewable Fuels of Non-Biological Origin) bezeichnet werden.

Die **RED II** beschränkte sich zunächst auf den Verkehrssektor und definierte zwei grundlegende Anforderungen: Erstens muss der Energieträger vollständig erneuerbar sein, wodurch z.B. "blauer Wasserstoff" aus Erdgas ausgeschlossen wird. Zweitens scheidet Biomasse als Energieträger für die Stromerzeugung¹⁰ sowie als Rohstoff aus. Zudem ist eine THG-Emissions-Mindesteinsparung von 70% gegenüber dem fossilen Vergleichswert erforderlich.

Die **RED III** erweitert den Anwendungsbereich erheblich. Die Beschränkung auf bestimmte Verkehrskraftstoffe entfällt¹¹, und die Regelungen gelten nun zusätzlich auch für Brennstoffe für die Strom- oder Wärmeproduktion. Zusätzlich werden ambitionierte Quoten für die Industrie eingeführt: 42% des industriell genutzten Wasserstoffs müssen 2030 erneuerbar sein. Ab 2035 steigt dieser Mindestanteil auf 60 %. Nicht anzurechnen ist dabei Wasserstoff der z. B. in Raffinerien zum Zweck der Hydrierung von fossilen Kraftstoffen und Biokraftstoffen eingesetzt wird. Die kombinierte Quote für fortschrittliche Biokraftstoffe und RFNBO soll 2025 1% und bis 2030 5,5% des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor erreichen.

2.2 Technische Anforderungen – Grünstrom-Kriterien

Die Delegierte Verordnung (EU) 2023/1184 beinhaltet eine **Unionsmethode** mit Anforderungen an den Strom der für die Erzeugung von RFNBO eingesetzt werden kann. Diese sogenannten „Grünstrom-Kriterien“ regeln unter welchen Bedingungen Strom als vollständig erneuerbar gilt. Sie sind angesichts der hochdiversen Ausgangslagen in der Praxis entsprechend komplex, um einerseits sinnvolle Konstellationen von Strom- und RFNBO-Erzeugung zu ermöglichen und gleichzeitig Fälle der Nutzung nicht zusätzlichem EE-Stroms auszugrenzen.

Direktanschluss: Die einfachste Option besteht im direkten Anschluss der Elektrolyseanlage an eine erneuerbare Energieanlage ohne Netzverbindung. Die EE-Anlage darf frühestens 36 Monate vor der RFNBO-Anlage in Betrieb genommen werden.

⁷ RED: Renewable Energy Directive, ausgehend von der ersten Fassung (Richtlinie 2009/28/EC des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009

⁸ RED II: Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018

⁹ RED III: Richtlinie (EU) 2023/2413 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Oktober 2023

¹⁰ Wobei die Bestimmung der Zusätzlichkeit der EE-Anlagen gemäß Delegierter Verordnung (EU) 2023/1184 bei Bezug von Strom mit mehr als 90% EE-Anteil entfällt, worauf in diesem Papier eingegangen wird.

¹¹ Die RED III enthält Ermächtigungsgrundlagen, die Nachhaltigkeitskriterien auf andere Sektoren als den Verkehrsbereich auszuweiten, der formale Schritt der Umsetzung steht jedoch noch aus.

Netzbezug: Bei Strombezug aus dem Netz gelten komplexe Kriterien für den Strommix¹² der Gebotszone¹³, an die Vertragsgestaltung mittels Power Purchase Agreements (PPA), an die zeitliche und geografische Korrelation, sowie den Sonderfall, dass der für die Erzeugung von RFNBO verwendete Strom die Notwendigkeit des Redispatch¹⁴ um eine entsprechende Menge nachweislich verringert hat.

THG-Bilanzierung: Die Delegierte Verordnung (EU) 2023/1185 definiert Regeln zur Berechnung der THG-Einsparung von RFNBO anhand einer Formel. Unterschieden wird zwischen „elastischen“ und „starren“ CO₂-Quellen. Von diesen Emissionen ist die Emission abzuziehen, die auch ohne Nutzung des CO₂ stattfinden würde. Alle nicht in der Verordnung explizit gelisteten CO₂-Quellen können das geforderte Kriterium von 70 % Einsparung kaum erfüllen. Mit auf der Liste befindet sich u. a. die Quellengruppe, die im Rahmen des ETS der vollständigen Bepreisung unterliegt. Deren Emissionen werden bis zum Jahr 2035 so bewertet, als würden diese Emissionen sowieso stattfinden. Darunter fallen Kohlekraftwerke, Zementwerke und andere große Quellen fossiler CO₂-Emissionen.

2.3 Kritische Aspekte und identifizierte Fehlstellen

Trotz umfangreicher Regelungen bestehen Lücken und Unsicherheiten:

- ▶ **Übergangsregelungen:** Für Anlagen, die bis Ende 2027 in Betrieb gehen, gelten Zusätzlichkeitsanforderungen erst ab 2038. Dies schwächt den Anreiz für zusätzliche EE-Anlagen erheblich.
- ▶ **Lücke zwischen Zielen und Ausbau:** Es besteht ein Widerspruch zwischen strategischen Zielen, Quotenpflichten und Prognosen zum Hochlauf. Aus der RED III ergibt sich ein Wasserstoff-Bedarf von 24,2 TWh in 2030¹⁵, während die Bundesregierung 95-130 TWh erwartet¹⁶. Diese Ausbauplanung führt zu einer Abdeckung eines großen Anteils der RFNBO-Quote in 2030, der dann gemäß der Übergangsregel nicht mit zusätzlichem erneuerbarem Strom produziert werden muss
- ▶ **Regionalitätskriterien:** Die Definition der Gebotszonen entspricht weitgehend nationalen Grenzen, was bei großen Ländern wie Deutschland praktische Nachweisschwierigkeiten schafft. Eine Elektrolyseanlage in Süddeutschland kann theoretisch mit Offshore-Wind aus der Nordsee versorgt werden, obwohl dies physikalisch problematisch ist.
- ▶ **Biomasse-Inkonsistenz:** Es ist nicht klar ersichtlich, ob die Anforderungen bezüglich vollständiger Erneuerbarkeit nur für den Strom des Elektrolyseurs (also den Wasserstoff) gelten oder für die komplette Produktion eines strombasierten Kraftstoffs.¹⁷ Die Erfüllung vollständiger Erneuerbarkeit durch niedrige CO₂-Intensität (< 18 g CO₂-Äq./MJ) bevorzugt

¹² Mindestanteil an EE-Strom von 90 % oder Emissionsintensität unter 18 g CO₂-Äq./MJ,

¹³ „Gebotszone“ bezeichnet das größte geografische Gebiet, in dem Marktteilnehmer ohne Kapazitätsvergabe Energie austauschen können; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0943&from=HR>

¹⁴ Redispatch: Eingriffe in die Erzeugungsleistung von Kraftwerken, um Leitungsabschnitte vor einer Überlastung zu schützen. Droht an einer bestimmten Stelle im Netz ein Engpass, werden Kraftwerke diesseits des Engpasses angewiesen, ihre Einspeisung zu drosseln, während Anlagen jenseits des Engpasses ihre Einspeiseleistung erhöhen müssen. BNetzA (2021)

¹⁵ RED III Artikel 22a (1): 42 % an RFNBO zur Substitution von H₂ im Industriesektor in 2030 = ca. 17,8 TWh H₂
RED III Artikel 25 (1) b: 1 % RFNBO am Endenergieverbrauch im Verkehr in 2030 = ca. 6,4 TWh H₂
Summe: 24,2 TWh H₂.

