

Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen



Energie-Forschungszentrum
Niedersachsen

H₂-WEGWEISER NIEDERSACHSEN - Energiesystemanalyse zur technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Integration, Speicherung und Konversion von Wasserstoff in Niedersachsen

Dr.-Ing. Andreas Lindermeir (Projektsprecher)

Abschlussbericht

Band 83

 Cuvillier Verlag Göttingen



H₂-Wegweiser Niedersachsen – Energiesystemanalyse zur technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Integration, Speicherung und Konversion von Wasserstoff in Niedersachsen





Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2024

Zugl: (TU) Clausthal, Univ., 2024

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2024

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Dieses Dokument unterliegt der Lizenz Open Access CC BY 4.0

Diese Veröffentlichung wurde aus Mitteln des Publikationsfonds Niedersachsen-Open, gefördert aus [zukunft.niedersachsen](http://zukunft.niedersachsen.de), unterstützt.

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2024

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-68952-945-1

ISBN eBook 978-3-68952-946-8



Projektsprecher

Dr.-Ing. Andreas Lindermeir
Technische Universität Clausthal,
Clausthaler Umwelttechnik
Forschungszentrum (CUTEC)

Teilprojektleitungen

TP1: Energiesystemanalysen

Dr. Raphael Niepelt
Institut für Solarenergieforschung
Hameln GmbH (ISFH)

TP2: Wasserstoff-Geschäftsmodelle

Prof. Dr.-Ing. Richard Hanke-
Rauschenbach
Leibniz Universität Hannover,
Institut für Elektrische Energiesysteme
(IfES)

TP3: Umweltanalyse

Prof. Dr. Christina von Haaren
Leibniz Universität Hannover,
Institut für Umweltplanung (IUP)

TP4: Ökologische Bewertung/LCA

Prof. Dr.-Ing. Christine Minke
Technische Universität Clausthal,
Institut für Aufbereitung, Recycling und
Kreislaufwirtschaftssysteme (IFAD)

TP5: Energiewirtschaftsrechtlicher Rahmen

Prof. Dr. jur. Hartmut Weyer
Technische Universität Clausthal,
Institut für deutsches und internationales
Berg- und Energierecht (IBER)

TP6: H₂-Untergroundspeicherung

Prof. Dr. Leonhard Ganzer
(Porenspeicher)
Technische Universität Clausthal,
Institute of Subsurface Energy Systems
(ITE)

Prof. Dr.-Ing.habil Karl-Heinz Lux
(Kavernenspeicher)
Technische Universität Clausthal,
Lehrstuhl für Geomechanik und
multiphysikalische Systeme (GEMS)

TP7: H₂-Konversion

Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek
(Reaktormodelle)
Technische Universität Clausthal,
Institut für Chemische und
Elektrochemische Verfahrenstechnik
(ICVT)

Dr.-Ing. Andreas Lindermeir
(Prozessmodelle)
Technische Universität Clausthal,
Clausthaler Umwelttechnik
Forschungszentrum (CUTEC)



Bearbeiter:innen und Autor:innen

Technische Universität Clausthal

Sebastian Braukhoff, M.Sc. (CUTEC)

Prof. Dr.-Ing. Jens Bremer (ICVT)

Sai Krishna Danda, M.Sc. (ICVT)

Prof. Dr. Leonhard Ganzer (ITE)

Janis Gerhardt-Mörsdorf, M.Sc. (IFAD)

Dr.-Ing. Birger Hagemann (ITE)

Dipl.-Jur. Thore Iversen (IBER)

Dr.-Ing. Andreas Lindermeir (CUTEC)

Christian Lüddecke, M.Sc. (ITE)

Prof. Dr.-Ing. habil. Karl-Heinz Lux
(GEMS)

Prof. Dr.-Ing. Christine Minke (IFAD)

Tianjie Pan, M.Sc. (GEMS)

Junqing Sun-Kurczinski, M.Sc. (GEMS)

Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek (ICVT)

Prof. Dr.-jur. Hartmut Weyer (IBER)

Leibniz Universität Hannover

Ole Badelt, M.Sc. (IUP)

Dr.-Ing. Astrid Bensmann (IfES)

Jonathan Brandt, M.Sc. (IfES)

Prof. Dr.-Ing. Richard Hanke-
Rauschenbach (IfES)

Prof. Dr. rer. hort. Christina von Haaren
(IUP)

Institut für Solarenergieforschung Hamel GmbH

Dr. Raphael Niepelt

Rachel Parziale, M.Sc.

