



NRL

Norddeutsches
RealLabor

Potentiale, Grenzen und Prioritäten

Grüner Wasserstoff für die Energiewende

Teil 1: Grüner Wasserstoff als Markt der Zukunft

Hamburg, Februar 2023

Prof. Dr. Jens-Eric von Düsterlho

Jonas Bannert, Dr. Felix Doucet, Lia Maria Lichtenberg, Britta Heybrock

Grüner Wasserstoff für die Energiewende

Potentiale, Grenzen und Prioritäten – Teil 1: Grüner Wasserstoff als Markt der Zukunft

Februar 2023

Prof. Dr. Jens-Eric von Düsterlho

Jonas Bannert, Dr. Felix Doucet, Lia Maria Lichtenberg, Britta Heybrock

Über die Autor*innen

In der Arbeitsgruppe „Neue Markt- & Geschäftsmodelle, Regulatorik“ des Norddeutschen Reallabors (NRL) werden an der HAW Hamburg die Praxisprojekte der Arbeitsgruppe „Wärme & Quartiere“ aus ökonomischer Perspektive wissenschaftlich begleitet.

Zusammenfassung

Einführung in das Thema „Grüner Wasserstoff als Markt der Zukunft“.

Grüner Wasserstoff ist notwendig für die Energiewende. Daher wird von einem stark wachsenden Markt für grünen Wasserstoff und Wasserstoff-Technologie ausgegangen. Gleichzeitig wird der Bedarf in Deutschland die nationalen Erzeugungskapazitäten übertreffen. Grüner Wasserstoff wird mittelfristig eher ein knappes Gut („Champagner“) und weniger eine Massenware („neues Öl“) sein.

Keywords

Grüner Wasserstoff, Markt der Zukunft, Einführung, Norddeutsches Reallabor

Inhaltsverzeichnis

1.	EINLEITUNG	1
1.1	Herausforderung: Klimaneutralität 2045	1
1.2	Das Verbundforschungsprojekt Norddeutsches Reallabor (NRL).....	2
1.3	Zielsetzung und Aufbau	3
2	GRÜNER WASSERSTOFF IM SEKTORÜBERGREIFENDEM ENERGIESYSTEM DER ZUKUNFT	4
2.1	Farbenlehre des Wasserstoffs	4
2.2	Die Vier Phasen einer sektorübergreifenden Energiewende	6
2.3	Grüner Wasserstoff als Zukunftsmarkt.....	9
2.4	Grüner Wasserstoff als knappes Gut der Energiewende	11
I.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	I
II.	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	I
III.	LITERATURVERZEICHNIS	II
IV.	ANHANG.....	IV

Vorbemerkung

Die Studienreihe „Grüner Wasserstoff für die Energiewende – Potentiale, Grenzen und Prioritäten“ soll einen Überblick entlang der Wertschöpfungskette von grünem Wasserstoff und damit von der Wasserstofferzeugung bis hin zur Anwendung in den verschiedenen Verbrauchssektoren geben.

Durch techno-ökonomische Betrachtungen werden verschiedene relevante Technologien im Hinblick auf ihre Potentiale und Grenzen bewertet und daraus Prioritäten für den zukünftigen Einsatz von grünem Wasserstoff abgeleitet. Dafür werden die „Potentiale, Grenzen und Prioritäten“, aufbauend auf den Arbeitsgruppen des NRL und deren Demonstratoren, in folgenden Themenbereichen untersucht und sukzessive veröffentlicht:

- **Studienreihe Teil 1: Grüner Wasserstoff als Markt der Zukunft**
- Studienreihe Teil 2: Wasserstoffanwendung im Gebäudesektor
- Studienreihe Teil 3: Wasserstoffanwendung im Verkehrssektor
- Studienreihe Teil 4: Wasserstoffanwendung im Industriesektor
- Studienreihe Teil 5: Wasserstoff Erzeugung
- Studienreihe Teil 6: Wasserstoffanwendungen im Sektoren-Vergleich

1. Einleitung

1.1 Herausforderung: Klimaneutralität 2045

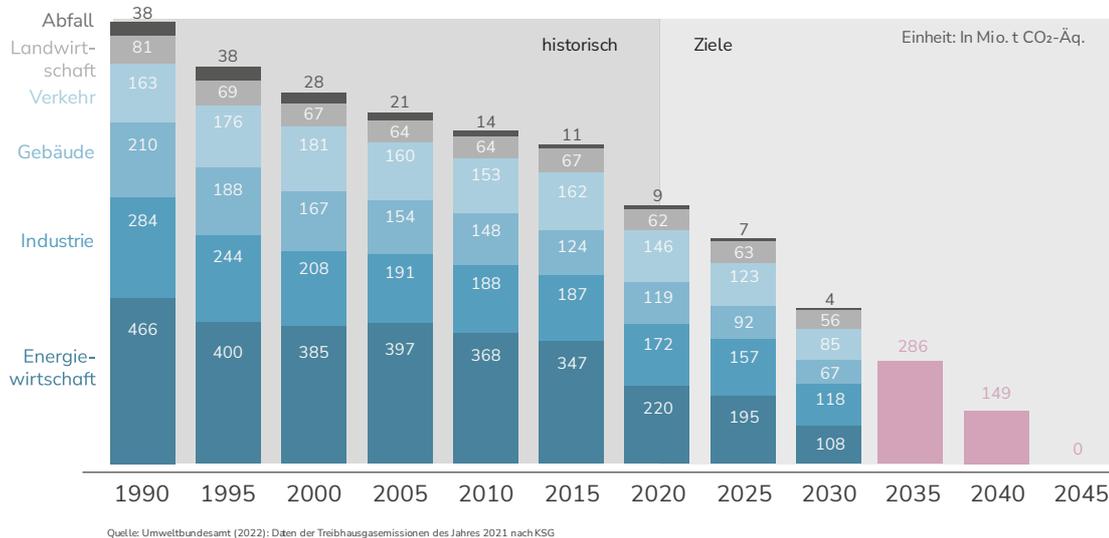


Abbildung 1: Treibhausgasemissionen der einzelnen Sektoren seit 1990 mit Zielen bis 2045

Die Bundesrepublik Deutschland hat mit dem 2021 nachgebesserten Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) beschlossen, bis 2045 Klimaneutralität zu erreichen. Dafür müssen neben der Energiewirtschaft auch die Verbrauchssektoren Industrie, Verkehr und Gebäude vollständig treibhausgasneutral werden, was eine enorme Herausforderung darstellt.

Abbildung 1 zeigt, dass der Weg zur vollständigen Treibhausneutralität anspruchsvoll ist. Seit dem Referenzjahr 1990 konnten in 30 Jahren bis 2020 die Emission von Treibhausgasen (THG) zwar um 40 % reduziert werden, das entspricht durchschnittlich 17 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr¹ (hellgrauer Bereich). In den nächsten 25 Jahren von 2020 bis 2045 müssen die THG-Emissionen aber um die restlichen 60 % gesenkt werden, das entspricht durchschnittlich 30 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr² (dunkelgrauer Bereich). Die jährliche THG-Minderung muss zukünftig also deutlich am-

bitionierter ausfallen als in den letzten 30 Jahren, um das Ziel der Klimaneutralität 2045 erreichen zu können. Es gilt, sämtliche dafür notwendige Technologien zügig in die breite Anwendung zu führen.