¹⁶ Bundeswirtschaftsministerium (2023)

¹⁷ Nach den Aussagen der EU Kommission in den Q&A zu den Delegierten Rechtsakten gilt die THG-Methodik für jeden Verarbeitungsschritt entlang der Kette. Aus der Antwort wird dennoch nicht ganz klar, ob der Einsatz von EE, wie sie explizit für den Schritt der Wasserstoffproduktion (Elektrolyse) gilt, auch für seitliche Vorprozesse (z.B. Meerwasserentsalzung) vorgeschrieben ist. Siehe (Europäische Kommission, 2024)

Länder mit hohem Kernenergie- oder Biomasseanteil, obwohl Biomasse für RFNBO ausgeschlossen ist. Für diese Länder entfällt die Bedingung der Zusätzlichkeit.

- **Fehlende umfassende Nachhaltigkeitskriterien:** Eine zentrale Fehlstelle ist die Beschränkung auf THG-Kriterien. Andere Umweltaspekte wie Flächennutzung, Biodiversitätsverluste oder Wasserstress bleiben unberücksichtigt. Für Bioenergie existieren bereits entsprechende Schutzkriterien in der RED, die auf PtGLS übertragen werden könnten.
- **Festschreibung des Minderungsziels von 70 %:** Eine THG-Minderung von 70 % ist zwar förderlich für das Erreichen von Zwischenzielen (z. B. 2030, 2035), ist jedoch für die angestrebte THG-Neutralität nicht ausreichend. Konsequenter wäre, eine allmählich ansteigende verpflichtende THG-Minderung festzuschreiben.

2.4 Exemplarische Berechnung anhand von drei Fallbeispielen

Anhand von Beispielrechnungen werden drei Prozesspfade zur Herstellung von RFNBO und den damit verbundenen Treibhausgasemissionen nach Berechnungsmethode der Delegierten Verordnung (EU) 2023/1185 durchgeführt und die Ergebnisse diskutiert. Ausgewählt werden

- Fall 1: grüner Wasserstoff aus einer Anlage in Deutschland, betrieben mit EE-Strom über Stromnetzbezug mit PPA.
- Fall 2: FT-Kerosin¹⁸ aus einer isoliert stehenden Anlage in Nordafrika mit fester Verbindung zu einer EE-Anlage ohne Netzanschluss.
- Fall 3: FT-Kerosin aus einer Anlage in Deutschland mit allgemeinem Netzstrom betrieben, um darzustellen, welche THG-Intensität resultiert, wenn der Emissionsfaktor aus dem Anhang Teil B der Delegierten Verordnung (EU) 2023/1185 verwendet werden muss. Dieser Netzstrom (mit noch immer hohen Anteilen an Graustrom) erfüllt als solcher auch nicht die Anforderungen der Delegierten Verordnung (EU) 2023/1184.

Die Ergebnisse zeigen, dass hohe Einsparwerte nur möglich sind, wenn die gesamte RFBNO-Prozesskette über EE-Strom versorgt wird, der den „Grünstromkriterien“ entspricht und wenn thermische Energie (Prozessdampf) aus dem integrierten Prozess selbst gewonnen und genutzt werden kann. Wenn energieintensive Schritte wie Elektrolyse oder CO₂-Abscheidung aus der Luft mit Netzstrom, der die Grünstromkriterien nicht erfüllt, betrieben werden, kann eine Einsparung von 70 % THG-Emissionen praktisch nicht erreicht werden.

Bei Verwendung von Netzstrom, der das Kriterium der geforderten Emissionsintensität <18 g CO₂ Äq./MJ erfüllt und folglich als treibhausgasneutral angerechnet werden darf, ergibt sich in der Beispielrechnung eine tatsächliche THG-Reduktion von lediglich 35%. Dies stellt eine der größten Inkonsistenzen der RED III dar.

2.5 Schlussfolgerungen zur regulatorischen Bewertung

RED III und die Delegierten Verordnungen stellen komplexe Anforderungen an Erneuerbarkeit des Stroms und THG-Intensitätsberechnung. Dennoch lassen sich erhebliche Fehlstellen identifizieren. Besonders das Fehlen von über THG-Emissionsminderung hinausgehenden Nachhaltigkeitskriterien ist hervorzuheben.

¹⁸ Durch die Technik der Fischer-Tropsch-Synthese hergestelltes Kerosin

Angesichts der Konzentration auf Klimaschutzanforderungen stellt sich die Frage, inwieweit diese dem Klimaschutz dienen. Kritisch ist die Gewährung erheblicher Erleichterungen für frühe Investitionen bezüglich erneuerbarer Stromverpflichtung zur Förderung eines schnellen Hochlaufs.

Die Anwendbarkeit der Kriterien außerhalb der EU wird die Praxis zeigen müssen. Das Kriterium THG-Minderung durch erneuerbaren Strom reicht für eine Nachhaltigkeitsbewertung nicht aus. Eine Orientierung können die RED-Nachhaltigkeitskriterien für Biomasse geben, wenngleich diese auf spezifische Wirkungsaspekte von RFNBO angepasst werden müssen.

3 Ökologisch nachhaltige Bereitstellung von (Pt)GLS-Produkten

Dieses Kapitel stellt zusammenfassend die Inhalte des Kurzpapiers *Fröhlich, T. et al. „Umweltwirkungen der Bereitstellung von strombasierten Energieträgern“* dar (Fröhlich et al. 2026). Es enthält die Ergebnisse zur Ermittlung der Umweltwirkungen verschiedener Prozesse und Prozesspfade mittels Ökobilanzen (LCA) sowie technische Maßnahmen zur Begrenzung ausgewählter, identifizierter Umwelteffekte.

3.1 Methodischer Rahmen der Ökobilanzierung

Die ökologische Bewertung von PtGLS-Produkten erfolgt mittels Lebenszyklusanalysen (LCA), die alle Prozessschritte von der Rohstoffgewinnung bis zur Endnutzung erfassen. Für insgesamt 56 Produktionspfade wurden detaillierte Ökobilanzen berechnet, ergänzt um 12 Zielszenarien in denen Zukunftstechnologien und Maßnahmen zur Minderung von Umweltwirkungen einbezogen wurden .

Die Analyse umfasst die folgenden Umweltwirkungskategorien:

- ▶ Treibhauspotenzial (Global Warming Potential)
- ▶ Versauerungspotenzial durch SO₂- und NO_x-Emissionen
- ▶ Eutrophierungspotenzial durch Nährstoffeinträge
- ▶ Ozonabbaupotenzial durch halogenierte Verbindungen
- ▶ Sommersmogbildung durch bodennahes Ozon
- ▶ Feinstaubbildungspotenzial
- ▶ Kumulierter Energieaufwand
- ▶ Wasserverbrauch und Flächenbeanspruchung
- ▶ Ressourcenerschöpfung (Mineralien und Metalle)

Als Referenzsystem dienen jeweils die entsprechenden fossilen Produkte mit etablierten Emissionsfaktoren. Die Systemgrenzen erstrecken sich von der Primärenergiebereitstellung bis zum fertigen Energieträger am Nutzungsort in Deutschland.

