

1. EINFÜHRUNG

Autor: Andreas Lindermeir

Das Projekt „H₂-Wegweiser Niedersachsen“ wurde als eines von fünf niedersächsischen Innovationslaboren für Wasserstofftechnologien im Zeitraum Mai 2020 bis August 2024 mit Mitteln des Niedersächsischen Vorab über das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur und die VolkswagenStiftung gefördert. Ziel des Projekts war es, den Beitrag von Wasserstoff zur zukünftigen Energieversorgung interdisziplinär zu analysieren. Es wurden technische, ökonomische, ökologische und rechtliche Aspekte berücksichtigt und in die Bewertung einbezogen.

Ein zentraler Aspekt war die Entwicklung eines flexiblen Methodenbaukastens, der weitere Untersuchungen und die Anwendung auf andere Regionen und Bundesländer ermöglicht, während gleichzeitig unterschiedliche Perspektiven ausgewogen berücksichtigt werden. Durch die Einbindung von Praxispartnern aus Industrie und Kommunen wurden relevante Fragen, Probleme und Anforderungen in die Analysen integriert.

Ein übergeordnetes Projektziel war der Transfer der Projektergebnisse in breite Teile der Gesellschaft und eine über das Projekt hinausgehende Vernetzung. Dazu fand ein regelmäßiger Austausch mit den anderen Innovationslaboren unter dem Dach der EFZN-Wissenschaftsallianz Wasserstofftechnologie statt.

Dass in den letzten Jahren in Niedersachsen, in Deutschland und auf europäischer Ebene, auch mit Unterstützung der niedersächsischen Landesregierung, auch außerhalb der fünf Wasserstoff-Innovationslabore bereits damit begonnen worden ist, den Übergang zu einer wasserstoffbasierten Energiewirtschaft einzuleiten, zeigt eine Auflistung von wichtigen Ereignissen und Entwicklungen im Bereich Wasserstoff, die seit 2020 stattgefunden haben und einen Bezug zu Niedersachsen aufweisen (siehe Abbildung 1). Sowohl nationale als auch internationale „Wegmarken“ sind berücksichtigt, sofern sie direkt oder indirekt Auswirkungen auf Niedersachsen haben.

Der Zeitstrahl verdeutlicht anhand von einzelnen Beispielen die dynamische Entwicklung, die Wasserstoffprojekte und begleitende Maßnahmen in den letzten Jahren durchlaufen haben. Dies umfasst sowohl große Demonstrationsprojekte zum Nachweis der technischen Machbarkeit und systemdienlichen Integration als auch eine Vielzahl von legislativen und regulatorischen Entscheidungen. Das Projekt „H₂-Wegweiser Niedersachsen“ fand sich somit in einem sich ständig wechselnden Umfeld wieder, wodurch eine kontinuierliche Nachjustierung der Inhalte und der zu Grunde liegenden Randbedingungen erforderlich war. Es ist zu erwarten (und auch zu hoffen), dass diese Dynamik aufrecht gehalten und weiter gesteigert wird, um kommerzielle Wasserstofftechnologien verfügbar und marktfähig zu

machen, Hemmnisse bei den Rahmenbedingungen weiter abzubauen und die vorhandenen Technologien dort, wo sie dringend für die weitere Defossilisierung benötigt werden, sinnvoll und zielgerichtet einzusetzen.



Abbildung 1: „Wegmarken“ bei der Implementierung von Wasserstoff mit Bezug zu Niedersachsen

Projektstruktur

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgte innerhalb von drei Ebenen mit unterschiedlichen Schwerpunkten: die „Systemebene“, die „Sozioökologische Ebene“ und die „Technische Ebene“. In diesen Bearbeitungsebenen befassten sich sieben Teilprojekte (TP) mit den unterschiedlichen Aspekten eines wasserstoffbasierten Energiesystems (siehe Abbildung 2), wobei der regionale Fokus auf Niedersachsen gerichtet war.