Mit der „Nationalen Wasserstoffstrategie“ hat die Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland im Sommer 2020 die Bedeutung von **grünem Wasserstoff** (= aus erneuerbaren Energien gewonnen) einen zentralen Baustein für die erfolgreiche Energiewende unterstrichen (BMWi 2020). Die Herstellung und Anwendung von grünem Wasserstoff und deren Technologie als „Markt der Zukunft“ unterliegen derzeit noch vielfältigen technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen. Die vorliegende Studienreihe „**Grüner Wasserstoff für die Energiewende – Potentiale, Grenzen und Prioritäten**“ widmet sich diesen Themen und präsentiert eine Einordnung im Rahmen des Verbundforschungsprojektes „Norddeutsches Reallabor“ (NRL).

¹ 40 % / 30 Jahre = 1,33 % pro Jahr → 1,33 % von THG-Emissionen₁₉₉₀ = 1.242 Mio. t CO₂-Äq. * 1,33 % = 17 Mio. t CO₂-Äq.
² 60 % / 25 Jahre = 2,40 % pro Jahr → 2,40 % von THG-Emissionen₁₉₉₀ = 1.242 Mio. t CO₂-Äq. * 2,40 % = 30 Mio. t CO₂-Äq.

1.2 Das Verbundforschungsprojekt Norddeutsches Reallabor (NRL)

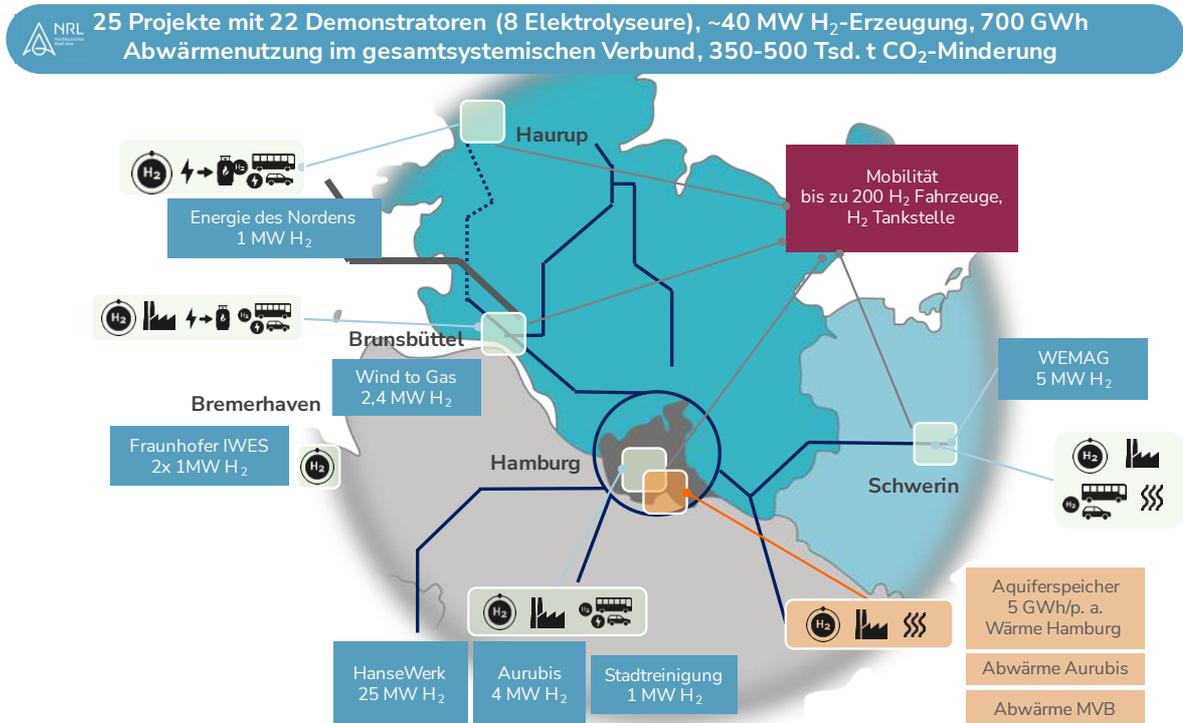


Abbildung 2: NRL-Struktur

Das Verbundforschungsprojekt NRL „Norddeutsches Reallabor“³ (2021 bis 2026) ist ein im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms mit dem Förderschwerpunkt „Reallabore der Energiewende“ mit rund 52 Millionen € gefördertes Projekt. Ziel des NRL ist es, die Transformation des Energiesystems zu erproben und so den Weg zu einer schnellen Defossilisierung aller Verbrauchssektoren zu demonstrieren. Dabei werden die Erzeugungsregionen von grünem Strom Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern mit der Verbrauchsregion Hamburg gekoppelt. Dabei wird die Wasserstoff-Wertschöpfungskette abgedeckt von der Bereitstellung über den Transport und die Speicherung bis zur Umwandlung von Energie in der Industrie, der Wärmeversorgung und dem Mobilitätssektor. Diese Vielfalt ermöglicht eine integrierte Betrachtung des Energiesystems und

dessen Erzeugungs- und Verbrauchssektoren im NRL.

Konkret arbeiten im NRL 23 Förderpartner, 30 assoziierte Partner sowie 6 Behörden und Ministerien der beteiligten Landesregierungen zusammen. Dabei entstehen in den nächsten Jahren 22 Demonstrationsanlagen wie beispielsweise acht Elektrolyseure mit einer Wasserstoff-Erzeugungskapazität von bis zu 42 MW, bis zu 200 wasserstoffbetriebene Fahrzeuge verschiedener Klassen in unterschiedlichen Nutzungsszenarien und drei Projekte zur Abwärmenutzung in einem Umfang von 700 GWh pro Jahr (siehe Abbildung 2 und Abbildung 3). Mit den geplanten Vorhaben des Norddeutschen Reallabors können etwa 350-500.000 Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr eingespart werden.

³ Weitere Informationen und Publikationen aus dem NRL finden Sie unter WWW.NORDDEUTSCHES-REALLABOR.DE.