3.2 Untersuchte Produkte und Bereitstellungsprozesse

Die Studie fokussiert folgende Produkte:

- ▶ Wasserstoff (grün, blau, türkis): „Grüner“ Wasserstoff wird mittels Elektrolyseanlagen hergestellt. Modelliert werden alkalische Elektrolyse (AEL) und Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEM). Für „blauen“ Wasserstoff wird Methanreformierung mit anschließender CO₂-Abscheidung (CCS) modelliert. „Türkiser“ Wasserstoff wird durch Methanpyrolyse hergestellt.
- ▶ Ammoniak, basierend auf grünem oder blauem Wasserstoff, hergestellt mittels Haber-Bosch-Verfahren
- ▶ Methan bzw. Synthetisches Erdgas (SNG), basierend auf grünem Wasserstoff und CO₂

- ▶ Methanol, basierend auf grünem Wasserstoff und CO₂
- ▶ Dimethylether (DME), basierend auf grünem Wasserstoff und CO₂, hergestellt aus Methanol
- ▶ Benzin/Diesel/Kerosin/Naphtha, basierend auf grünem Wasserstoff und CO₂, hergestellt über Fischer-Tropsch-Synthese oder über Methanol-to-Gasoline (für Benzin)

Die Erzeugung der PtGLS-Produkte erfolgt unter Verwendung erneuerbarer Energiequellen. Betrachtet werden Windkraftanlagen, Freiflächen-Photovoltaik und konzentrierende Solarkraftwerke. Für die Modellierung werden länder- und regionenspezifische EE-Strommixe sowie Netzstrommixe herangezogen.

Für kohlenstoffbasierte PtGLS-Produkte wird CO₂ mittels Direct Air Capture (DAC) aus der Luft bereitgestellt. Weitere betrachtete CO₂-Quellen sind Zementwerke, Müllverbrennungsanlagen und Biogasanlagen. Transportoptionen umfassen Pipeline-Transport, Schiffstransport von Derivaten und Transport in chemischen Trägermolekülen (Ammoniak, DME und LOHC).

Der Bau sowie der Rückbau der Anlagen zur Produktion der PtGLS-Produkte werden in der Betrachtung der Umweltwirkungen berücksichtigt, ebenso die verwendeten Katalysatoren. Die Materialbedarfe werden verteilt auf die Gesamtmenge an Produkt, die über die Lebensdauer der Anlage hergestellt wird.

Für jeden Produktionsschritt wurden aus der Literatur Prozessdaten zusammengetragen, die als Datensätze in die ökobilanzielle Betrachtung integriert wurden und die in tabellarischer Form bereitgestellt werden.

3.3 Prozessketten zur Herstellung von PtGLS-Produkten

Aus den verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten wurden für insgesamt 56 Pfade zur PtGLS-Herstellung Ökobilanzen berechnet. Die Prozessketten umfassen Bereitstellung von Rohmaterialien und Strom/Wärme, Wasserstoffsynthese, gegebenenfalls Umwandlung in Derivate, Transport nach Deutschland sowie gegebenenfalls Rückumwandlung zu Wasserstoff.

Von den 56 Pfaden wurden sechs als Basisfälle festgelegt und 50 Pfade als Variationen mit Änderungen einzelner Prozessglieder ergänzt. Für die Umsetzung von Maßnahmen zur Minderung von Umwelteffekten wurden zwölf weitere Zielszenarien abgebildet und berechnet.

Die Analyse identifiziert Faktoren, die maßgeblich die Umweltwirkungen bei der Bereitstellung synthetischer Energieträger beeinflussen. Dabei werden mögliche Zielkonflikte zwischen unterschiedlichen Wirkungskategorien identifiziert – etwa, wenn niedrige Treibhausgasemissionen mit höheren Umweltbelastungen in anderen Bereichen einhergehen.

3.4 Klima- und Umwelteffekte der PtGLS-Produkte

Die Analyse der Ökobilanzberechnungen zeigt, welche Faktoren maßgeblich die Umweltwirkungen bei der Bereitstellung synthetischer Energieträger auf Basis erneuerbarer Energien beeinflussen. Dabei werden auch mögliche Zielkonflikte zwischen unterschiedlichen Wirkungskategorien identifiziert – etwa dann, wenn niedrige Treibhausgasemissionen mit höheren Umweltbelastungen in anderen Bereichen einhergehen. Im Mittelpunkt steht die Bewertung der Klimawirkung synthetischer Energieträger und die Frage, inwieweit sie gegenüber fossilen Referenzprodukten ökologische Entlastungen bieten.

3.4.1 Klimawirkung:

Für Ammoniak, Methanol, DME und Fischer-Tropsch-Kraftstoffe lässt sich in den betrachteten Basisfällen eine Reduktion der Klimawirkung um etwa 80% erreichen. Für synthetisches Erdgas ist eine Reduktion um 60% möglich. Für Wasserstoff, der im Transportmedium Ammoniak verschifft wird, kann die Klimawirkung um etwa 50% sinken – wenn erneuerbarer Strom auch zur Ammoniaksynthese eingesetzt wird und die treibhauswirksamen Schiffsemissionen, insbesondere N_2O , minimiert sind.

Die Nutzung von „Graustrom“ (Netzstrom mit nicht-erneuerbaren Anteilen) verschlechtert die Klimabilanz in allen Prozessschritten erheblich. Da die Lasten des erneuerbaren Stroms in den meisten Basisfällen 40-60% der Klimawirkung ausmachen, hat die Wahl der erneuerbaren Stromquelle grundlegenden Einfluss. Windkraft zeigt die niedrigste Klimawirkung mit geringen Standortunterschieden. Photovoltaik zeigt größere Standortunterschiede und liegt zwei- bis dreimal so hoch wie Windstrom.

Transportoptionen:

Für Wasserstoff zeigt der Pipeline-Transport die geringste Klimawirkung. Transporte mit LOHC und DME als Transportmedium liegen deutlich höher. Ammoniak als Transportmedium kann mit Pipeline-Transport mithalten, jedoch nur bei erneuerbarer Stromversorgung der NH_3 -Synthese.

Alternative Wasserstoffproduktion:

Der Import von „blauem“ und „türkischem“ Wasserstoff mit Ammoniak als Transportmedium führt zu Klimawirkungen, die kaum besser oder sogar schlechter sind als fossile Referenzen. Hauptgründe sind Treibhausgasemissionen in der Erdgasbereitstellung und CO_2 -Emissionen in der Reformierung. Die Herstellung von „blauem“ Wasserstoff in Deutschland könnte hingegen die Klimawirkung um 40-70% senken. Voraussetzung für eine möglichst starke Reduktion ist der Import von Erdgas mit geringen Vorlasten und der Einsatz des Verfahrens mit möglichst hoher CO_2 -Abscheidequote. Nicht einbezogen sind der Volumenbedarf zur Speicherung (CCS) sowie mögliche Leckagen und Austritte von CO_2 aus den Speicherstätten.

3.4.2 Weitere Umweltwirkungen

Im Gegensatz zum Treibhauspotenzial zeigen die meisten Bereitstellungspfade in anderen Wirkungskategorien deutlich höhere Umweltbelastungen im Vergleich zu fossilen Referenzen:

Versauerung: Insbesondere ammoniak-basierte Pfade schneiden sehr schlecht ab. Grund sind Emissionen von Schwefeldioxid, Stickoxiden und Ammoniak in Hintergrundprozessen. Weniger ausgeprägt gilt das auch für die Bereitstellung von synthetischem Erdgas und der flüssigen Energieträger Methanol, DME und Fischer-Tropsch-Kraftstoffe.