Florian Peterssen, M.Sc.



VORWORT

Liebe Leserin, lieber Leser!

Aus erneuerbaren Energien erzeugter Wasserstoff wird ein wesentlicher Baustein sein, um die Klimaschutzziele zu erreichen und die Energiewende konsequent umzusetzen. Mit der „Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie“ vom Juli 2023 hat die Bundesregierung ein klares Bekenntnis abgelegt, dass Wasserstoff und seine Derivate eine wichtige Rolle bei der Dekarbonisierung und der anstehenden Transformationen der Energiewirtschaft, des Verkehrssektors sowie der Industrie einnehmen werden.

Die Funktionalitäten, die grüner Wasserstoff in einem defossilisierten Energiesystem übernehmen kann, sind dabei vielfältig. Sie umfassen sowohl die (Zwischen-)Speicherung von erneuerbarer elektrischer Energie als auch die Defossilisierung von Sektoren, die nicht oder nur mit hohem technischen oder finanziellen Aufwand elektrifizierbar sind. Hierzu gehören beispielsweise der Einsatz von Wasserstoff zur CO₂-neutralen Stahlerzeugung, die Substitution von grauem Wasserstoff im Chemiesektor oder die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen für den Luftverkehr.

Darüber hinaus wird Wasserstoff auch eine bedeutende industriepolitische Relevanz zugeschrieben, indem der Industrie- und Wirtschaftsstandort Deutschland gestärkt und die Grundlage für zukunftsfähige Arbeitsplätze geschaffen wird. Bestandteil der Strategie ist es auch, dass Deutschland bis 2030 Leitanbieter für Wasserstofftechnologien wird und die Technologieführerschaft entlang der Wertschöpfungskette übernimmt.

Niedersachsen kann in diesem Kontext auf eine Reihe von Alleinstellungsmerkmalen zurückgreifen: Neben hohen Erzeugungskapazitäten für regenerativen Strom sind insbesondere die geologischen Besonderheiten zur untertägigen Speicherung von Wasserstoff in Kavernen- oder Porenspeichern sowie eine in Teilen bereits vorhandene Infrastruktur, die auf die Distribution von Wasserstoff oder daraus erzeugten Derivaten umgestellt werden kann, zu nennen. Als Küstenland mit einer ausgeprägten maritimen Infrastruktur aus See- und Binnenhäfen wird Niedersachsen zukünftig auch eine Schlüsselrolle bei dem Import von grünem Wasserstoff; in Reinform oder auch in Form von Speichermolekülen wie Methanol oder Ammoniak; einnehmen. Zudem sind mehrere Offshore-Windparks in Niedersachsen an das Übertragungsnetz angebunden.

Die niedersächsische Wirtschaft bietet beste Voraussetzungen für eine frühe Anwendung von Wasserstoff: zur Substitution fossiler Stoffe in der Industrie (Stahlerzeugung, Raffinerien), als Energieträger für brennstoffzellenbasierte Mobilität (Züge, Schiffe und Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb), als Brenngas für Hochtemperaturprozesse im Wär-



mesektor (direkt oder beispielsweise in Form von synthetischem Methan) oder zur Rückverstromung in Gaskraftwerken oder Brennstoffzellenanlagen. Diese Alleinstellungsmerkmale werden ergänzt durch eine breit aufgestellte und gut vernetzte Forschungslandschaft mit einer Vielzahl an Forschungseinrichtungen, die im Bereich der Wasserstoffforschung auf hohem Niveau arbeiten.

Damit grüner Wasserstoff zu einem wichtigen Baustein der Energiewende wird, ist jedoch noch eine Vielzahl an systemischen, sozioökologischen, energierechtlichen und technischen Fragestellungen zu beantworten. Aufgrund der Komplexität und der engen Verzahnung der einzelnen Aspekte sind singuläre Betrachtungen hier oftmals nicht ausreichend, um eine ausgewogene Bewertung der jeweiligen Ansätze zu ermöglichen.