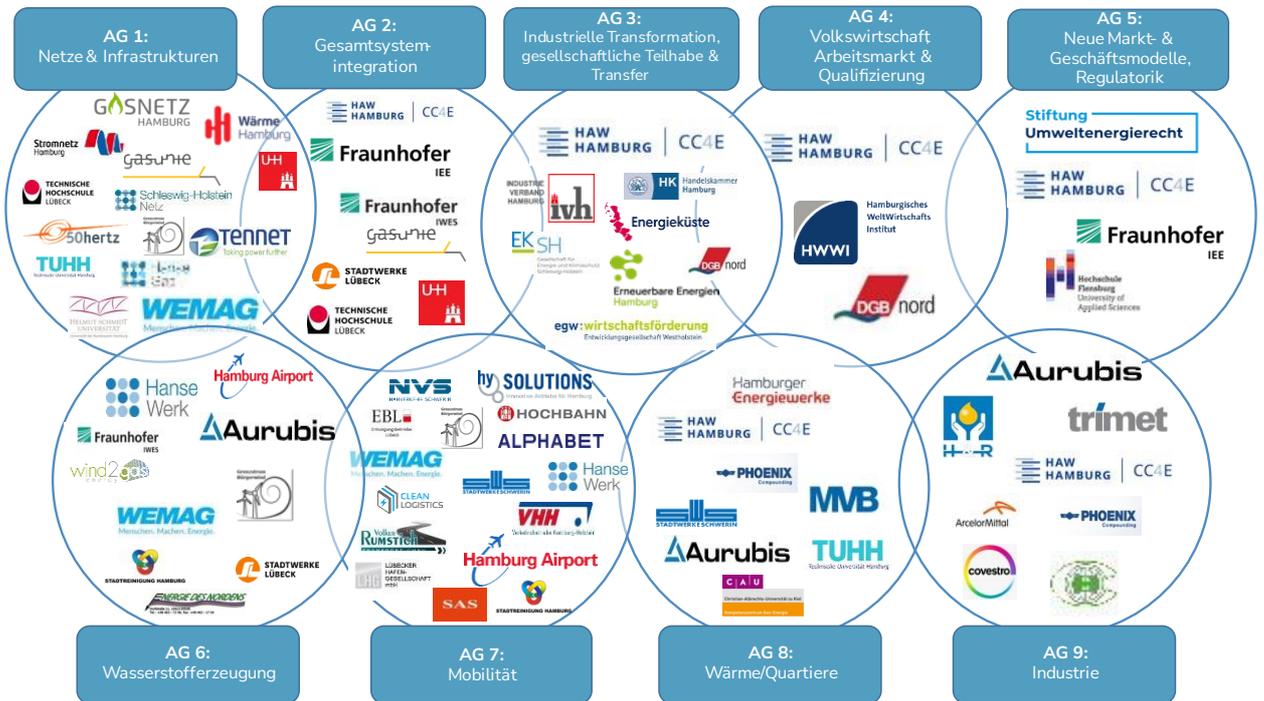


Abbildung 3: NRL-Projektpartner

1.3 Zielsetzung und Aufbau

In diesem Teil 1 wird eine Einführung in die Rolle von grünem Wasserstoff als Markt der Zukunft gegeben. Darauf bauen die weiteren Teile der Studienreihe zur Wasserstoff-Anwendung und Erzeugung auf.

Konkret wird dazu in dieser Einführung zunächst grüner Wasserstoff in die verschiedenen grundsätzlichen Herstellungsarten von

Wasserstoff (Kapitel 2.1) sowie die vier Phasen einer sektorübergreifenden Energiewende (Kapitel 2.2) eingeordnet. Anschließend wird sowohl auf die Potentiale von grünem Wasserstoff als wachsender Zukunftsmarkt (Kapitel 2.3) eingegangen als auch deren Grenzen aufgezeigt (Kapitel 2.4).

2 Grüner Wasserstoff im sektorübergreifendem Energiesystem der Zukunft

2.1 Farbenlehre des Wasserstoffs

Wasserstoff (H_2) kann unter dem Einsatz von Energie in verschiedenen Verfahren hergestellt werden. Wasserstoff wird deshalb je nach Ausgangsrohstoff und Herstellungs- und Speicherprozess in verschiedene Farben kategorisiert (IKEM 2020: 8–11):

- **Weißer Wasserstoff:** Natürlich vorkommender Wasserstoff (insbesondere in Afrika), der vor allem durch Fracking gewonnen werden kann. Das Potential wird auch aufgrund begrenzter Vorkommen als gering eingeschätzt.
- **Schwarzer Wasserstoff:** Wird auf Basis von Steinkohle hergestellt, die mit thermischer Energie in Wasserstoff (H_2) und in die Atmosphäre entweichendes Kohlenstoffdioxid (CO_2) umgewandelt wird.
- **Brauner Wasserstoff:** Wird auf Basis von Braunkohle hergestellt, die mit thermischer Energie in Wasserstoff (H_2) und in die Atmosphäre entweichendes Kohlenstoffdioxid (CO_2) umgewandelt wird.
- **Grauer Wasserstoff:** Wird auf Basis von Erdgas hergestellt, das mit thermischer Energie in Wasserstoff (H_2) und in die Atmosphäre entweichendes Kohlenstoffdioxid (CO_2) umgewandelt wird.
- **Blauer Wasserstoff:** Das in der Herstellung von fossilem Wasserstoff („schwarz“, „braun“ und „grau“ entstehende CO_2 wird abgeschieden und gespeichert (engl. Carbon Capture and Storage (CCS)). Dabei entweichen im Vergleich zu fossilem Wasserstoff deutlich geringere Mengen an CO_2 in die Atmosphäre.
- **Türkiser Wasserstoff:** Wird auf Basis von fossilem Methan (CH_4) hergestellt, das mit thermischer Energie in Wasserstoff (H_2) und festen Kohlenstoff (C) umgewandelt werden.
- **Roter Wasserstoff:** Wird auf Basis von Wasser (H_2O) hergestellt, das mit Hilfe von Energie aus Kernenergie (Strom oder thermische Energie) in Wasserstoff (H_2) und reinen Sauerstoff (O_2) umgewandelt wird.
- **Oranger Wasserstoff:** Wird auf Basis von organischen Stoffen und ggf. Wasser hergestellt, die mit Hilfe von Energie aus Biomasse (thermische Energie) in Wasserstoff (H_2) und Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) umgewandelt werden. Das dabei in die Atmosphäre entweichende CO_2 wurde durch die Biomasse vorher aus der Atmosphäre entnommen. Somit ist oranger Wasserstoff CO_2 -neutral.
- **Grüner Wasserstoff:** Wird auf Basis von Wasser (H_2O) hergestellt, das mit Hilfe von Energie aus Erneuerbaren-Energien-Anlagen (Strom oder thermische Energie) in Wasserstoff (H_2) und reinen Sauerstoff (O_2) umgewandelt wird.⁴

CO_2 -neutral im engeren Sinn und ohne den Einsatz von Kernenergie ist demzufolge nur

⁴ Hier sei darauf hingewiesen, dass die genaue Definition von grünem Wasserstoff in der EU-Gesetzgebung insbesondere wegen Fragen der Zusätzlichkeit und räumlichen und zeitlichen Nähe aktuell noch ungeklärt ist (laufendes Verfahren für einen delegierten Rechtsakt zu Art. 27 Abs. 3 RED II und RED III). Darauf wird in der Studienreihe „Grüner Wasserstoff für die Energiewende - Potentiale, Grenzen und Prioritäten“ Teil 5 vertieft eingegangen.

oranger und grüner Wasserstoff. Da die Nutzung von Biomasse zur Defossilisierung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr aufgrund der Zunahme von Monokulturen und „Tank vs. Teller“ Diskussion auf ökologische und gesellschaftliche Grenzen stößt, wird oranger Wasserstoff in der Folge nicht weiter berücksichtigt.

Im Energiewende-Diskurs wird zum Teil auch blauer oder türkiser Wasserstoff als CO₂-freier Wasserstoff verstanden, da hier Treibhausgasemission in der Wasserstoffherstellung weitgehend vermieden werden. Gleichzeitig ist insbesondere die CCS-Technologie mit Umweltrisiken, Zusatzkosten und mangelnder Akzeptanz in der Gesellschaft verbunden. Zudem entstehen im vorgelagerten Abbau und Transport fossiler Brennstoffe

weiterhin signifikante Mengen an THG-Emissionen. Insofern dürfte diese Technologie höchstens als Brückentechnologie relevant werden und nicht als nachhaltige Lösung für die Energiewende. Deswegen werden in der Folge auch blauer oder türkiser Wasserstoff nicht weiter betrachtet.

Auch in der nationalen politischen Diskussion wird gegenwärtig ausschließlich auf grünen Wasserstoff als CO₂-neutralen Wasserstoff der Zukunft gesetzt (BMWi 2020: 2; SPD, BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN & FDP 2021: 26; 59–60).

Dementsprechend ist die Studienreihe „Grüner Wasserstoff für die Energiewende - Potentiale, Grenzen und Prioritäten“ analog zum NRL ausschließlich auf grünen Wasserstoff fokussiert.