Eutrophierung: Alle synthetischen Energieträger führen zu vielfach erhöhter Überdüngung gegenüber fossilen Referenzen durch Ammoniak- und Stickoxidemissionen.

Ozonabbaupotenzial: Nur Methanol und DME sind etwas besser als fossile Referenzen. Fischer-Tropsch-Kraftstoffe sind ozonschädlicher als fossiler Diesel durch Tetrafluorethylen in der Elektrolyseur-Membranproduktion.

Sommersmogpotenzial: Die Bereitstellung von synthetischem Erdgas und Wasserstoff über das Transportmedium Ammoniak schneidet sehr schlecht ab. Grund sind Emissionen von Schwefeldioxid, Stickoxiden und Ammoniak in Hintergrundprozessen. Ammoniak, Methanol, DME und Fischer-Tropsch-Kraftstoffe liegen hingegen deutlich unter der jeweiligen fossilen Referenz.

Feinstaubemissionen: Alle synthetischen Energieträger liegen erheblich über denen der jeweiligen fossilen Referenz durch Emissionen von Stickoxiden aus Infrastruktur und Transportprozessen. Bereitstellungspfade mit Ammoniak führen über NH_3 -Emissionen zu einem hohen Feinstaubpotenzial.

Flächenbedarf: Die hemerobiegewichtete Landnutzung liegt 20-30-fach höher als bei fossilen Produkten durch EE-Anlagen-Flächenbedarf.

Wasserverbrauch: Entsteht hauptsächlich im Hintergrundsystem durch fossile Stromerzeugung und Infrastruktur. Im Vordergrundsystem dominiert der Kühlwasserbedarf für Elektrolyse, während der Süßwasserbedarf vergleichsweise gering ist.

Ressourcenbedarf: Deutlicher Anstieg des Bedarfs an Mineralien und Metallen durch den Bau von Stromerzeugungs- und Syntheseanlagen.

3.5 Möglichkeiten zur Minderung von Umwelteffekten

Aus den identifizierten Umweltbelastungen wurden Maßnahmen abgeleitet, um die Umwelteffekte weiter zu mindern. Insgesamt führen sie in den meisten Fällen zu einer Verbesserung der Umweltbilanz; nur vereinzelt treten geringfügige Zielkonflikte auf. Die wichtigsten Maßnahmen und deren Auswirkungen sind:

- ▶ Die **regenerative Stromversorgung** aller Prozesse entlang der Wertschöpfungskette (ATR/SMR, NH_3 -Synthese, NH_3 - und LOHC-Spaltung, Gasleitungstransport, etc.), auch zur Wärmeversorgung, ist wichtig für die Reduktion der Klimawirkung. Die Energiewende ist dabei eine Grundvoraussetzung dafür, dass neben der Elektrolyse auch alle anderen Prozesse mit erneuerbarem Strom betrieben werden können.
 - Insbesondere die Versorgung der Derivatsynthese und ggf. deren Rückumwandlung mit erneuerbarem Strom anstelle von Graustrom und fossiler Wärme führt zu großen Verbesserungen in den Kategorien Klimawandel, Versauerung und Eutrophierung.
 - Auch der Betrieb von Gasfernleitungen und -distributionsnetzen mit EE-Strom führt zu Verbesserungen, insbesondere wenn der im Basisfall verwendete Netzstrom hohe fossile Anteile enthält.
 - Die direkte Nutzung von erneuerbarem Strom in Anlagen zur Verflüssigung von SNG ist effektiver als der Betrieb mit Gasturbinen, in denen das zuvor hergestellte SNG verbrannt wird. So werden Lasten in der SNG-Synthese reduziert.
 - **Die Nutzung von erneuerbarem Strom in allen Prozessen führt zusätzlich zu einer Verringerung der Umweltwirkungen in allen anderen Kategorien** außer in der hemerobiegewichteten Landnutzung, bei der geringfügig höhere Belastungen entstehen.
- ▶ Die Nutzung von kohlenstoffbasierten **PtGLS-Produkten als Treibstoff** beim Schiffstransport führt zu Einsparungen in der Klimawirkung von 5–20 %, abhängig von Transportdistanz und Energieträger. Gleichzeitig werden die Emissionen von SO_2 durch den Ersatz von Schweröl eliminiert, so dass sich die Belastung aus dem Transport auch in den Kategorien Versauerung, Sommersmog und Feinstaub verringert. Der zusätzliche Strombedarf für die Herstellung des PtGLS-Kraftstoffes verringert diesen Effekt, kehrt ihn aber nicht ins Negative um. Durch den zusätzlichen Strombedarf entstehen negative Effekte in den Kategorien Kumulierter Energieaufwand und Landnutzung, die jedoch prozentual klein sind im Vergleich zu den Entlastungen in den anderen Kategorien.

- ▶ In allen Prozessen, die **Ammoniak** herstellen oder nutzen, ist eine effektive Abgasnachbehandlung zur Eliminierung von Emissionen von Stickoxiden und Ammoniak in die Luft wichtig.
 - Durch Einsatz von selektiver katalytischer Reduktion (SCR) bei der Abgasnachbehandlung in den Prozessen zur Herstellung und Spaltung von Ammoniak können die Emissionen von NO_x und NH₃ effektiv reduziert werden. Das führt zu Reduktionen der Umweltwirkungen dieser Prozesse in den Kategorien Versauerung, Eutrophierung, Sommersmog und Feinstaub in Höhe von 70–90 %.
- ▶ Die Nutzung von **Ammoniak als Treibstoff** ist mit dem heutigen Wissensstand kritisch zu sehen:
 - Nach aktueller Datenlage entstehen in NH₃-betriebenen Schiffsmotoren klimaschädliche N₂O-Emissionen, die die Einsparung der fossilen CO₂-Emissionen bei Verbrennung von Schweröl überkompensieren und zu höheren Klimawirkungen führen können. Es besteht eine Unsicherheit in den verwendeten Emissionsdaten, weil Ammoniakmotoren bislang noch nicht im Einsatz sind. Um die Umweltwirkung auf ein Maß zu bringen, das vergleichbar ist mit den anderen Transportwegen, sind die Vermeidung von Ammoniak-Schlupf sowie eine effektive Abgasreinigung (SCR) unbedingt notwendig.
 - Als Alternative bietet sich an, beim Transport von Ammoniak kohlenstoffbasierte PtGLS-Produkte als Treibstoff zu verwenden.
- ▶ Der Einsatz von **Meerwasserentsalzung** zur Gewinnung von Prozesswasser für die Elektrolyse führt zu einer deutlichen Einsparung von Süßwasser in der Wasserstoff-Erzeugung. Der zusätzliche Strombedarf liegt bei etwa 0,1 % bezogen auf den Strombedarf der Elektrolyse. Entsprechend gibt es geringfügig höhere Umweltwirkungen in allen Kategorien. Bei der Meerwasserentsalzung entstehen prozessbedingt Emissionen von SO₂, die zu einer leichten Erhöhung der Umweltlasten in den Kategorien Versauerung, Sommersmog und Feinstaub führen. Eine Quantifizierung von Umweltlasten, die durch Einleitung der Sole, der Störung der Biodiversität im Meerwasser oder durch Antifouling- und Desinfektionsmittel entstehen können, wurde in dieser Studie nicht durchgeführt.
- ▶ Die Verwendung von **alternativen Membranmaterialien**, für die keine halogenierten Kohlenwasserstoffe eingesetzt werden, z. B. Polysulfon-Membranen, reduziert den Beitrag zum Ozonabbau deutlich und hat keine festgestellten negativen Effekte in anderen Wirkungskategorien.
- ▶ Die Nutzung von **elektrisch betriebenen Lkw**, die mit regenerativem Strom zur Distribution der PtGLS-Produkte in Deutschland versorgt werden, führt zu einer Reduktion der Klimawirkung im Transport. Die Herstellung des Lkw, insbesondere der Batterie können jedoch zu hohen zusätzlichen Lasten in den Kategorien Ressourcenbedarf und Wasserbedarf sowie zu geringer Erhöhung der Belastungen in den Kategorien Eutrophierung, Ozonabbau und Feinstaub führen.
- ▶ Bei der Herstellung von „**blauem**“ **Wasserstoff** sind einige Maßnahmen notwendig, die insbesondere die Klimawirkung stark reduzieren können:
 - Die **Minimierung von Methanverlusten** bei Förderung, Transport und Speicherung von Erdgas ist von entscheidender Bedeutung für die Klimawirkung. Dies wurde bereits anhand der unterschiedlichen Klimabelastungen von Erdgas aus verschiedenen Produktions-