Das Innovationslabor „H₂-Wegweiser Niedersachsen“ hat sich dieser Aufgaben im Rahmen einer systemorientierten, ganzheitlichen und interdisziplinären Analyse gestellt. Dabei wurden unterschiedliche Wasserstoff-Implementierungsstrategien analysiert, Teilziele definiert und konkrete Schritte zu deren Erreichung erarbeitet. Durch das breit aufgestellte Projektkonsortium mit Expertise in den unterschiedlichen Fachdisziplinen und die Fokussierung auf die niedersächsischen Besonderheiten konnte ein deutlicher Mehrwert im Vergleich zu den bestehenden Studien und Analysen geschaffen werden.

Wir sind überzeugt, dass neben der direkten Nutzung von erneuerbarer elektrischer Energie auch daraus erzeugter grüner Wasserstoff und entsprechende Folgeprodukte in der Industrie, der Energiewirtschaft und im Verkehr zukünftig eine wichtige Rolle spielen werden. Aufgrund der strategischen Bedeutung einer Wasserstoffwirtschaft für das zukünftige Energiesystem sind Fragen zu der benötigten Infrastruktur, zum Bedarf an Produktions-, Speicher- und Konversionskapazitäten, zu Geschäftsmodellen und den rechtlichen Rahmenbedingungen, sowie den ökologischen Auswirkungen zu beantworten, um die erforderlichen langfristigen Investitionen abzusichern und in der Gesellschaft das Vertrauen in die Energiewende generell und Wasserstoff im Besonderen zu stärken.

Mit diesem Papier möchten wir einen wissenschaftlich fundierten Beitrag zur aktuellen Diskussion um die Rolle von Wasserstoff in einem zukünftigen erneuerbaren Energiesystem leisten. Dabei liegt der regionale Fokus der Analysen auf Niedersachsen, viele Ergebnisse und insbesondere die Methodiken lassen sich aber auch auf andere Bundesländer und Regionen übertragen.

Wir wünschen Ihnen eine anregende Lektüre, neue Erkenntnisse und Denkipulse und freuen uns auf den weiteren Dialog.

Clausthal-Zellerfeld, Hameln und Hannover, 29.10.2024

Die Autorinnen und Autoren



ABKÜRZUNGEN

Abkürzung	Beschreibung
ADP	Ressourcenbeanspruchung (englisch: Abiotic Depletion Potential)
AP	Versauerungspotenzial (englisch: Acidification Potential)
AWE	Alkalische Wasserelektrolyse
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BoP	Unterstützende Komponenten und Hilfssysteme (englisch: Balance of Plant)
CAPEX	Investitionskosten (englisch: Capital Expenditure)
CCS	CO ₂ -Abtrennung und Speicherung (englisch: Carbon Capture and Storage)
CCU	CO ₂ -Abtrennung und Nutzung (englisch: Carbon Capture and Utilization)
CCUS	CO ₂ -Abtrennung, Nutzung und Speicherung (englisch: Carbon Capture, Utilization and Storage)
CDR	CO ₂ -Entnahme aus der Atmosphäre und dauerhafte Einspeicherung (englisch: Carbon Dioxide Removal)
CO ₂ -Äq.	CO ₂ -Äquivalente
DA	Delegierter Rechtsakt (englisch: Delegated Act)
DAC	Abtrennung von CO ₂ aus der Atmosphäre (englisch: Direct Air Capture)
EE	Erneuerbare Energien
EFZN	Energie-Forschungszentrum Niedersachsen
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EP	Euthrophierungspotenzial (englisch: Eutrofication Potential)
EU	Europäische Union
fE	Funktionelle Einheit
GasRL	Richtlinie über gemeinsame Vorschriften für die Binnenmärkte für erneuerbares Gas, Erdgas und Wasserstoff vom 13. Juni 2024
GasVO	Verordnung über gemeinsame Vorschriften für die Binnenmärkte für erneuerbares Gas, Erdgas und Wasserstoff vom 13. Juni 2024
GWNB	Grundwasserneubildung
GWP100	Treibhausgaspotenzial mit Zeithorizont 100 Jahren (englisch: Global Warming Potential)
HTP	Humantoxizität (englisch: Human Toxicity Potential)