2.2 Die Vier Phasen einer sektorübergreifenden Energiewende

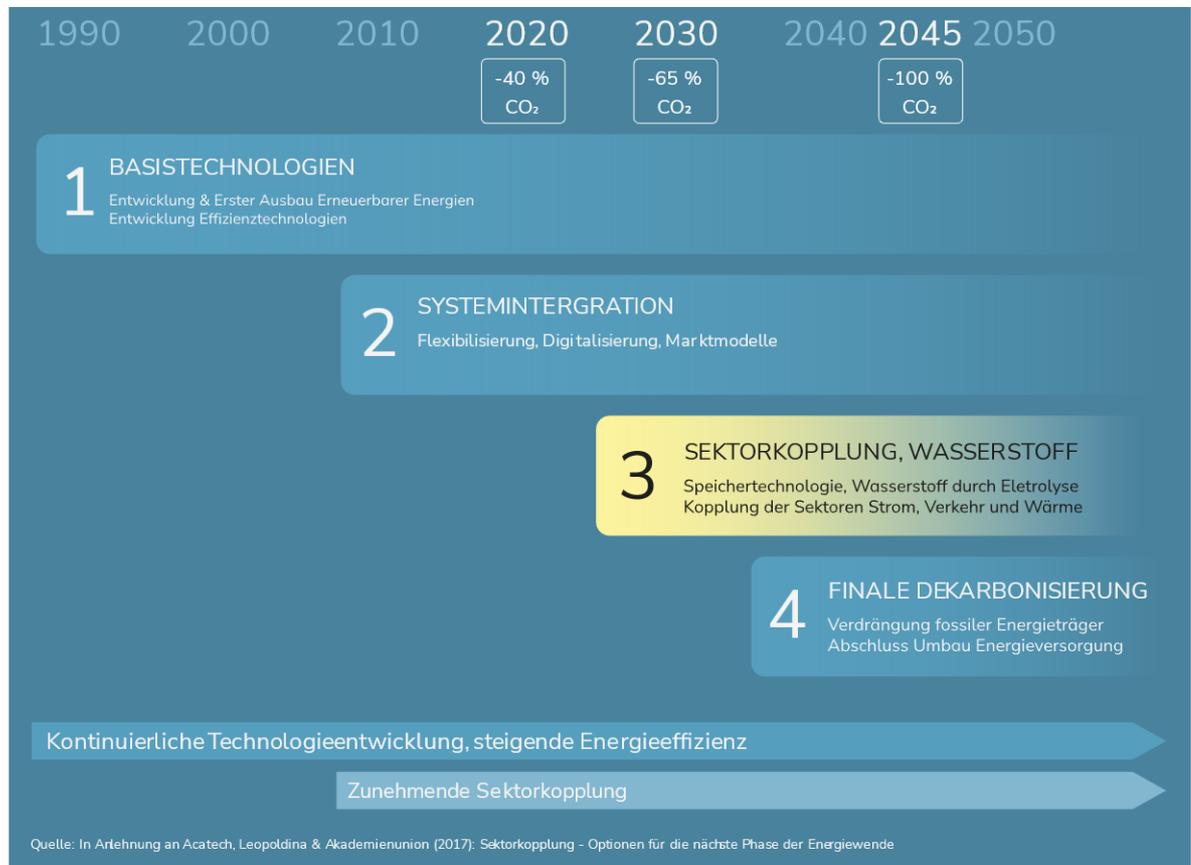


Abbildung 4: Die Vier Phasen einer sektorübergreifenden Energiewende

Die Energiewende kann in „Vier Phasen einer sektorübergreifende Energiewende“ (acatech, Leopoldina & Akademienunion 2017: 51–53) eingeteilt werden, um den konkreten Weg zur Erreichung der Klimaneutralität von 1990 bis 2045 (siehe Abbildung 4)⁵ zu beschreiben:

In der **ersten Phase der Energiewende** ging es seit Beginn der 1990er Jahre primär um die Entwicklung und den ersten Ausbau von Technologien für die Erzeugung von erneuerbarer Energie wie Photovoltaik, Windkraft und Biomassen sowie von Effizienztechnologien. Über ökonomische Anreize wie dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) wurde die technologische Entwicklung unterstützt, so dass Erneuerbare-Energie-Anlagen heute

wirtschaftlich und rentabel betrieben werden können, wodurch eine erste Defossilisierung der Energiewirtschaft im Bereich der Stromerzeugung vorangetrieben wurde. Mittlerweile sind viele Erneuerbare-Energien-Anlagen durch Skaleneffekte und technische Entwicklungen so wirtschaftlich zu betreiben, dass diese ohne zusätzliche Förderung fossile Kraftwerke in der Stromerzeugung verdrängen können (Fraunhofer ISI 2021a: 17–27).

In der **zweiten Phase der Energiewende**, in der wir uns gegenwärtig noch befinden, geht es darum, die zunehmende Anzahl an volatiler, wetterabhängiger Erzeugungskapazitäten von Erneuerbare-Energien-Anlagen bestmöglich in das bestehende Stromnetz zu integrieren, um eine sichere und zuverlässige

⁵⁵ Eine ausführlichere Erklärung der „Vier Phasen einer sektorübergreifenden Energiewende“ ist auch auf dem Online-Lernportal Energiewende Campus in einem rund 45-minütigen Video-Kurs zu finden: WWW.ENERGIEWENDE-CAMPUS.DE/COURSES/DIE-VIER-PHASEN-DER-ENERGIEWENDE.

Anteil Erneuerbare Energien in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr von 1990 bis 2021 (2022 vorläufig) (in %)

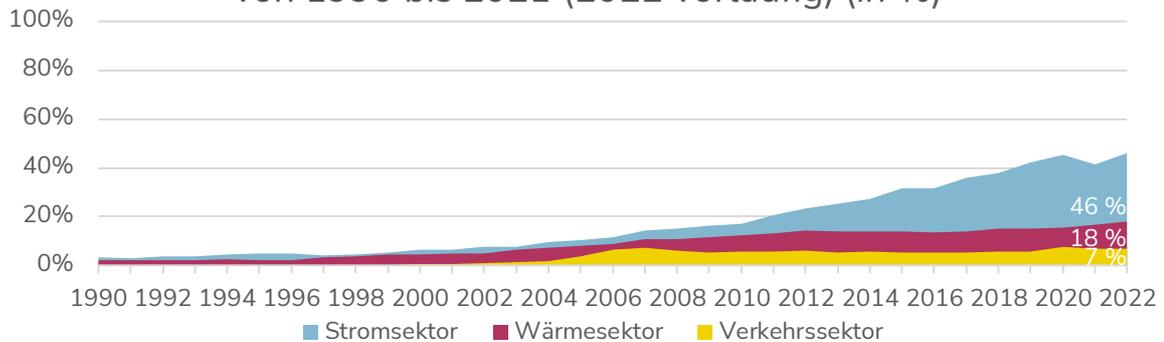


Abbildung 5: Anteil von Erneuerbarer Energie in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr von 1990 bis 2021 (2022 vorläufig)

Stromversorgung auch bei einer sog. „Dunkelflaute“ (= Zeiten, in denen weder die Sonne scheint noch Wind weht) zu gewährleisten.⁶ Eine besondere Herausforderung ist auch die Zunahme dezentraler Erneuerbare-Energien-Kleinst-Anlagen privater Haushalte, wodurch die Komplexität des Stromnetzbetriebs zunimmt.

In der **dritten Phase der Energiewende** geht es für die erforderliche durchgängige Defossilisierung um eine großskalige Sektorkopplung des Stromsektors mit dem Mobilität- und Wärmesektor. Bereits heute gibt es teilweise ein Überangebot an grünem Strom, der vom Stromnetz nicht mehr aufgenommen werden kann (negative Residuallast). Diese Zeiten negativer Residuallasten nehmen mit dem weiteren Ausbau von Erneuerbaren-Energie-Anlagen weiter zu. Gleichzeitig zeigt Abbildung 5⁷, dass die Defossilisierung in den Sektoren Mobilität und Wärme insbesondere aus Mangel an Technologien bzw. an ökonomisch

rentablen Alternativen noch sehr begrenzt und stark ausbaufähig ist. Im Stromsektor beträgt der Anteil Erneuerbarer Energie aktuell rund 46 %.