ländern gezeigt. Die Produktionsbedingungen können zu einer Variation der Klimawirkung von „blauem“ Wasserstoff um einen Faktor von mehr als zwei führen.

- Bei der Auswahl der Reformertechnik ist das Verfahren der **autothermen Reformierung (ATR)** in Bezug auf die Möglichkeiten zur CO₂-Abscheidung der Dampfreformierung (SMR) vorzuziehen. Durch die Energieerzeugung innerhalb des Reaktors entsteht bei der ATR nur ein einziger CO₂-haltiger Abgasstrom. Dadurch können höhere Abscheideraten erreicht werden, wodurch die Klimawirkung reduziert wird.
- Ein möglichst **hoher Abscheidegrad für CO₂** aus dem Produktstrom des Reformers ist zusätzlich wichtig für eine niedrige Klimawirkung. Ziel sollte ein Abscheidegrad von 98 % (oder höher) sein.
- Die **dauerhafte Speicherung des abgeschiedenen CO₂** ohne Leckagen oder Austritte durch Unfälle oder andere Ereignisse ist wesentliche Grundvoraussetzung dafür, dass „blauer“ Wasserstoff die gezeigten niedrigen Klimawirkungen erreicht. Die Einspeicherung benötigt geeignete Lagerstätten, die nur in begrenztem Umfang verfügbar sind. Diese sind über Jahrtausende nachzubetreuen und der Speicherraum schließt alternative Nutzungen (Rohstoffgewinnung, tiefe Geothermie, Windenergieanlagen, etc.) auf unbestimmte Zeit (mehrere zehntausend Jahre) aus.
- Zusätzliche Reduktionen in der Klimawirkung sind durch die Versorgung aller Prozesse mit regenerativem Strom erreichbar mit den zusätzlichen reduzierten Umweltwirkungen in anderen Kategorien wie oben beschrieben.
- Nur durch die **Kombination aller dieser optimistischen Rahmenbedingungen** kann erreicht werden, dass „blauer“ Wasserstoff ähnlich niedrige Klimawirkungen erzielt wie „grüner“ Wasserstoff. In vielen Fällen wird die Herstellung von „blauem“ Wasserstoff höhere Umweltwirkungen haben, als die in dieser Studie gezeigten optimalen Ergebnisse.

Die in dieser Studie untersuchten Maßnahmen zielen auf direkte Änderungen in den sogenannten Vordergrundprozessen ab, sind also Maßnahmen, die Betreiber von Anlagen direkt umsetzen können, bzw. Händler von PtGLS-Produkten, Behörden oder Zertifizierungsstellen entlang der Prozesskette für PtGLS-Produkte einfordern können. Dabei wird eine Untergrenze bei den Klimawirkungen im Bereich von 14–24 g CO₂-Äq / MJ erreicht. Da die verbleibenden Umwelteffekte aus dem sogenannten Hintergrundsystem stammen, sind sie durch Maßnahmen an den Prozessketten zur Herstellung von PtGLS-Produkten selbst nicht adressierbar. Um diese Umwelteffekte anzugehen, müssen Prozesse im Hintergrundsystem defossilisiert und auch in anderen Aspekten verbessert werden. Maßgeblicher Treiber hierfür ist der Ausbau von erneuerbaren Energien, bzw. die Steigerung des EE-Anteils im Strommix.

4 Optionen und Potenziale für die Nutzung von biogenem CO₂ für die Herstellung von strombasierten erneuerbaren Energieträgern

Dieses Kapitel stellt zusammenfassend die Inhalte des Kurzpapiers *Münter, D. et al. „Optionen und Potenziale für die Nutzung von biogenem CO₂ für die Herstellung von strombasierten erneuerbaren Energieträgern“* dar (Münter et al. 2025). In diesem Kurzpapier wird analysiert, welche technischen Optionen für die Nutzung von biogenem CO₂ bestehen, welche Potenziale global vorhanden sind und wie die Nachhaltigkeit zu bewerten ist.

Für die Herstellung kohlenstoffhaltiger PtGLS-Produkte wird neben Wasserstoff eine Kohlenstoffquelle benötigt. In dieser Studie wird Direct Air Capture (DAC) als Referenztechnologie angenommen, allerdings erfüllt der technische Reifegrad von DAC die industriellen Anforderungen noch nicht und ist mittelfristig mit hohen Kosten verbunden. Daher werden biogene CO₂-Quellen als Alternativen diskutiert. Da allerdings der Anbau bzw. die Bereitstellung von Biomasse – vor allem durch den Flächenbedarf und die damit einhergehenden Landnutzungsänderungen – zu erheblichen Umweltschäden führen kann, ist die Nutzung von biogenen Abfall- und Reststoffen zu bevorzugen.

4.1 Technische Optionen und Potenziale biogener CO₂-Quellen

Aus der Literatur wurden Daten zu globalen biogenen Reststoffpotenzialen zusammengestellt und technische Prozesse zur Nutzung als CO₂-Quelle beschrieben:

Verfügbare biogene Materialien:

- Holzabfallstoffe aus Forst- und Sägewerksresten
- Agrarreststoffe wie Stroh und Ernterückstände
- Organische Abfälle aus Haushalts- und Gewerbesammlung
- Gülle und Festmist aus der Tierhaltung

Diese können biochemisch oder thermochemisch umgesetzt werden.

Unter den Prozessen, die Anbaubiomasse umsetzen unter Erzeugung größerer CO₂-Mengen sind die Ethanolherstellung und Zellstofffabriken von globaler Bedeutung.

Mengenpotenziale:

Für kommerzielle PtGLS-Produktion sind große CO₂-Mengen erforderlich: 5-50 Kilotonnen pro Jahr für kleine Anlagen, mehrere Megatonnen für mittlere bis große Anlagen. Diese Mengen sind nur an Standorten mit großen Punktquellen verfügbar.

Von den untersuchten Quellen sind aufgrund großer lokaler CO₂-Mengen insbesondere industrielle Prozesse der Ethanolherstellung und Zellstofferzeugung sowie Biomassekraftwerke und thermische Abfallbehandlungsanlagen geeignet. Biogasanlagen sind eher kleinmaßstäblich verfügbar und nur für kleinskalige PtGLS-Produktion geeignet.