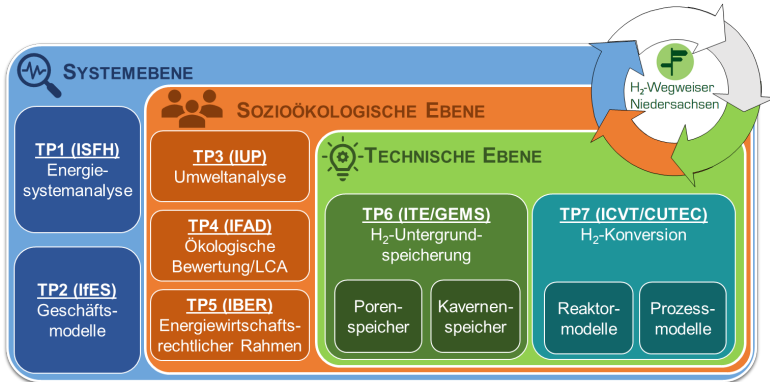


Abbildung 2: Struktur und Teilprojekte des Niedersächsischen Innovationslabors „H₂-Wegweiser“

Auf der technischen Ebene wurden konkrete Fragen zur Untertagespeicherung von Wasserstoff in (TP6) sowie zur Konversion von Wasserstoff in Folgeprodukte (TP7) betrachtet. Hier wurden die Datengrundlage für die technische Bewertung des systemdienlichen Beitrags von Wasserstoff-Speicher- und Konversionsverfahren generiert und die ökologischen, ökonomischen und rechtlichen Zusammenhänge hergestellt. Bei der Untertagespeicherung waren sowohl Kavernen- als auch Porenspeicher Gegenstand der Untersuchungen. Für die Wasserstoff-Konversion über PtX-Prozesse wurde ein flexibler und modularer Simulationsbaukasten entwickelt, der die aktuell im Fokus stehenden Konversionsrouten (Methan, Methanol, Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffe, Ammoniak) technisch abbildet, mit Kostenansätzen erweitert und gleichzeitig die Basis zur Aufstellung der Sachbilanzen für die Ökobilanzierung bereitstellte.

Die zweite Ebene befasst sich mit den sozioökologischen Aspekten eines wasserstoffbasierten Energiesystems. In den zugehörigen Teilprojekten wurden die mit dem Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft verbundenen Auswirkungen auf Menschen und Umwelt erfasst und Lösungsvorschläge für eine Erhöhung der Akzeptanz in der Bevölkerung (TP3) abgeleitet sowie Umweltauswirkungen über den Lebensweg von Wasserstoff-Systemen analysiert und bewertet (TP4). Da die Einführung einer Wasserstoffwirtschaft mit der Schaffung neuer Infrastrukturen einhergeht, für die ein passender Rechtsrahmen entwickelt werden muss, betrachtete das TP5 die relevanten energiewirtschaftsrechtlichen Aspekte.

Alle Teilergebnisse fließen in die übergeordnete Systemebene ein, die sich mit der Systemintegration (TP1) und der Bewertung und Entwicklung von Geschäftsmodellen (TP2) befasst. Hier wurden die Ergebnisse in einen räumlichen und zeitlichen Kontext gebracht und mittels Szenarioanalysen mögliche erneuerbare Energiesysteme unter besonderer Berücksichtigung von Wasserstofftechnologien untersucht.

Aufbau des Berichtes

Während das Projekt in drei Ebenen und sieben Teilprojekte strukturiert war, folgt dieser Bericht den drei Strängen einer Wasserstoff-Wertschöpfungskette (siehe Abbildung 3), um die inhaltlichen Verknüpfungen zwischen den Themenbereichen besser darstellen zu können. Startpunkt für alle drei Stränge sind dabei die Analysen zur Systemintegration von Wasserstoff, die die jeweiligen Bedarfe an Wasserstoff hinsichtlich Erzeugung, Speicherung und Konversion definieren und so die jeweiligen Randbedingungen festlegen.