Die Idee einer sektorübergreifenden Energiewende ist es, überschüssigen Strom aus erneuerbaren Energien in Zeiten negativer Residuallast zu speichern und neben der Speicherung zur Rückverstromung auch den anderen beiden Sektoren Wärme und Mobilität zur Verfügung zu stellen. Dafür kann der überschüssige grüne Strom neben der Speicherung in Batterien auch in der Elektrolyse zur Erzeugung von grünem Wasserstoff genutzt werden. Durch die Veredelung von Wasserstoff kann grüner Strom dann auch in synthetischen Kraft-/Brennstoffen wie beispielsweise synthetischem Diesel, Methan oder Kerosin gespeichert werden.

In der **vierten Phase der Energiewende** gilt es, in Deutschland bis 2045 alle Sektoren vollständig zu defossilisieren, also die Stromerzeugung, den Verkehrs- und Wärmesektor

⁶ Einen guten Einblick in die Umsetzung der zweiten Phase der Energiewende zeigt das Forschungs-Verbundprojekt Norddeutsche Energiewende (NEW 4.0) (2016-2021). Einen Einblick in die Ergebnisse finden Sie hier: www.new4-0.de/ergebnisse sowie auf dem Energiewende-Campus, beispielsweise zu den konkreten 6 NEW 4.0 Use-Cases zur Integration von Erneuerbaren-Energie-Anlagen in das Stromnetz: www.energiewende-campus.de/courses/die-6-new-4-0-use-cases.

⁷ Datengrundlage: (AGEE-Stat & UBA 2022; Agora Energiewende 2023; BMWK & AGEE-Stat 2022b) – die Werte für 2022 sind vorläufig (2021: Stromsektor 41,4%; Wärmesektor 16,5% & Verkehrssektor 6,8%).

wie auch die Industrie. Parallel zur erforderlichen Elektrifizierung der Sektoren Verkehr und Wärme und durch die Herstellung von grünem Wasserstoff wird auch der Bedarf an grünem Strom massiv steigen. Es wird bis 2045 mit einer Erhöhung des Brutto-Strombedarfs von heute rund 600 Terrawattstunden auf 910 bis 1.296 TWh pro Jahr gerechnet (BDI 2021; Dena 2021; Prognos, Öko-Institut, & Wuppertal-Institut 2021; Fraunhofer ISI 2021b; Kopernikus-Projekt Ariadne 2021). Inwieweit dafür eine vollständige Energieversorgung auf Grundlage von Erneuerbare-Energien-Technologien autark in der Bundesrepublik Deutschland erfolgen kann oder das System auf Importe aus dem Ausland angewiesen ist, ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vollständig absehbar. Dies hängt unter

anderem von der zukünftigen Entwicklung von Energieeffizienztechnologien, der technischen Weiterentwicklung von Erneuerbare-Energie-Anlagen und dem weiteren Ausbau des Flächenangebotes für Erneuerbare-Energien-Anlagen auf nationaler Ebene ab.

Grüner Wasserstoff spielt in dem dargestellten Vier-Phasen-Modell der sektorübergreifenden Energiewende also ab der dritten Phase eine zentrale Rolle, um bei negativer Residuallast überschüssigen Strom aus Erneuerbare-Energie-Anlagen zu speichern und zeitversetzt rückzuströmen oder ihn unmittelbar in anderen Sektoren zur Defossilisierung zu nutzen.

2.3 Grüner Wasserstoff als Zukunftsmarkt

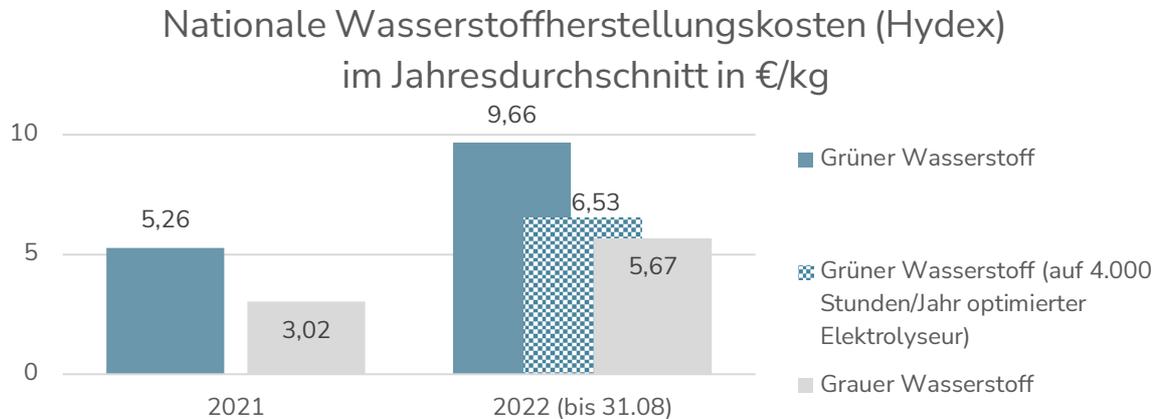


Abbildung 6: HYDEX: Nationale Wasserstoffherstellungskosten (Hydex) Grün vs. Grau 2021 & 2022

Wasserstoff (H₂) ist bereits heute ein wichtiger Grundstoff in der chemischen Industrie, im Raffineriebereich, in der Metallbearbeitung und bei weiteren industriellen Einsatzpfaden.

Aktuell wird in Deutschland noch größtenteils grauer Wasserstoff genutzt. Der jährliche Bedarf liegt dabei bei rund 55 TWh (BMW 2020: 10) bzw. 1.650.165 t H₂⁸ und wird in erster Linie für stoffliche Herstellungsverfahren in der Industrie, für die Grundstoffchemie (Herstellung von Ammoniak, Methanol usw.) und der Petrochemie (Herstellung konventioneller Kraftstoffe) benötigt.

Das Angebot von und die Nachfrage nach grünem Wasserstoff auf dem deutschen Markt ist dagegen derzeit marginal, weil unter den aktuellen Marktbedingungen grauer Wasserstoff deutlich günstiger herzustellen ist als grüner Wasserstoff. Abbildung 6 zeigt die nationalen Herstellungskosten von grünem Wasserstoff im Vergleich zu grauem Wasserstoff. Grüner Wasserstoff ist aktuell noch in der Herstellung deutlich teurer, im Jahreschnitt für 2021 um den Faktor 1,74⁹ und für 2022 (bis 31.08) um den Faktor 1,70¹⁰.

Gleichzeitig war die Herstellung von grünem Wasserstoff bereits an 23 Tagen im 1. Halbjahr 2022 günstiger als grauer Wasserstoff, im gesamten Jahr 2021 waren es nur 22 Tage. Würde grüner Wasserstoff in einem optimierten Elektrolyseur hergestellt (Optimierung: Betriebsstundenreduzierung auf die 4000 günstigsten Strompreisstunden/Jahr), hätte sich für 2022 ein Herstellungspreis von 6,53 €/kg für grünen Wasserstoff ergeben (E-Bridge 2022: 6), der vermutlich in Teilbereichen wettbewerbsfähig wäre.