4.2 Nachhaltigkeitsbewertung biogener CO₂-Quellen

Die Nachhaltigkeitsbewertung berücksichtigt Konflikte mit bereits bestehenden Nutzungspfaden, wenn Abfall- oder Reststoffe ersetzt werden müssen. Ein Beispiel ist die

Nutzung von Holzresten in der Spanplattenproduktion. Würde diese Biomasse in Kraftwerke umgeleitet, könnte dies zu erhöhtem Primäreinschlag für Spanplattenproduktion führen.

CO₂-Abscheidung benötigt meist Wärme und/oder Strom. Wird diese bestehenden Märkten entzogen, muss die Versorgung durch andere Energiequellen ausgeglichen werden, was zu zusätzlichen Emissionen führt.

Sektorale Bewertung:

Ethanolherstellung und Biomassekraftwerke sind aus Nachhaltigkeitsaspekten kritisch zu sehen. Beide lassen sich mit biogenen Abfall- und Reststoffen nutzen, werden heute aber in großen Anlagen überwiegend mit Anbaubiomasse oder Waldholz betrieben. Ein weiterer Ausbau ist aufgrund der meist in Monokultur angebauten Rohstoffe, negativer Umweltwirkungen und schwindender Waldsenken nicht wünschenswert.

Thermische Abfallbehandlung und Zellstofffabriken erscheinen als Optionen mit kurz- und mittelfristig geringsten Nachteilen bei signifikanten ungehobenen Potenzialen. Ein Anreiz zur globalen Produktionsausweitung durch CO₂-Nutzung ist auf dem Zellstoffmarkt nicht zu erwarten. Eine Ausweitung der thermischen Abfallbehandlung könnte positive Effekte haben, wenn organische Abfälle nicht mehr in einfachen Deponien Methan freisetzen.

4.3 Konkurrierende Nutzungen

Für die betrachteten biogenen Rest- und Abfallstoffe sowie das in Prozessen erzeugte CO₂ gibt es alternative Nutzungspfade. Welcher unter Umweltgesichtspunkten vorteilhaft ist, kann nur durch detaillierte Betrachtung bezogen auf Substrate, Prozesse und Standorte ermittelt werden.

Die Nutzung von biogenem CO₂ aus größeren Punktquellen zur PtGLS-Herstellung konkurriert global mit Planungen zur Abscheidung und dauerhaften Speicherung (Sequestrierung) von CO₂.

Viele biogene Reststoffe werden bereits genutzt, und alternative Nutzungspfade zur Biomasseverbrennung sind oft ökologisch vorteilhafter. Eine Beschränkung auf biogene Abfall- und Reststoffe müsste mit erweiterten Nachhaltigkeitskriterien verbunden werden, um negative Umweltwirkungen auszuschließen.

Während einzelne Großanlagen kurzfristig realisierbar sind, ist eine massive Ausweitung biogener CO₂-Nutzung durch Nachhaltigkeitsgrenzen und Konkurrenzen beschränkt. DAC bleibt langfristig die skalierbarste Option.

5 Nachhaltige Bereitstellung von (Pt)GLS-Produkten in ausgewählten Ländern außerhalb Europas

Dieses Kapitel stellt zusammenfassend die Inhalte des Kurzpapiers *Beaucamp, L. et al. Kriterienentwicklung für die nachhaltige Bereitstellung von PtGLS-Produkten* (Beaucamp et al. 2026) dar. Das Kurzpapier untersucht die nachhaltige Bereitstellung von PtGLS-Produkten aus Nicht-EU-Ländern. Hierzu wurde ein umfassender Kriterienkatalog erarbeitet und die Situation hinsichtlich der Kriterien in verschiedenen Ländern exemplarisch auf Basis internationaler Indizes vergleichend dargestellt. Zusätzlich wurde analysiert, inwieweit bestehende Instrumente die im Kriterienkatalog abgebildeten Nachhaltigkeitsdimensionen abdecken und welche Lücken diese Instrumente bei der Nachhaltigkeitssicherung aufwiesen.

Ziel der in diesem Kurzpapier durchgeführten Arbeiten ist die Entwicklung eines methodischen Ansatzes, der eine auf nachhaltige Entwicklung zielende Einordnung von möglichen Exportländern für PtGLS-Produkte erlaubt. Hierdurch sollen Länder für weitere Untersuchungen ausgewählt werden können, die unterschiedliche Ausgangssituationen in Hinblick auf die gegenwärtige sozio-ökonomische Situation im Land sowie hinsichtlich der geografischen Lage aufweisen. Grundlage des methodischen Ansatzes ist die Zusammenstellung von Kriterien, die im Kontext einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft und eines nachhaltigen und fairen globalen Wasserstoffhandels relevant sind. Durch die Darstellung der Kriterienausprägung in einer 5-stufigen Farbskala werden Aspekte hervorgehoben, die im Falle einer Zusammenarbeit mehr Aufmerksamkeit in Bezug auf Nachhaltigkeit bedürften. Die Zusammenstellung von Kriterien stellt zudem einen Ausgangspunkt für die Auswahl und Bewertung von vier betrachteten Instrumenten dar, die Nachhaltigkeitsanforderungen potentiell auf unterschiedlichen Ebenen verankern könnten. Die anschließende Lückenanalyse zeigt zuletzt mögliche Lücken auf, die weitere regulative Schritte benötigen, um zu versichern, dass Wasserstoffpartnerschaften und -projekte mindestens keine negativen Auswirkungen, sondern idealerweise positive Auswirkungen auf die Exportländer haben.

5.1 Methodischer Ansatz: Kriterienkatalog und Instrumentenanalyse

Zu Beginn der Untersuchung wurde ein umfassender Kriterienkatalog für den Import von PtGLS-Produkten aus Nicht-EU-Ländern entwickelt. Ziel war die Einordnung potenzieller Exportländer hinsichtlich Nachhaltigkeit, orientiert an den fünf Dimensionen Soziales, Governance, Wirtschaft, Umwelt und Technisches. Dabei wurde auf die Agenda 2030 Bezug genommen.

Im zweiten Schritt erfolgte eine Vorauswahl an Ländern für weitere Untersuchungen. Die Auswahl orientierte sich an bestehenden Partnerschaften deutscher Ministerien mit Staaten außerhalb der EU. Es wurden Ausschlusskriterien (sogenannte „rote Linien“) innerhalb ausgewählter Kriterien, wie unter anderem Rechtsstaatlichkeit und Korruptionskontrolle definiert und damit die Anzahl an Ländern für weitere Analysen reduziert.

Für die verbliebenen Länder wurde eine Matrix¹⁹ erstellt, in der die Ausprägung der Kriterien auf einer fünfstufigen Farbskala für jede Dimension dargestellt ist. Diese Methode ermöglicht eine differenzierte Bewertung und hebt Bereiche hervor, die bei einer potenziellen Zusammenarbeit besondere Aufmerksamkeit erfordern. Exemplarisch wurden fünf Länder für PtGLS-Produkte und zwei für blauen Wasserstoff vertieft betrachtet.