KPI	Schlüsselkennzahl (englisch: Key Performance Indicator)
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
LCA	Lebenszyklusanalyse (englisch: Life-Cycle Assessment)
LNG	Verflüssigtes Erdgas (englisch: Liquefied Natural Gas)
MEA	Monoethanolamin
NWG	Niedersächsisches Wassergesetz
OPEX	Betriebskosten (englisch: Operational Expenditure)
PEMWE	Polymerelektrolytmembran-Wasserelektrolyse
PPA	Stromabnahmevertrag (englisch: Power Purchase Agreement)
ppmv	Volumenmischungsverhältnis, Faktor 10^{-6} (englisch: parts per million volume)
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquid
PtX	Power-to-X
PV	Photovoltaik
RPC	Repräsentativer Konzentrationspfad (englisch: Representative Concentration Pathway)
RED	Erneuerbare-Energien-Richtlinie (englisch: Renewable Energy Directive)
RFNBO	Flüssige und gasförmige erneuerbare Kraftstoffe nicht biogenen Ursprungs (englisch: Renewable Fuels of Non-Biological Origin)
StromStG	Stromsteuergesetz
THG	Treibhausgas
TP	Teilprojekt
US\$	US-amerikanische Dollar
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
WNI	Wassernachhaltigkeitsindex





ZUSAMMENFASSUNG

Autor:innen: Jonathan Brandt, Sebastian Braukhoff, Christian Lüdekke, Junqing Sun-Kurczinski, Andreas Lindermeir

Wasserstoff ist ein zentraler Baustein für die Umstellung der deutschen Energieversorgung und Industrie auf klimaschonende und nachhaltige Prozesse. Niedersachsen verfügt über eine Reihe von Alleinstellungsmerkmalen, die es für eine Vorreiterrolle im Aufbau einer „grünen Wasserstoffwirtschaft“ prädestinieren und zur Stärkung des regionalen Wirtschaftssystems genutzt werden können. Dazu gehören hohe Erzeugungskapazitäten für regenerativen Strom, geologische Besonderheiten, die eine untertägige Speicherung von Wasserstoff ermöglichen, sowie die maritime Infrastruktur, die eine Teilnahme am globalen Energiehandel und dadurch auch den Import von Wasserstoff und seinen Derivaten ermöglicht. Darüber hinaus gibt es in Niedersachsen mit der Stahl- und Zementindustrie und den ansässigen Raffinerien bedeutende CO₂-Emittenten, die unter hohem Handlungsdruck stehen und für die der Einsatz von grünem Wasserstoff eine Option zur nachhaltigen Transformation darstellt.

Das H₂-Wegweiser-Projekt zielte darauf ab, die Rolle Niedersachsens innerhalb einer deutschen „Wasserstoffwirtschaft“ zu konkretisieren und so einen Beitrag zur ökologisch und volkswirtschaftlich zielführenden Einbindung von grünem Wasserstoff und seinen Derivaten in das niedersächsische Energiesystem der Zukunft zu leisten. Um der Vielschichtigkeit und Komplexität der damit verbundenen Fragestellungen gerecht zu werden, war eine koordinierte und interdisziplinäre Herangehensweise erforderlich, die technische, rechtliche, wirtschaftliche, gesellschaftliche und ökologische Aspekte verknüpft. Dazu wurden im H₂-Wegweiser die zentralen Technologien der Wasserstoffwertungskette, wie die Wasserstoff-Erzeugung, die -Untertagespeicherung und die -Konversion, durch den Einsatz von Modellansätzen auf unterschiedlich detaillierten Ebenen im Hinblick auf die zuvor genannten Aspekte systematisch analysiert und bewertet.

Den Rahmen für die ganzheitliche Betrachtung liefert die Energiesystemanalyse. Sie verdeutlicht die Relevanz der genannten Schlüsseltechnologien innerhalb eines defossilisierten Energiesystems in Deutschland und setzt sie in den niedersächsischen Kontext. Die Untersuchungen bestätigen, dass Wasserstoff und seine Derivate ein essenzieller Bestandteil eines zukünftigen grünen Energiesystems sein werden. Im untersuchten Basisszenario für das Jahr 2045 spielt Niedersachsen mit Anteilen von 36 % der deutschen Wasserstoff-Erzeugungskapazitäten und 30 % der deutschen Wasserstoff-Speicherkapazitäten eine entscheidende Rolle als Energiedrehscheibe für Wasserstoff.