Für eine Marktdurchdringung von grünem Wasserstoff muss dieser in Relation zur Herstellung aus fossilen Wasserstoffen aber noch wesentlich kostengünstiger werden. Teilweise wird dies „automatisch“ geschehen, indem für den fossilen Wasserstoff zunehmend zusätzliche Kosten (steigender CO₂-Preis) anfallen werden. Zudem werden sich die Herstellungskosten von grünem Wasserstoff aufgrund von Technologiefortschritt und Skaleneffekten in der Produktion im Zeitverlauf deutlich verringern. Insgesamt geht die EU davon aus, dass grüner Wasserstoff in Ländern mit geringen Kosten für grünen Strom bereits ab 2030 ökonomisch kompetitiv mit

⁸ 55.000.000.000 kWh / 33,33 kWh/kg = 1.650.165 t

⁹ Verhältnis GrünerWasserstoff₂₀₂₁ / GrauerWasserstoff₂₀₂₁ = 5,26 €/kg / 3,02 €/kg = 1,74

¹⁰ Verhältnis GrünerWasserstoff₂₀₂₂ / GrauerWasserstoff₂₀₂₂ = 9,66 €/kg / 5,67 €/kg = 1,70

fossilem Wasserstoff ist (European Commission 2020: 5).

Im Jahr 2045 wird mit einem nationalen Bedarf an grünem Wasserstoff und sonstigen grünen synthetische Brennstoffen und Feedstocks auf Wasserstoff-Basis von rund 363 bis 694 TWh¹¹ gerechnet (Abbildung 7). Der nationale Markthochlauf von Wasserstoff wird dabei insbesondere für den Zeitraum 2030 bis 2045 erwartet.

Das Marktvolumen für grünen Wasserstoff in der EU wird 2030 auf rund 130 Mrd. Euro geschätzt mit dann rund 1 Millionen Arbeitsplätzen in der Wasserstoff-Branche. Bis 2050 soll das Marktvolumen auf rund 820 Mrd. Euro ansteigen mit dann rund 5,4 Millionen Arbeitsplätzen (FCH 2019: 9).

Prognostische Bedarfsentwicklung von Wasserstoff für 2030 und 2045 in Deutschland

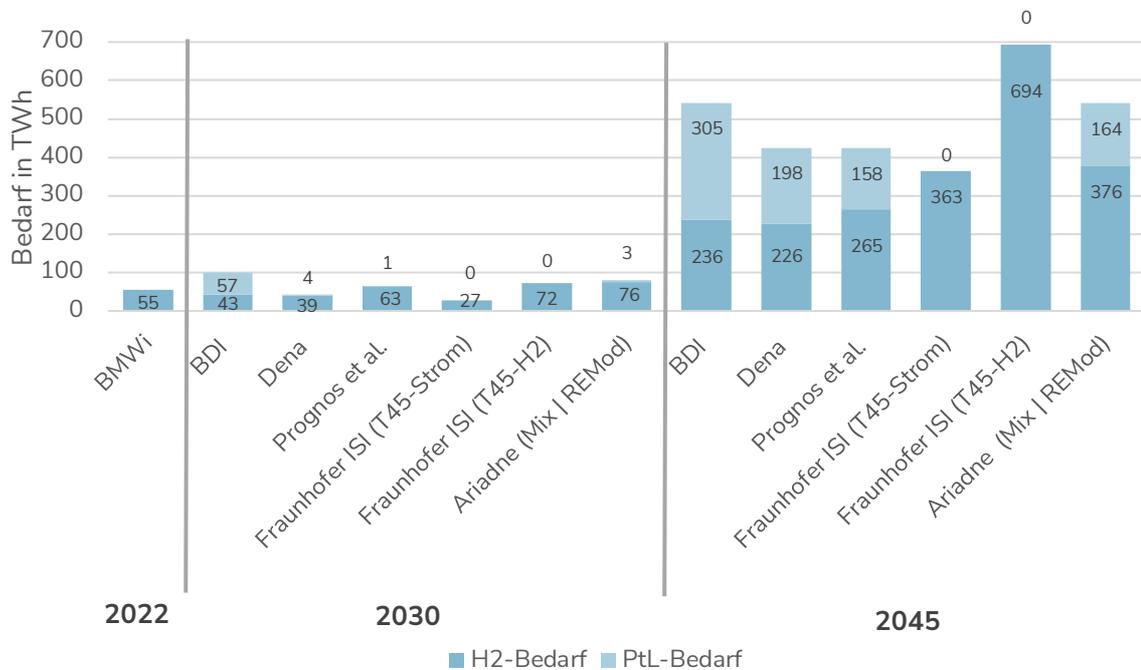


Abbildung 7: Prognostische Bedarfsentwicklung von Wasserstoff für 2030 und 2045 in Deutschland

¹¹ 363 bis 694 TWh entsprechen bei einem Energiegehalt von 33,33 kWh/kg H₂ in etwa 10,9 bis 20,8 Mio. t H₂.

2.4 Grüner Wasserstoff als knappes Gut der Energiewende

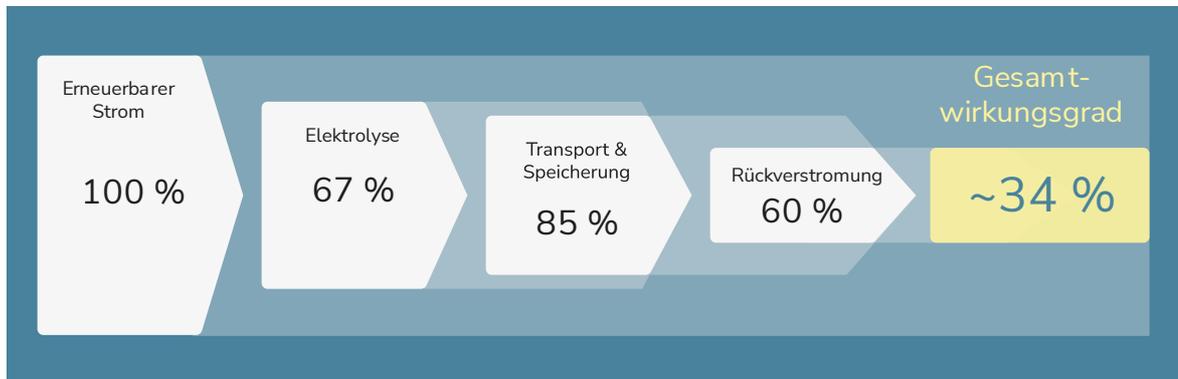


Abbildung 8: Elektrolyse mit Rückverstromung

Bei der Herstellung von grünem Wasserstoff sind die physikalischen Gesetze der Stoffumwandlung zu beachten. So geht mit jeder Umwandlung von einer Energieform in eine andere Energieform Energie an die Umgebung verloren. In der neuen Energieform ist somit weniger Energie enthalten als in der vorherigen.

Dies zeigt Abbildung 8 für den Anwendungsfall von grünem Wasserstoff als Stromspeicher. Nimmt man einen marktüblichen Wirkungsgrad von 67 % für den Elektrolyseur, 15 % Speicher- und Transportverluste sowie eine Brennstoffzelle mit einem Wirkungsgrad von 60 % an, dann liegt der Gesamtwirkungsgrad bei nur rund 34 %. Rund zwei Drittel der grünen Energie gehen also bei der Nutzung über den Umweg grüner Wasserstoff verloren. Mit grünem Wasserstoff als Technologieoption steigen somit im Vergleich zur Direktnutzung von grünem Strom der gesamtsystemische Energie-Bedarf und somit der Ausbaubedarf an Erneuerbare-Energien-Anlagen.

Vor dem Hintergrund, dass die Defossilisierung des Stromsektors noch nicht vollständig umgesetzt ist (aktuell Anteil rund 46 % - siehe Abbildung 5), sollte im Sinne einer energieeffizienten Energiewende folglich der grüne Wasserstoff vorrangig in gesamtsystemisch sinnvollen Situationen hergestellt werden.