Zur Überprüfung der Nachhaltigkeitssicherung wurden vier relevante Instrumente ausgewählt: das EU-Lieferkettengesetz, der Zertifizierungsmechanismus für nicht-biogene Kraftstoffe, die

¹⁹ Diese ist verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/dokument/laendermatrix>

Prinzipien der Welthandelsorganisation, sowie ein Musterabnehmervertrag des H2Global-Mechanismus. Die Instrumente wurden zunächst hinsichtlich der Präsenz von Nachhaltigkeitskriterien und -schlagwörtern durchsucht und anschließend detailliert auf ihre mögliche Wirkung in den verschiedenen Nachhaltigkeitsdimensionen analysiert, insbesondere ob eine Verschlechterung der Ausgangslage durch die betrachteten Instrumente verhindert, oder sanktioniert werden kann.

Abschließend wurde eine Lückenanalyse durchgeführt, um Defizite in der Abdeckung der Nachhaltigkeitskriterien durch die bestehenden Instrumente zu identifizieren.

5.2 Kriterienbasierte Bewertung und Herausforderungen der Nachhaltigkeit bei Wasserstoffpartnerschaften

Der entwickelte Kriterienkatalog umfasst 46 Kriterien verteilt auf die fünf Dimensionen Soziales, Governance, Wirtschaft, Umwelt und Technisches. Aufbauend auf den Kriterien wurden sieben rote Linien definiert. Sie beinhalten Grenzwerte in den Kriterien: Achtung der Menschenrechte, Rechtsstaatlichkeit, Korruptionskontrolle, Wasserstress und damit verbunden die Frage eines Meerzuganges, außerdem Gendergerechtigkeit und das Potential für erneuerbare Energien im Verhältnis zu einem zukünftigen, nationalen Elektrizitätsbedarf. Nach der Anwendung der roten Linien auf die ursprüngliche Länderauswahl von 77 Ländern blieben noch 35 Länder zur weiteren Analyse in allen übrigen Kriterien. Für den Export von PtGLS-Produkten wurden die Länder Australien, Pakistan, die Türkei, Uruguay und die Vereinigten Arabischen Emirate näher betrachtet und ihre Ausgangssituation hinsichtlich der Kriterien exemplarisch geschildert. Für den potentiellen Export von blauem Wasserstoff wurden der Oman und Algerien genauer betrachtet. Bei der Präsentation der sieben Länder wurde insbesondere auch auf schwächere Kriterien hingewiesen, die im Falle einer Zusammenarbeit gestärkt werden können, um eine langfristige, stabile und prosperierende bilaterale Beziehung im Kontext einer Wasserstoffpartnerschaft zu unterstützen. Der Kriterienkatalog wurde als Referenz zur Analyse der oben genannten Instrumente genutzt. Die Analyse zeigt, dass die betrachteten Instrumente Nachhaltigkeitsaspekte nur lückenhaft abdecken. Kriterien in der Dimension Soziales, wie Eigentumsrechte, Trinkwasserzugang und Ernährungssicherheit sind partiell integriert, während Fragen von Ungleichheit sowie Gesundheits- und Bildungssysteme weitgehend ausgeblendet bleiben. Governance- und ökonomische Kriterien finden nahezu keine Berücksichtigung. Umwelt Kriterien wie Wasserstress oder Biodiversität werden zwar aufgegriffen, jedoch ohne systematische Abdeckung. Technische Kriterien erscheinen außerhalb der klaren Definition von erneuerbaren, nichtbiologischen Kraftstoffen, lediglich randständig. Insgesamt manifestieren sich Lücken, die im Fall von Wasserstoffpartnerschaften besonderer Aufmerksamkeit bedürfen.

Darüber hinaus verweist die Analyse auf das strukturelle Problem divergierender Handlungsebenen. Nachhaltigkeit im Wasserstoffsektor wird durch internationale Regime, nationale Gesetzgebung und projektbasierte Verträge geprägt, wobei jede Ebene eigene Reichweiten- und Durchsetzungsgrenzen aufweist. Während internationale Abkommen wie die WTO schwache Sanktionsmechanismen besitzen, wirken nationale und projektbasierte Instrumente konkreter, bleiben jedoch begrenzt. Diese Asymmetrie und rechtliche Fragmentierung formaler Zuständigkeiten erzeugt Durchsetzungslücken zwischen normativem Anspruch und faktischer Umsetzung. Eine nachhaltige Ausgestaltung künftiger Wasserstoffpartnerschaften erfordert daher eine verstärkte und verbesserte Zusammenarbeit verschiedener Ebenen, flankiert durch regelmäßige Wirkungsanalysen sowie die institutionalisierte Beteiligung lokaler Bevölkerungsgruppen.

6 Überblick zur Kostenentwicklung von strombasierten erneuerbaren Energieträgern

Dieses Kapitel stellt zusammenfassend die Inhalte des Kurzpapiers *Schreck, S. „Überblick zur Kostenentwicklung von strombasierten erneuerbaren Energieträgern“* dar (Schreck 2025). Das Kurzpapier bietet einen umfassenden Überblick über die Kostenentwicklung ausgewählter strombasierter Energieträger bis 2050. Es stellt Ergebnisse verschiedener Studien mit Erscheinungsjahr von 2019 bis Februar 2024 übersichtlich dar, die Bereitstellungskosten von strombasierten Energieträgern analysieren.

6.1 Methodischer Ansatz der Kostenanalyse

Betrachtet werden die strombasierten grünen Energieträger Wasserstoff, Ammoniak, Methan, Methanol, Dimethylether und Fischer-Tropsch-Produkte wie Kerosin. Zusätzlich werden auch die fossil basierten Produkte blauer Wasserstoff und blauer Ammoniak betrachtet. Die Analyse ist in verschiedene Herstellungsregionen gegliedert: MENA-Region, Nord- und Südamerika, Subsahara-Afrika, Australien, Nordeuropa, Iberische Halbinsel, Deutschland sowie weitere europäische Länder.

Die Bereitstellungskosten setzen sich aus Produktions- und Transportkosten zusammen. Diese werden gesondert dargestellt, was eine differenzierte Betrachtung ermöglicht und den Einbezug einer größeren Anzahl von Studien erlaubt. Die Kosten umfassen alle Schritte entlang der Prozesskette: von der Energiebereitstellung über stoffliche Inputs bis hin zur Wasserstofferzeugung, Syntheseschritten, Umwandlung in transportable Form und Transport nach Deutschland.

6.2 Ergebnisse der Kostenanalyse

Die zusammenfassende Darstellung der Produktions- und Transportkosten zeigt eine große Bandbreite prognostizierter Kosten. Diese hängt stark von folgenden Faktoren ab: Verfügbarkeit erneuerbarer Energien, Produktionsregion, Technologiewahl sowie in den Studien getroffene Annahmen und Referenzwerte.

Die Analyse erlaubt einen direkten Vergleich der Ergebnisse verschiedener Studien, da die Ergebnisse auf eine einheitliche Kostenbasis ($\text{EUR}_{2022}/\text{MWh}_{\text{LHV}}$) normiert wurden. Zur Identifikation von Trends sollten aber aufgrund stark variierender methodischer Ansätze nur Ergebnisse innerhalb einzelner Studien verglichen werden.

Produktionskosten

Studien mit Bottom-Up-Simulationen, die Standorte mit vorteilhaften EE-Bedingungen bestimmen, weisen vergleichsweise geringe Produktionskosten aus. Studien mit Kostenannahmen für verschiedene EE- und Elektrolyse-Technologien zeigen höhere Produktionskosten und Kostenbandbreiten.