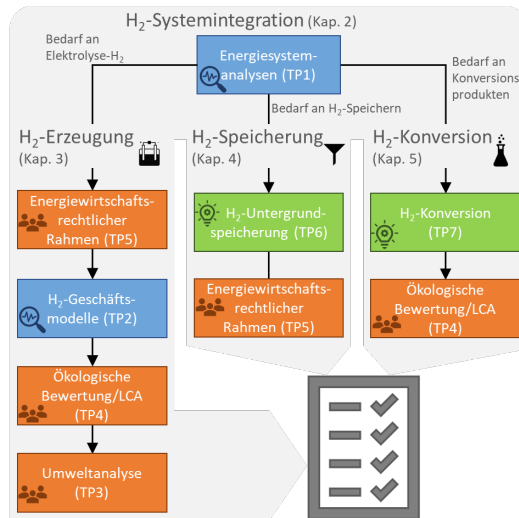


Abbildung 3: Struktur des Berichtes

Das Kapitel 2 befasst sich mit den Szenarioanalysen, die zur Ermittlung der Potenziale und Kapazitäten an erneuerbaren Energien und Wasserstoff für Niedersachsen herangezogen wurden. In Kapitel 3 werden dann die Wasserstoff-Erzeugung sowohl aus energiewirtschaftsrechtlicher und ökonomischer Perspektive betrachtet als auch deren ökologische Auswirkungen dargestellt. Für die Wasserstoff-Speicherung (Kapitel 4) wurden neben den technologischen Fragen zur untertägigen Speicherung von Wasserstoff in Kavernen- und Porenspeichern auch der dazugehörige regulatorische Rahmen untersucht. Die Konversion von Wasserstoff wird in Kapitel 5 beispielhaft für ausgewählte PtX-Prozessketten techno-ökonomisch bewertet und übergeordnete Fragen bezüglich Potenzialen, der Ökobilanz und einer systemdienlichen Betriebsweise betrachtet.

2. ENERGIESYSTEMANALYSEN

Autor:innen: Florian Peterssen, Rachel Parziale, Raphael Niepelt



Wasserstoff und seine Derivate sind essentielle Bestandteile eines zukünftigen grünen Energiesystems. Grüne Energieträger werden vor allem als Grundstoffe in der produzierenden Industrie, für die Sicherstellung der Versorgungssicherheit im Stromsystem sowie anteilsweise für die Bereitstellung von Prozesswärme und im Verkehr eingesetzt.



Niedersachsen spielt eine entscheidende Rolle als Energiedrehscheibe für Wasserstoff und seine Derivate. In Niedersachsen werden 36 % des grünen Wasserstoffs und 15 % aller weiteren grünen Energieträger für das zukünftige deutsche Energiesystem produziert.

2.1 ANSATZ

Für einen Blick auf die Rolle von Wasserstoff im Gesamtsystem und als Hintergrund für die detaillierteren Analysen in den anderen Teilprojekten wurde in Teilprojekt 1 ein Szenario für ein klimaneutrales Energiesystem in Deutschland und in Niedersachsen im Jahr 2045 erstellt. Anhand dessen sollten die folgenden Fragen beantwortet und der Input für die anderen Teilprojekte generiert werden:

- In welchen Anwendungsbereichen sollte Wasserstoff prioritär eingesetzt werden, um eine möglichst große Wirkung für die Energiewende zu erzielen?
- Welche Wasserstoff-Anteile sind in den unterschiedlichen Sektoren ökonomisch sinnvoll und welcher Bedarf an regenerativem Strom ergibt sich daraus?
- Welche Speicherkapazitäten sind dafür erforderlich?

Die Energiesystemanalysen dienen damit als Grundlage für die Einordnung der Ergebnisse der anderen Teilprojekte in den niedersächsischen Kontext. Das verwendete Energiesystemmodell ESTRAM deckt die gesamte energetische Wertschöpfungskette über alle Energieträger von der Erzeugung über Konversion, Speicherung und Transport bis hin zum Verbrauch ab. Letzterer umfasst die energetischen Bedarfe in allen Sektoren sowie den Bedarf an (petro)chemischen Grundstoffen in der Industrie. Um der starken Kopplung des niedersächsischen mit dem gesamtdeutschen Energiesystem Rechnung zu tragen und die Rolle Niedersachsens für die deutsche Energieversorgung untersuchen zu können, wird ein Szenario für ganz Deutschland entwickelt. Niedersachsen ist darin auf Landkreisebene aufgelöst, der Rest Deutschlands auf Bundeslandebene. Der Modellzeitraum beträgt ein Jahr mit stündlicher Auflösung. In einer Optimierung werden die Dimensionierung und die Betriebsführung der Importe, Erneuerbaren Energien, Konverter (Kraftwerke, Elektrolyse

etc.), Speicher und des Netzes so gewählt, dass zu möglichst geringen volkswirtschaftlichen Kosten der Verbrauch in jeder Stunde gedeckt werden kann. Alle im Szenario enthaltenen Wasserstofftechnologien und -komponenten sind in Tabelle 1 spezifiziert.

Tabelle 1: Wasserstoffkomponenten im Modell.

Kosten in EUR/kW geben Investitionskosten bezogen auf die Ausgangsleistung der Komponenten an, Kosten in %/a geben jährliche Instandhaltungs- und Betriebskosten relativ zu den Investitionskosten an. Der Wirkungsgrad für Speicher gibt die Durchspeichereffizienz an

Komponente	Kosten	Wirkungsgrad
Wasserstoffimport	3,72 EUR/kg	-
Elektrolyse	445 EUR/kW, 5 %/a	64,3 %
Wasserstoffspeicher	0,55 EUR/kWh, 700 EUR/kW, 2,5 %/a	85,7 %
Wasserstoffnetz	226 EUR/(kW·km), 1,75 %/a	Verlust: 0,02 %/km
Fischer-Tropsch-Anlage	290 EUR/kW, 5 %/a	70 %
Methanisierung	290 EUR/kW, 5 %/a	70 %
Wasserstoffbrenner	1.000 EUR/kW, 0,5 %/a	85 %
Wasserstofffahrzeuge	26,7 EUR/kW, 3,7 %/a	54,8 %
Wasserstoffzüge	1.000 EUR/kW, 0,5 %/a	109,4 % ¹
Wasserstoffheizung	260 EUR/kW, 3 %/a	85 %

¹ Zur Beschreibung der Wirkungsgrade von Verkehrstechnologien wurde die aktuelle Verkehrsleistungseffizienz des Straßenverkehrs (in Personenkilometer bzw. Tonnenkilometer per eingesetzter Energie, multipliziert mit dem Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors) als Referenzpunkt gewählt. Da Schienenfahrzeuge bezogen auf die Anzahl der transportierten Personen und/oder Güter eine höhere Effizienz als Straßenfahrzeuge aufweisen, ist es möglich, dass diese im Modell eine eigentlich unphysikalische Effizienz von größer 1 aufweisen. Im verwendeten Szenario trifft dies auf mit Wasserstoff und elektrisch betriebene Züge zu.

2.2 ERGEBNISSE

Im entwickelten Szenario für ein klimaneutrales deutsches Energiesystem 2045 sind Wasserstoff und seine Derivate essenzielle Bestandteile. Insgesamt werden pro Jahr 650 TWh Wasserstoff und 305 TWh Konversionsprodukte umgesetzt. Der Wasserstoffumsatz ist damit ungefähr halb so groß wie der Stromumsatz (vgl. Abbildung 4). Von den 650 TWh Wasserstoff werden 370 TWh importiert und 280 TWh per Elektrolyse in Deutschland hergestellt. Die Elektrolyse ist der größte Einzelverbraucher von Strom und kommt auf eine installierte Leistung von 83 GW.

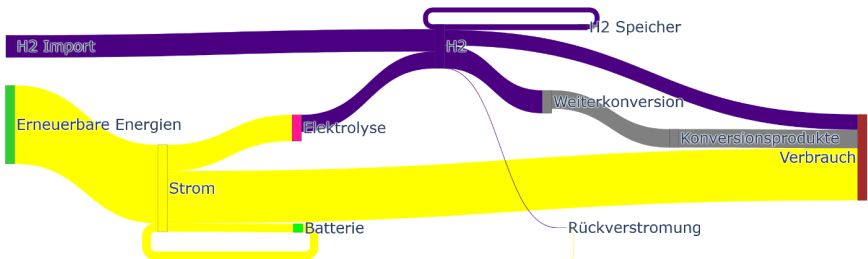


Abbildung 4: Vereinfachtes Sankey-Diagramm der jährlichen Energieflüsse im entwickelten Szenario

Wasserstoff kommen im Szenario mehrere Ausgleichsfunktionen zu. Zum einen werden 46 TWh Wasserstoffspeicher eingesetzt, um einen saisonalen Ausgleich zwischen höherer Erzeugung im Sommer (durch mehr PV-Strom) und höherem Bedarf im Winter (durch mehr Gebäudeheizung) zu ermöglichen. Zum anderen fängt die Elektrolyse Einspeisespitzen der Erneuerbaren, insbesondere der PV, ab. Dies lässt sich in Abbildung 5 erkennen. Die Elektrolyse läuft vor allem mittags, wenn viel PV-Strom im System ist, aber auch nachts, wenn viel Windstrom zur Verfügung steht. Wenn Strom aus Erneuerbaren knapp ist, läuft die Elektrolyse nicht. Durch diese Systemdienlichkeit kommt die Elektrolyse im deutschlandweiten Mittel auf 3.369 Volllaststunden pro Jahr.

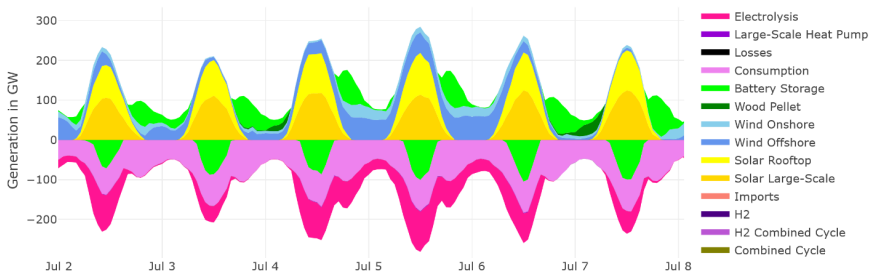


Abbildung 5: Stromanzeugung und -verbrauch in einer Sommerwoche

380 TWh Wasserstoff werden weiterkonvertiert. Damit macht die Weiterkonversion mehr als die Hälfte des Wasserstoffverbrauchs aus. Darüber hinaus kommt Wasserstoff für die

Bereitstellung von Prozesswärme (183 TWh) und im Verkehr (72 TWh) zum Einsatz. Nur ein kleiner Teil von ca. 1 TWh wird rückverstromt. Dies dient zu wenigen Zeitpunkten im Jahr der Deckung des Spitzenbedarfs, wenn alle anderen Arten der Stromerzeugung ausgeschöpft sind. Bei der Speicherung wird ein Energieverlust für die Kompression des Wasserstoffs angenommen. Dieser beläuft sich über ein Jahr auf insgesamt 14 TWh. Die Konversionsprodukte teilen sich auf in 179 TWh für die Grundstoffindustrie sowie 126 TWh für den Flugverkehr (vgl. Kapitel 5.1). Eine Verwendung von Wasserstoff für die Beheizung von Gebäuden findet nicht statt. Der Anteil der unterschiedlichen Sektoren an der Nutzung von Wasserstoff bzw. Konversionsprodukten ist in Abbildung 6 dargestellt.

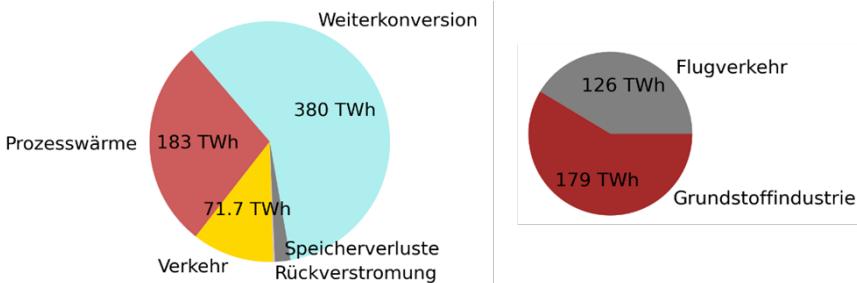


Abbildung 6: Einsatz des Wasserstoffs (links) und Einsatz der Konversionsprodukte (rechts). Die Differenz aus der türkisen Fläche und der Summe des rechten Kreises ergibt sich durch die Konversionsverluste

Niedersachsen hat einen bedeutenden Anteil an der Wasserstoffwirtschaft. Von den 280 TWh Wasserstoff aus Elektrolyse in Deutschland kommen ca. 36 % bzw. 100 TWh aus Niedersachsen. Damit leistet Niedersachsen den größten Anteil in Deutschland (siehe Abbildung 7 links). Mit 25 GW installierter Elektrolyse besitzt Niedersachsen auch die größte Erzeugungskapazität unter allen Bundesländern. Aufgrund des vergleichsweise hohen Anteils von Windstrom im niedersächsischen Strommix, kommt die Elektrolyse hier auf 3.974 Volllaststunden pro Jahr und damit auf 18 % mehr als im deutschlandweiten Mittel.

Bei der Weiterkonversion des Wasserstoffs leistet Niedersachsen ebenfalls einen bedeutenden Anteil in Deutschland. Knapp 47 TWh Konversionsprodukte werden im Bundesland hergestellt (Abbildung 7, rechts), dies entspricht rund 15 % der gesamtdeutschen Produktion.

Neben der Produktion spielt Niedersachsen auch für die Speicherung eine wichtige Rolle. 30 % (13,9 TWh) der gesamtdeutschen Kapazitäten an Wasserstoffspeichern liegen in Niedersachsen (Abbildung 8). Damit hat Niedersachsen unter allen Bundesländern den mit Abstand größten Anteil.

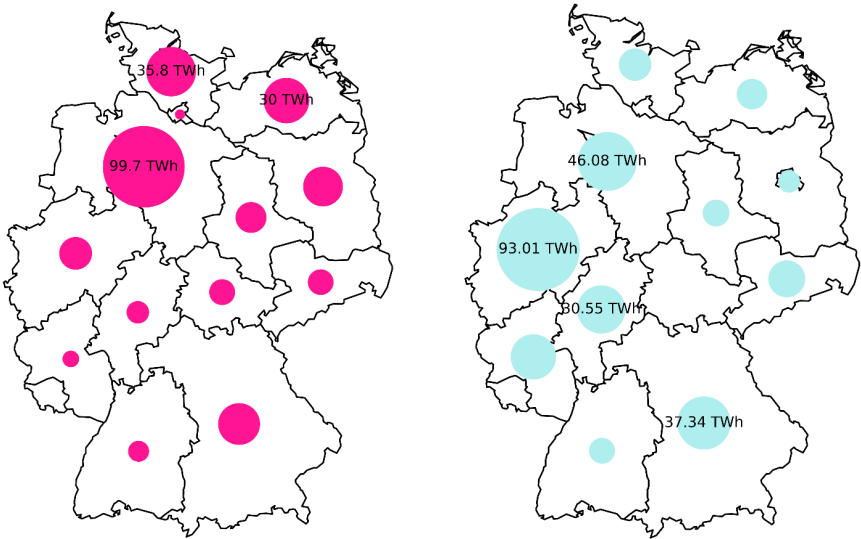


Abbildung 7: Erzeugter Wasserstoff (links) und erzeugte Konversionsprodukte (rechts) pro Bundesland pro Jahr

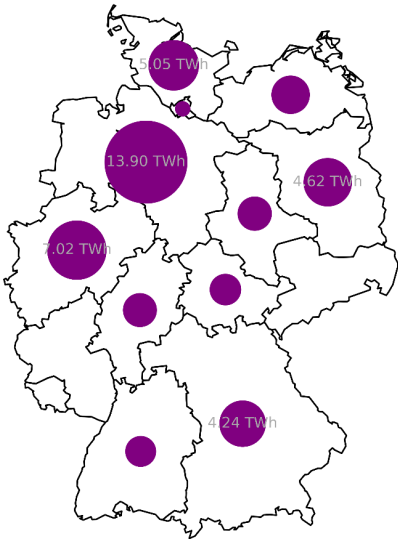


Abbildung 8: Installierte Wasserstoff-Speicherkapazitäten pro Bundesland

Innerhalb Niedersachsens wird gemäß dem Szenario in fast allen Landkreisen Wasserstoffproduktion stattfinden. Die Menge der Produktion korreliert stark mit der Menge der im jeweiligen Landkreis erzeugten erneuerbaren Energiemenge. Die höchste Erzeugung findet

mit 15,3 TWh im Landkreis Emsland statt. Dort stehen große Mengen von sowohl Off-shore-Wind als auch PV-Strom zur Verfügung. In einer Sensitivitätsanalyse zeigt sich jedoch, dass die Wasserstoffherzeugung innerhalb Niedersachsens auch anders verteilt werden kann, ohne dass sich die Gesamtsystemkosten oder andere Ergebnisse signifikant ändern. Das bedeutet, dass das Szenario auch mit anderen Verteilungen, welche in diesem Szenario noch nicht abgebildete Einflussfaktoren wie beispielsweise Wasserverfügbarkeit berücksichtigen, kompatibel ist. Die Konversionsanlagen stehen vor allem dort, wo viel Wasserstoff produziert wird. Aufgrund der einfacheren Speicher- und Transportierbarkeit der Konversionsprodukte wird der Wasserstoff oft nach Möglichkeit direkt vor Ort weiterverarbeitet.

2.3 EINORDNUNG

Die Volllaststunden der Elektrolyse sind geringer als die Werte, mit denen aktuell üblicherweise für einen wirtschaftlichen Betrieb kalkuliert wird. Auch die Volllaststunden, die sich aus den Betrachtungen zu möglichen Wasserstoffgeschäftsmodellen im Rahmen dieses Projekts ergeben, liegen mit ca. 5.000 h bei reinem EE-Strom-Bezug deutlich darüber. Demnach stellt sich die Frage, ob ein systemdienlicher Betrieb der Elektrolyseure entsprechend vergütet werden sollte.

Die verhältnismäßig kleine Rolle der Rückverstromung von Wasserstoff ist in der Verfügbarkeit von kostengünstigeren Alternativen begründet. Diese sind im dargestellten Szenario zu einem größeren Anteil Holzkraftwerke. Nach dem mittleren Szenario in (Ruiz et al. 2019) besteht für Deutschland ein Potential von 240 TWh Altholz und nachwachsender holziger Biomasse. Andere Studien, welche geringere Potentiale dafür annehmen, oder die Nutzung von Altholz und Stroh eher in der Prozesswärmeerzeugung verorten, sehen eine deutlich höhere Nutzung von (wasserstoffbetriebenen) Gaskraftwerken.