Die direkte Stromnutzung ist jedenfalls deutlich energieeffizienter. Eine gesamtsystemisch sinnvolle Situation für die Produktion von grünem Wasserstoff ist beispielsweise gegeben, wenn an einem windigen Tag Windkraftanlagen andernfalls abgeschaltet werden müssten, um eine Überlastung des Stromnetzes zu vermeiden. In diesen Situationen wäre es sinnvoll, trotz der dargestellten Stoffumwandlungsverluste den überschüssigen Strom direkt vor Ort in Elektrolyseuren zu nutzen und grünen Wasserstoff herzustellen, der dann später als grüne Energiequelle ggf. zurückverstromt oder in anderen Sektoren flexibel genutzt werden kann.

Das heißt, im Sinne einer energieeffizienten Energiewende würden die Elektrolyseure nur dann grünen Wasserstoff herstellen, wenn es ein Überangebot an Strom aus Erneuerbare-Energien-Anlagen gibt, welchen das Stromnetz nicht aufnehmen kann. Das bedeutet konkret, würde man theoretisch sämtliche abgeschaltete Windenergie zur Elektrolyse-Gewinnung nutzen, könnten in Deutschland

aktuell rund 3,9 TWh grüner Wasserstoff erzeugt werden.¹² Zwar wird die abgeregelte Leistung tendenziell steigen (siehe Anhang Tabelle Überblick Gesamtsystemische Studien), verglichen mit dem heutigen Bedarf von rund 55,5 TWh H₂ bzw. dem zukünftigen von rund 363 bis 694 TWh H₂ (siehe Kapitel 2.3) kann aber so nur ein Bruchteil des Bedarfs an grünem Wasserstoff über abgeschaltete Windenergie gedeckt werden. Zudem steht eine solche Begrenzung der Volllaststunden eines Elektrolyseurs im Sinne einer energieeffizienten Energiewende in einem prinzipiellen Zielkonflikt mit der marktwirtschaftlichen Perspektive: Durch die Reduzierung der Volllaststunden steigen die anteilig anfallenden Fixkosten von Elektrolyseuren pro Einheit Wasserstoff, was zu einer Erhöhung der Kosten für grünen Wasserstoff führen kann. Für den beschleunigten Markthochlauf von Wasserstoff ist ein ausreichend hohe Volllaststundenzahl der Elektrolyseure anzustreben.

Eine Lösung für diesen Zielkonflikt ist die Idee, für Elektrolyseure gezielt zusätzliche Erneuerbare-Energien-Anlagen zu bauen, die mit hoher Volllaststundenzahl grünen Wasserstoff produzieren können. Dadurch wird zumindest bereits vorhandener grüner Strom nicht einer ineffizienteren Nutzungsart zugeführt. Dabei ist zu beachten, dass der Ausbau von neuen Erneuerbare-Energien-Anlagen auf nationaler Ebene aufgrund von Platzmangel, sozialer Akzeptanz und Umweltschutzgründen nur noch begrenzt skalierbar und aktuell ins Stocken geraten ist (BMWK & A-GEE-Stat 2022a: 14–22). Somit ist auch das Potential der nationalen Herstellung von grünem Wasserstoff perspektivisch begrenzt und steht in einem latenten Zielkonflikt mit dem

aktuell noch benötigten Ausbau Erneuerbarer-Energien-Anlagen zur Defossilisierung des Stromsektors.

Im Jahr 2045 werden in Deutschland voraussichtlich rund 96 bis 272 TWh grüner Wasserstoff produziert mit einer Elektrolyseurleistung von 12 bis 77 GW (siehe Anhang Tabelle Überblick Gesamtsystemische Studien). Auch wenn die große Spannweite der erwarteten inländischen Wasserstoffproduktionsmengen bereits auf deutliche Prognoseunsicherheiten hindeutet, decken die erwarteten Mengen in jedem Fall nicht den erwarteten gesamten Bedarf an grünem Wasserstoff in Deutschland. Der darüber hinaus bestehende Bedarf müsste also durch Importe gedeckt werden. Für 2045 wird mit einem Import-Bedarf an grünem Wasserstoff von 138 bis 422 TWh gerechnet (siehe Anhang Tabelle Überblick Gesamtsystemische Studien). Inwieweit dieser Importbedarf jedoch tatsächlich durch ein entsprechendes Angebot gedeckt werden kann ist unklar, weil auch die globale Nachfrage nach grünem Wasserstoff deutlich steigen wird (Öko-Institut 2021: 70–82; Scientist for Future 2022: 8–9).

In einem zukünftigen nachhaltigen Energiesystem wird Energieeffizienz also weiterhin eine hohe Bedeutung haben, um die benötigte Gesamtenergie zu reduzieren. Grüner Wasserstoff wird dabei voraussichtlich eher ein knappes Gut („Champagner“) und weniger eine Massenware („neues Öl“) sein. Für den Markthochlauf von grünem Wasserstoff bedeutet dies, dass es nicht darum gehen sollte, möglichst viele theoretische Anwendungsfälle für grünen Wasserstoff zu finden. Stattdessen sind im Sinne einer ganzheitlichen Energiewende für grünen Wasserstoff die Anwendungsfälle zu finden, in denen grüner

¹² Jährliche Abregelung der Windenergie-Stromeinspeisung rund 6.000 GWh (2017: 5.287,2 GWh; 2018: 5.246,9 GWh; 2019: 6.272,5 GWh; 2020: 5.942,2 GWh (BNetzA 2022: 159).
6.000 GWh * Wirkungsgrad 65 % (aktuell wohl 60 %) = 3.900 GWh
3.900 GWh / 33,33 kWh/kg H₂ = 117.011,70 t H₂ bzw. 3,9 TWh H₂

Wasserstoff alternativlos zu sein scheint – um dort einen energieeffizienten Markthochlauf für grünen Wasserstoff zu fokussieren. Die Studienreihe „Grüner Wasserstoff für die Energiewende - Potentiale, Grenzen und Prioritäten“ versucht genau dies, nämlich prioritäre Anwendungsfälle Grenzen für den Einsatz von grünem Wasserstoff zu identifizieren.

I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Treibhausgasemissionen der einzelnen Sektoren seit 1990 mit Zielen bis 2045	1
Abbildung 2: NRL-Struktur.....	2
Abbildung 3: NRL-Projektpartner.....	3
Abbildung 4: Die Vier Phasen einer sektorübergreifenden Energiewende	6
Abbildung 5: Anteil von Erneuerbarer Energie in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr von 1990 bis 2021 (2022 vorläufig)	7
Abbildung 6: HYDEX: Nationale Wasserstoffherstellungskosten (Hydex) Grün vs. Grau 2021 & 2022.....	9
Abbildung 7: Prognostische Bedarfsentwicklung von Wasserstoff für 2030 und 2045 in Deutschland	10
Abbildung 8: Elektrolyse mit Rückverstromung.....	11

II. Abkürzungsverzeichnis

€ Euro

Äq Äquivalente

CH₄ Methan

CO₂ Kohlenstoffdioxid

EEG Erneuerbare-Energien-Gesetz

EU ET European Union Emissions Trading System (EU-Emissionshandel)

H₂ Wasserstoff

k. A. keine Angabe

kg Kilogramm

kWh Kilo-Watt-Stunden

NO_x Stickstoffoxide

NRL Norddeutsches Reallabor

PtL Power-to-Liquid (Energie zu Flüssigkeit)