Selbst über hohe Bandbreiten hinweg ist eine deutliche Reduktion der Produktionskosten über die Jahre 2030, 2040 und 2050 in allen Regionen erkennbar. Grüner Wasserstoff weist die geringsten Produktionskosten auf. Wasserstoff-Derivate zeigen höhere Produktionskosten durch zusätzliche Anlagen- und Energiekosten für weitere Syntheseschritte.

Im regionalen Vergleich stellen sich die Iberische Halbinsel und MENA-Region als Regionen mit den geringsten Produktionskosten heraus.

Transportkosten

Die Kosten für Pipeline-Transport von Wasserstoff und Methan hängen stark von der Transportentfernung ab und steigen mit zunehmender Entfernung deutlich. Dies liegt an längeren Pipelines und höherem Energiebedarf für den Verdichterbetrieb. Der Schiffstransport zeigt eine schwache Entfernungsabhängigkeit, da unabhängig von der Entfernung der Großteil der Kosten durch Hafeninfrastruktur und Transportschiffe entsteht.

Für Wasserstoff folgt daraus: Für Transportentfernungen über ca. 5000 km wird Schiffstransport in Form von Flüssigwasserstoff oder Trägermolekülen günstiger als Pipeline-Transport.

Für reinen Wasserstoffimport bringt der Umweg über Derivate als Transportmolekül keine Kostenvorteile, da die Rückwandlung in Wasserstoff zusätzliche Kostenbeiträge verursacht. Anders gestaltet es sich bei direkter Derivat-Nutzung.

Kohlenstoffkosten

Die Kosten für Kohlenstoffbereitstellung sind aufgrund geringer Technologiereife der CO₂-Abscheidung aus der Luft (DAC) sowie an Punktquellen mit vielen Unsicherheiten behaftet. Abscheidung an Punktquellen erweist sich aktuell als kostengünstiger, jedoch kann der Einfluss des CO₂-Preises und technologische Entwicklungen bei DAC mittelfristig zu günstigeren Bereitstellungskosten führen. Kostengünstiger erneuerbarer Strom am Standort sowie geringere Transportbedarfe können diese Entwicklung begünstigen.

Schlussfolgerungen

Die zusammengetragenen Daten bieten einen umfassenden Überblick der Studienlandschaft zur Kostenentwicklung ausgewählter strombasierter Energieträger. Dabei zeigt sich, dass Kostenabschätzungen vornehmlich techno-ökonomische Kostenbeiträge und Parameter berücksichtigen. Umwelt-ökologische sowie sozio-ökonomische Aspekte und deren regionale Unterschiede werden nicht in die Kostenbetrachtung einbezogen.

7 Schlussfolgerungen

Die Forschungsergebnisse verdeutlichen die zentrale Rolle strombasierter Energieträger für die Dekarbonisierung schwer elektrifizierbarer Sektoren bei gleichzeitig erheblichen Herausforderungen:

- ▶ **Zusätzlicher erneuerbarer Strom** ist der kritische Engpass für den Markthochlauf von PtGLS-Produkten.
- ▶ **Importe** werden in relevantem Umfang erforderlich sein, insbesondere aus sonnen- und windreichen Ländern, auch des globalen Südens, was hohe Nachhaltigkeitsstandards erforderlich macht.
- ▶ Die **RED III und Delegierte Verordnungen** etablieren erstmals verbindliche Anforderungen, weisen jedoch erhebliche Fehlstellen auf, insbesondere das Fehlen von über THG-Emissionsminderung hinausgehenden Nachhaltigkeitskriterien.
- ▶ **Ökobilanzen** zeigen erhebliche Verbesserungen bei der Klimawirkung (bis zu 80% Reduktion), aber auch deutlich höhere Umweltbelastungen in anderen Kategorien wie Versauerung, Eutrophierung und Flächenbedarf.
- ▶ **Optimierungsmaßnahmen** – insbesondere die regenerative Stromversorgung aller Prozesse, effektive Abgasnachbehandlung und Nutzung von Meerwasserentsalzung – können die Umweltwirkungen deutlich reduzieren.
- ▶ **Biogene CO₂-Quellen** sind durch Nachhaltigkeitsgrenzen und Konkurrenzen beschränkt; DAC bleibt langfristig die skalierbarste Option.
- ▶ **Internationale Nachhaltigkeitssicherung** erfordert eine verstetigte Zusammenarbeit verschiedener Ebenen, flankiert durch regelmäßige Wirkungsanalysen sowie die institutionalisierte Beteiligung lokaler Bevölkerungsgruppen.
- ▶ Veröffentlichte **Kostenabschätzungen** berücksichtigen vornehmlich techno-ökonomische Kostenbeiträge während ökologische und sozio-ökonomische Aspekte und deren regionale Unterschiede nicht in die Kostenbetrachtung einbezogen werden.

8 Quellenverzeichnis

Beaucamp, L.; Stubenberg, R.; Schreck, S. (2026): Kriterienentwicklung für die nachhaltige Bereitstellung von PtGLS-Produkten. TEXTE 140/2026. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau.

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8248>.

Bundeswirtschaftsministerium (2023): Die Nationale Wasserstoffstrategie.

<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Dossiers/wasserstoffstrategie.html> [letzter Abruf 23.04.2026]

Bundesnetzagentur (BNetzA) (2021, 1. Oktober): Redispatch.

<https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Netzengpassmanagement/Engpassmanagement/Redispatch/start.html> [letzter Abruf 23.04.2026]

Europäische Kommission (2024): Q Q&A implementation of hydrogen delegated acts. Europäische Kommission (Hrsg.). <https://circabc.europa.eu/ui/group/8f5f9424-a7ef-4dbf-b914-1af1d12ff5d2/library/ca8efd4d-cb44-4aec-914d-3d95f95ea293/details>

Fehrenbach, H.; Fröhlich, T. (2026): Bewertung der Nachhaltigkeitsanforderungen der RED. TEXTE 137/2026. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-8347>.

Fröhlich, T.; Liebich, A.; Ludmann, S.; Münter, D.; Rosental, M.; Wingenbach, C. (2026): Klima- und Umwelteffekte der Herstellung von PtGLS-Produkten und technische Maßnahmen zur Minderung. TEXTE 138/2026. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-8171>.

Münter, D.; Fehrenbach, H.; Fröhlich, T. (2025): Optionen und Potenziale für die Nutzung von biogenem CO₂ für die Herstellung von strombasierten erneuerbaren Energieträgern. TEXTE 95/2025. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7849>.

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045 - Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende (Hrsg.) und Agora Verkehrswende. <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-2045-1> (23.4.2026)

Purr, K.; Günther, J.; Lehmann, H.; Nuss, P. (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - RESCUE, Climate Change 36/2019, 2. Auflage 2021. Umweltbundesamt (Hrsg.). Dessau Roßlau.

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-2677>

Schreck, S. (2025): Überblick zur Kostenentwicklung von strombasierten erneuerbaren Energieträgern. TEXTE 96/2025. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7963>.

Sensfuß, F.; Lux, B.; Bernath, C.; Kiefer, C.; Pfluger, B.; Kleinschmitt, C.; Franke, K.; Deac, G.; Brugger, H.; Fleiter, T.; Rehfeldt, M.; Herbst, A.; Manz, P.; Neuwirth, M.; Wietschel, M.; Gnann, T.; Speth, D.; Krail, M.; Mellwig, P.; ... von Mikulicz-Radecki, F. (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 - Kurzbericht: 3 Hauptszenarien. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI und Consentec GmbH. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS_Kurzbericht_final_v5.pdf