Um den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft zu fördern, sind die regulatorischen Anforderungen an Wasserstoff zu vereinheitlichen und auf ihre Notwendigkeit zu prüfen. Neben



„grünem Wasserstoff“ sehen die Wasserstoffstrategien Deutschlands und der EU zumindest vorübergehend auch den Einsatz von „kohlenstoffarmem Wasserstoff“ vor. Bei den bestehenden Definitionen von „kohlenstoffarmem Wasserstoff“ wäre eine Prüfung wünschenswert, ob die Schwellenwerte für die Reduktion der CO₂-Emissionen vereinheitlicht werden können. Nach einer Markthochlaufphase sollten die Privilegierungen für „kohlenstoffarmen Wasserstoff“ grundsätzlich überprüft werden, wobei den unterschiedlichen Interessen der EU-Mitgliedstaaten Rechnung getragen werden muss.

Bei der Definition von „grünem Wasserstoff“ könnten die Regelungen für den Verkehrssektor auf Grundlage der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU eine Leitbildfunktion auch für andere Bereiche (beispielsweise für den Industriesektor) übernehmen. In Niedersachsen führen die in diesem Zug festgelegten langfristigen Rahmenbedingungen für die Stromversorgung von Elektrolyseuren zu einer Erhöhung der Produktionskosten von grünem Wasserstoff, stellen allerdings sicher, dass die produktionsbezogenen Emissionen gegenüber grauem Wasserstoff um 100 % sinken. Die gefundenen Übergangsregeln für eine Hochlaufphase bis 2030 schaffen den Spagat zwischen Emissions- und Kostenreduktion, wobei letztere den Aufbau regionaler Elektrolysekapazitäten erleichtert. Durch Anpassung der Regelungen könnten ähnliche Kostenminderungseffekte bei gleichzeitiger Absicherung der Emissionsreduktion bei veränderten Industriestrompreisen erzielt werden.

Auch wenn die langfristig geltenden Regeln für den Strombezug von Elektrolyseuren eine Vermeidung von in der Betriebsphase anfallenden Emissionen sicherstellen, zeigt die detaillierte Ökobilanz über den gesamten Lebensweg der Strom- und Wasserstofferzeugung, dass es auch in Zukunft keinen grünen Wasserstoff zum ökologischen Nulltarif geben kann. Grund dafür sind die mit dem Bau, Rückbau und der Entsorgung der EE-Anlagen und der Elektrolyse verbundenen vor- und nachgelagerten THG-Emissionen. Dabei überwiegt der Beitrag der EE-Anlagen im Vergleich zu den Elektrolyseuren. Neben der Klimawirkung sind auch weitere Wirkungskategorien, wie die Ressourcenbeanspruchung, bei der Nachhaltigkeitsbewertung der Wasserstofferzeugung zu beachten. Da bei heutigem Stand der Technik fast die Hälfte des Ressourcenbedarfs einer PEM-Elektrolyseanlage allein auf den Anodenkatalysator Iridium zurückzuführen ist, stellt hier insbesondere die Reduktion der Katalysatorbelastung einen wirksamen Hebel zur Steigerung der Ressourceneffizienz dar.

Ein weiterer kritischer ökologischer Aspekt für die großskalige elektrolytische Produktion von grünem Wasserstoff in Niedersachsen ist die Verfügbarkeit ausreichender Wassermengen. Auch wenn gemäß dem entwickelten Szenario im Vergleich zu anderen Wassernutzern nur geringe zusätzliche Wasserbedarfe für die Elektrolyse (+ 6 % bezogen auf die Jahresmenge) resultieren, kann besonders in den Sommermonaten und in trockenen Regionen eine Nutzungskonkurrenz zwischen Landwirtschaft, öffentlicher Wasserversor-



gung, Industrie und der Wasserstoffproduktion auftreten. Dies gilt insbesondere für Elektrolyseanlagen, die (überwiegend) mit PV-Strom betrieben werden. Hier wird der Wasserbedarf der Elektrolyse vom PV-Stromdargebot bestimmt, das sich wiederum tendenziell mit Zeiten niedriger Grundwasserstände überlagert. Durch eine entsprechende Priorisierung oder den Bau von Wasserspeichern kann möglichen Nutzungskonflikten vorgebeugt werden.

Trotz der genannten Einschränkungen stellt grüner Wasserstoff, der ausschließlich mit erneuerbarem Strom durch Wasserelektrolyse produziert wird, im Vergleich zu alternativen Wasserstoff-Produktionsrouten langfristig die vorzugswürdige Option für die effiziente und erforderliche Einbindung von Wasserstoff in ein klimafreundliches Energiesystem dar.

Die Gewährleistung der nationalen Versorgungssicherheit für die wasserstoffnutzende Industrie sowie die Stabilisierung des Stromsystems durch bedarfsgerechte Rückverstromung von Wasserstoff erfordern die großskalige Untergrundspeicherung von Wasserstoff, um die Risiken bezüglich wetterbedingter H₂-Eigenproduktion und Importabhängigkeiten zu mindern.

Die besondere Rolle Niedersachsens begründet sich hierbei im Wesentlichen in den weit ausgedehnten Salz- und porösen Gesteinsformationen im norddeutschen Becken. Gemäß den betrachteten Systemszenarien kann Niedersachsen aufgrund der guten Voraussetzungen mit den vorhandenen Untertagespeichern rund 30 % (13,9 TWh) des für Deutschland für 2045 abgeschätzten Wasserstoff-Speicherbedarfs von 46 TWh/a abdecken. Damit verfügt Niedersachsen unter allen Bundesländern über den größten Anteil an Wasserstoff-Untertagespeicherkapazitäten.

Analog zur heutigen Erdgasspeicherung und unter Berücksichtigung des Solidaritätsprinzips wird Niedersachsen auch Speicherkapazitäten für andere Bundesländer und EU-Länder bereitstellen. Für die Abdeckung des resultierenden Gesamtbedarfes sind sowohl Kavernenspeicher als auch Porenspeicher in Betracht zu ziehen.

Beide Speichertypen sind, mit technischen Anpassungen, dafür grundsätzlich geeignet. Die Umrüstungsfähigkeit ist allerdings individuell zu überprüfen und nachzuweisen: Für Erdgasspeicherkavernen ist insbesondere der Einfluss konvergenzbedingter Beanspruchung des Bohrungsausbaus zu berücksichtigen. Für deren Bewertung ist das geotechnische Instrumentarium vorhanden. Bei Porenspeichern sind hingegen Mischungsvorgänge zwischen eingespeistem Wasserstoff und im porösen Gestein verbliebenen Gasen sowie potenzielle mikrobielle Reaktionen zu berücksichtigen. Letztere haben zwar nur einen geringen Einfluss auf die Wasserstoffreinheit, erfordern allerdings bei Anbindung an die Gasinfrastruktur gegebenenfalls weitergehende Aufbereitungsschritte.

Neben der Umstellung bestehender Speicher auf Wasserstoff besteht zusätzlich Neubaubedarf, um die prognostizierten Speicherbedarfe abzudecken. Die sukzessive Umrüstung



von Erdgasspeicherkavernen auf Wasserstoff kann zwar den Bedarf in Niedersachsen abdecken, um ausreichende Speicherkapazitäten für Deutschland insgesamt bereitzustellen, besteht gleichwohl ein Bedarf an Kavernenneubau.

Unter Berücksichtigung der erforderlichen Realisierungszeiträume für die Umrüstung beziehungsweise den Neubau von Speichereinrichtungen und der bestehenden Investitionsrisiken und mit Blick auf die umweltpolitische Zielsetzung für 2045 ist die zeitnahe Entwicklung von Betreibermodellen in Zusammenarbeit mit Marktteilnehmern und der Abbau regulatorischer Hindernisse durch den Gesetzgeber erforderlich. Bezüglich letzterem gilt es, die formale Rolle des Wasserstoffspeicher-Betreibers klar zu definieren. Hier ist offen, wie die Umsetzung der europäischen GasRL in deutsches Recht bis 2026 ausgestaltet wird. Dies betrifft vor allem die Anpassung geltender Vorgaben zur Entflechtung von Erdgasspeicherung und -netzbetrieb im Verhältnis zum Wasserstoffbereich und die Frage, ob Sonderregelungen für kleine Wasserstoffverteilernetzbetreiber eingeführt werden.

Der Aufbau von Produktionskapazitäten für Wasserstoff-Derivate in Niedersachsen wird durch die regional hohe Wasserstoff-Erzeugung angereizt. Aufgrund von Kostenvorteilen werden, bei den getroffenen Annahmen zu Distributionskosten und Importeinschränkungen, 2045 bis zu 15 % der bundesweit erzeugten Konversionsprodukte in Niedersachsen produziert.

Die Konversion von Wasserstoff in Derivate hat mit rund 58 % (380 TWh) mengenmäßig den größten Anteil an der deutschen Wasserstoffnutzung (2045). Die wesentlichen Nutzer kommen dabei aus der Chemie- und Grundstoffindustrie sowie dem See- und Luftverkehr. Ab 2030 werden signifikante und zeitlich steigende Mengen an E-Kerosin und Schiffskraftstoffen und entsprechende Mengen an Wasserstoff erforderlich sein, um die EU-Quotenvorgaben für strombasierte nicht-biomassestämmige Kraftstoffe in den letztgenannten Bereichen zu erfüllen.

Die auch zukünftig begrenzten Erzeugungskapazitäten für EE-Strom und damit für grünen Wasserstoff machen eine Priorisierung auf der Nutzerseite erforderlich. Durch die angestrebte Sektorenkopplung und die weiter zunehmende Nutzung von Strom als Primärenergie im Mobilitäts-, Chemie- und Grundstoffsektor werden erhebliche weitere Bedarfe an EE-Strom generiert. Aufgrund der Effizienzeinbußen in der Power-to-X-(PtX-)Kette müssen bei der Priorisierung sowohl ökologische und energetische als auch betriebs- und volkswirtschaftliche Aspekte ausgewogen berücksichtigt werden. Zur Abdeckung der Bedarfe an Konversionsprodukten müssen der Ausbau von EE-Erzeugungsanlagen und Wasserstoff-Produktionskapazitäten weiter vorangetrieben und Importoptionen abgesichert und diversifiziert werden.

Zusätzlich ist die Versorgung der Konversionsanlagen mit Kohlenstoff sicherzustellen. Auch in einem klimaneutralen System ist Kohlenstoff für industrielle Wertschöpfungs-



pfade, wie die Herstellung von Kunststoffen, unabdingbar. Verfahren zur CO₂-Bereitstellung für PtX-Prozesse sind damit eine Schlüsseltechnologie für die Transformation der Industrie und Teile des Verkehrssektors hin zur Klimaneutralität. Für CO₂-neutrale Syntheseprodukte muss der Bedarf an nachhaltigem Kohlenstoff langfristig über die kaskadierte Nutzung von Biomasse oder über den Einsatz von atmosphärischem CO₂ gedeckt und die gesamte PtX-Prozesskette ausschließlich mit erneuerbaren Energien betrieben werden.

Die kostenintensive CO₂-Bereitstellung, insbesondere bei der Abscheidung aus der Atmosphäre, erschwert die ohnehin herausfordernde wirtschaftliche Perspektive einer inländischen Erzeugung von PtX-Produkten zusätzlich. So liegen die lokalen Produktgestehungskosten für PtX-Produkte noch um den Faktor 2 bis 4 über den aktuellen Marktpreisen. Wesentlicher Hebel für perspektivische Kostensenkungen ist insbesondere der EE-Strom- und der direkt damit zusammenhängende Wasserstoffpreis.

Neben der Effizienzsteigerung kann auch ein flexibler und dynamischer Betrieb von Elektrolyse- und Syntheseprozessen zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit beitragen. Solche Anpassungen bieten einerseits das Potenzial, die Betriebsstunden der Anlage zu erhöhen, andererseits bergen sie das Risiko, dass die Lebensdauer von Stacks, Katalysatoren und anderen Anlagenteilen negativ beeinflusst wird und die Kostensenkungen durch zusätzliche Aufwände für Wartung, Reparatur und Instandhaltung und den vorzeitigen Austausch von Kernkomponenten auf lange Sicht (über)kompensiert werden.

Bei allen Maßnahmen ist die Erreichung der Klimaziele als primäre Aufgabe immer wieder in den Fokus zu rücken. Zur Vermeidung von Lock-in-Effekten und zur transparenten Kontrolle der Wirksamkeit sind auch für PtX-Produkte Nachhaltigkeitskriterien notwendig und deren Einhaltung ist kritisch und neutral zu überprüfen. Dies ist aufgrund der geringen Energieeffizienz bei der Wandlung von EE-Strom in PtX-Produkte umso entscheidender.