PtX Power-to-X (Energie zu X)

t Tonne

THG Treibhausgas

TWh Terra-Watt-Stunde

III. Literaturverzeichnis

- acatech; Leopoldina; Akademienunion (2017): Sektorkopplung – Optionen für die nächste Phase der Energiewende. S. 90. <https://www.acatech.de/publikation/sectorkopplung-optionen-fuer-die-naechste-phase-der-energiewende/download-pdf?lang=de>.
- AGEE-Stat; UBA (2022): Monatsbericht-PLUS+ mit Informationen zur quartalsweisen Entwicklung der ERNEUERBAREN ENERGIEN in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Stand: 06.12.2022. 4.Quartal 2022. Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat); Umweltbundesamt (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/agee-stat_monatsbericht_plus_2022-q4_final.pdf.
- Agora Energiewende (2023): Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2022. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2023. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2022/2022-10_DE_JAW2022/A-EW_283_JAW2022_WEB.pdf.
- BDI (2021): Klimapfade 2.0. Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI). https://issuu.com/bdi-berlin/docs/211021_bdi_klimapfade_2.0_-_gesamtstudie_-_vorabve.
- BMWi (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile.
- BMWK; AGEE-Stat (2022a): Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2021. Grafiken und Diagramme unter Verwendung aktueller Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat), Stand: Februar 2022. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK); Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-2020.pdf>.
- BMWK; AGEE-Stat (2022b): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) (Stand: September 2022). Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK); Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2021.pdf;jsessionid=DF6D88B521E969F43BA140B6F7F1F814?__blob=publicationFile&v=36.
- BNetzA (2022): Monitoringbericht 2021. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA). https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/Monitoringbericht_Energie2021.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- Dena (2021): Dena-Leitstudie: Aufbruch Klimaneutralität. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Abschlussbericht. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf.
- E-Bridge (2022): H2-BAROMETER. Unabhängige Bewertung der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland. Ausgabe 2/2022. September 2022. <https://www.e-bridge.de/wp>

- content/uploads/2022/09/E-Bridge_H2-Barometer_Ausgabe-2_2022.pdf.
- European Commission (2020): A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe. COM(2020) 301 Final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301&from=EN>.
- FCH (2019): Hydrogen roadmap Europe: a sustainable pathway for the European energy transition. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH). https://www.clean-hydrogen.europa.eu/system/files/2019-02/Hydrogen%2520Roadmap%2520Europe_Report.pdf.
- Fraunhofer ISI (2021a): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Juni 2021. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI). https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf.
- Fraunhofer ISI (2021b): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Kurzbericht: 3 Hauptszenarien. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung IS. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/LFS_Kurzbericht.pdf.
- IKEM (2020): Wasserstoff - Farbenlehre Rechtswissenschaftliche und rechtspolitische Kurzstudie. Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. (IKEM). https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2021/01/IKEM_Kurzstudie_Wasserstoff_Farbenlehre.pdf.
- Kopernikus-Projekt Ariadne (2021): Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich. https://ariadneprojekt.de/media/2022/02/Ariadne_Szenarienreport_Oktober2021_corr0222.pdf.
- Öko-Institut (2021): Die Wasserstoffstrategie 2.0 für Deutschland. Institut für angewandte Ökologie (Öko-Institut). S. 235. <https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/06/Oeko-Institut-2021-Die-Wasserstoffstrategie-2.0-fuer-Deutschland-1.1.pdf>.
- 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 und Agora Verkehrswende. Prognos; Institut für angewandte Ökologie (Öko-Institut); Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (Wuppertal-Institut). https://static.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_231_KNDE2045_Langfassung_DE_WEB.pdf.
- Scientist for Future (2022): Wasserstoff in der Energiewende unverzichtbar, aber keine Universallösung. Policy-Paper Wärmewende 03-2022. https://info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2022/10/Policy_Paper_Wasserstoff.pdf.
- SPD; BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN; FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP). Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD); BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN; Freien Demokraten (FDP). <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1990812/04221173/eef9a6720059cc353d759a2b/2021-12-10-koav2021-data.pdf?download=1>.

IV. Anhang

a. Tabelle Überblick Gesamtsystemische Studien

Überblick Gesamtsystemische Studien		2030	2045
Brutto-Strombedarf in TWh/a	Klimapfade 2.0 (Netto-Verbrauch)	722	993
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-Strom)	763	1296
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-H2)	779	1242
	Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität	698	910
	Klimaneutrales Deutschland 2045	643	1017
	Ariadne Report (Technologie-Mix, REMod)	740	1117
Abgeregelte Leistung in TWh/a	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-Strom)	21	15
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-H2)	20	13
Leistung Elektrolyse in GW	Klimapfade 2.0	k.A.	k.A.
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-Strom)	9	58
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-H2)	11	77
	Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität	5	24
	Klimaneutrales Deutschland 2045	10	50
	Ariadne Report (Technologie-Mix REMod)	6-14	12-39
H ₂ -Bedarf in TWh/a	Klimapfade 2.0	43	237
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-Strom)	27	363
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-H2)	72	694
	Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität	39	226
	Klimaneutrales Deutschland 2045	63	265
	Ariadne Report (Technologie-Mix REMod)	76	376
H ₂ -Produktion in TWh/a	Klimapfade 2.0	43	99
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-Strom)	0	185
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-H2)	37	272
	Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität	k.A.	k.A.
	Klimaneutrales Deutschland 2045	19	96
	Ariadne Report (Technologie-Mix REMod)	31	181
H ₂ -Importe in TWh/a	Klimapfade 2.0	0	138
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-Strom)	0	178
	Langfristszenarien für die Transformation des deutschen Energiesystems (T45-H2)	35	422
	Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität	56	398
	Klimaneutrales Deutschland 2045	44	169
	Ariadne Report (Technologie-Mix REMod)	45	195

Impressum

Verantwortlich

Prof. Dr. Jens-Eric von Düsterlho
Leitung Department Wirtschaft,
Professor Allgemeine Betriebswirtschaftslehre,
Leitung Teilprojekt „Markt- & Geschäftsmodelle“ (NRL AG 5)

CC4E/HAW Hamburg
Raum 9.18
Berliner Tor 5
20099 Hamburg

E-Mail: STUDIE@NORDDEUTSCHES-REALLABOR.DE

Autor*innen

Jonas Bannert (CC4E/HAW Hamburg)
Dr. Felix Doucet (CC4E/HAW Hamburg)
Lia Lichtenberg (WETI/HS Flensburg)
Wissenschaftliche Mitarbeiter*innen NRL AG 5

Britta Heybrock (CC4E/HAW Hamburg)
Studentische Mitarbeiter*in NRL AG 5

CC4E/HAW Hamburg
Steindamm 96
20099 Hamburg

WETI/HS Flensburg
Nordstraße 2
24937 Flensburg



Layout & Grunddesign: Dr. Sandra Meyer-Ghosh, Christian Schneider, Nina Laskowski
Grafiken: Marc Weidemüller

Zum Projekt:

Norddeutsches Reallabor

Das Norddeutsche Reallabor (NRL) ist ein innovatives Verbundprojekt, das neue Wege zur Klimaneutralität aufzeigt. Dazu werden Produktions- und Lebensbereiche mit besonders hohem Energieverbrauch schrittweise defossilisiert – insbesondere in der Industrie, aber auch in der Wärmeversorgung und dem Mobilitätssektor. Hinter dem im April 2021 gestarteten Projekt steht eine wachsende Energiewende-Allianz mit mehr als 50 Partnern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik. Das Großprojekt hat eine Laufzeit von fünf Jahren (04/2021-03/2026). Dabei beträgt das Investitionsvolumen der beteiligten Partner rund 405 Mio. Euro. Als Teil der Förderinitiative „Reallabore der Energiewende“ wird das Projekt mit rund 55 Mio. Euro durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Weitere Fördermittel werden durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) bereitgestellt. Das NRL versteht sich als ausbaufähige Plattform für weitere Projekte.

Webseite: WWW.NORDDEUTSCHES-REALLABOR.DE

LinkedIn: [HTTPS://DE.LINKEDIN.COM/SHOWCASE/NORDDEUTSCHES-REALLABOR](https://de.linkedin.com/showcase/norddeutsches-reallabor)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages