



Deutscher Verein des
Gas- und Wasserfaches e.V.



🔗 www.h2-dvgw.de

Interviewbasierte Analyse aktueller Entwicklungen zur Wasserstoffqualität

Studie

Dr. Matthias Janssen, Maximiliane Reger, Julia Goročovskij
Frontier Economics Limited
Udo Lubenau, Paul Damp
DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH



Interviewbasierte Analyse aktueller Entwicklungen zur Wasserstoffqualität

Studie

Februar 2024

DVGW-Förderkennzeichen G 202318

Zusätzlich gefördert durch

Initiative Get H2 (koordiniert durch nowega GmbH)

Zusammenfassung

Die Wasserstoffqualität im Netz ist eine der zentralen Fragestellungen im Aufbau der Wasserstoffwirtschaft. Die Reinheit des erzeugten Wasserstoffs variiert je nach Quelle, gleichzeitig unterscheiden sich die Anforderungen verschiedener Anwender je nach Verwendungszweck. Aktuelle Diskussionen zu sinnvollen Festlegungen bezüglich der Wasserstoffqualität auf nationaler und europäischer Ebene unterstreichen die hohe Komplexität der Thematik. Bisher festgelegte Wasserstoffqualitäten sollten in Abwägung von technologischer und wirtschaftlicher Umsetzbarkeit und den Ansprüchen relevanter Stakeholder kritisch hinterfragt werden.

Frontier Economics Ltd. und die DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH wurden von Get H2 (vertreten durch Nowega) und dem DVGW beauftragt, in einer interviewbasierten Kurzstudie die Herangehensweise an die Frage der Wasserstoffqualität in ersten kommerziellen Projekten in Deutschland zu untersuchen. Ziel war eine Bestandsaufnahme der aktuellen Best-Practice-Lösungen in Erzeugung, Transport und Speicherung von Wasserstoff mit geplanter Inbetriebnahme bis 2027. Der Fokus lag dabei auf der Identifikation von erwarteten Verunreinigungen, geplanten Aufbereitungsprozessen, sowie anvisierten Verantwortlichkeiten und der daraus resultierenden Wasserstoffqualität im Projekt.

Der Umgang mit Wasserstoffqualitäten wird in verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette unterschiedlich bewertet. In die Bewertung fließen neben der technischen Umsetzbarkeit auch praktische und wirtschaftliche Aspekte ein. Die Stufe mit der niedrigsten maximal umsetzbaren Wasserstoffqualität hat wesentlichen Einfluss auf die Qualität im Gesamtsystem.

Auf Erzeugungsseite variiert die Qualität des Wasserstoffs mit der verwendeten Technologie.

Aus Elektrolyse wird vor allem der Eintrag von Feuchtigkeit und Sauerstoff erwartet. Durch Sauerstoffabscheidung und Trocknung kann hier eine hohe Qualität erreicht werden (Grade D). Sollte sich eine geringere Qualität im Netz etablieren, können Erzeuger den Aufreinigungsaufwand perspektivisch abhängig vom Abrechnungsmodell im Markt anpassen.

In Bezug auf Wasserstoff aus Ammoniak-Cracking bestehen aufgrund der geringeren Technologiereife höhere Unsicherheiten. Das Ausmaß von Ammoniak- und Stickstoff-Rückständen aus dem Cracking-Prozess ist noch unklar. Eine Druckwechseladsorption ist aber integrierter Teil der Cracking-Anlage, sodass erwartet wird, dass eine Qualität über der aktuellen Grade A erreicht werden kann.

Auf Transportebene bestehen erhebliche Unterschiede zwischen neuen und umgestellten Leitungen für Wasserstoff.

Bei neuen Leitungen erwarten Betreiber keine nennenswerten zusätzlichen Verunreinigungen aus dem Transport, sodass in Punkt-zu-Punkt-Verbindungen aus neuen Leitungen auch kurzfristig eine hohe Qualität gehalten werden kann (Grade D).

In umgestellten Leitungen werden auf kurze Frist stärkere Verunreinigungen erwartet – zum einen aus dem ehemaligen Gasbetrieb (Schwefel- und Feststoffablagerungen), zum anderen aus Reinigungsprozessen (Feuchtigkeit und Stickstoff). Diese nehmen im Zeitverlauf zwar ab, einige Verunreinigungen aus dem Betrieb (insbesondere Feuchtigkeit und Sauerstoff) können allerdings auch langfristig nicht ausgeschlossen werden. Netzbetreiber können deshalb zwar eine sehr hohe Qualität (Grade D) nicht zusichern, jedoch eine höhere Qualität als Grade A.

In einem Gesamtnetz, in das nach und nach zusätzliche Leitungen integriert und auch immer wieder Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden, können daher Kontaminationen nach Einschätzung der Netzbetreiber nicht vermieden werden. Ein Gesamtnetz mit Qualität D wäre entsprechend nicht umsetzbar, eine Reinheit, die über die Spezifikationen des aktuellen Grade A hinausgeht, kann aber von Seiten der Netzbetreiber aufrechterhalten werden.

Verunreinigungen aus Speicherung variieren mit Standortgegebenheiten (mikrobielle Aktivität), eingesetzter Technologie (bspw. verwendetem Blanket) und voriger Nutzung. Speicherbetreiber erwarten grundsätzlich signifikante zusätzliche Verunreinigungen durch die Speicherung.

So bedingt die Geologie von Kavernen den Eintrag von Feuchtigkeit und aus mikrobieller Aktivität kommt es möglicherweise zu Verunreinigung durch Methan und Schwefelverbindungen. Wird Wasserstoff mit einer Reinheit, die Grade A entspricht, eingespeichert, würde die Qualität des ausgespeicherten Wasserstoffs erwartungsgemäß unter Grade A liegen.

Eine Aufreinigung zurück auf Grade A wird von den Befragten als umsetzbar eingeschätzt und in bisherigen Planungen berücksichtigt. Darüber hinausgehende Qualitäten sind mit signifikantem technischem Mehraufwand verbunden. Praktische Herausforderungen der Aufreinigung am Speicherstandort, d.h. noch vor der Einspeisung ins öffentliche Netz, umfassen dabei beispielsweise den benötigten Platzbedarf, Lärmemissionen sowie die Verwendung / Entsorgung des bei der Aufreinigung anfallenden Tail-Gases. Insbesondere für fortgeschrittene Projekte können durch höhere Qualitätsanforderungen, die bisher nicht eingeplant wurden, damit erhebliche finanzielle Risiken entstehen, die möglicherweise die Umsetzbarkeit der Projekte gefährdet. Der Erhalt einer Wasserstoffreinheit, die zwischen Grade A und D liegt, hängt von den expliziten Grenzwerten einzelner Verunreinigungen ab und muss von den Speicherbetreibern dringend geprüft werden.

Nach aktuellem Kenntnisstand bilden die Einschränkungen der Speicher damit aktuell den System-Bottleneck.

Die Studie zeigt deutlich, dass die Diskussion der Wasserstoffqualitäten entscheidend ist und weiter vertieft werden muss. Die optimale Qualität im System ist dabei diejenige, die, gegeben der technischen Rahmenbedingungen, die gesamtwirtschaftlichen Implikationen für den Standort Deutschland – etwa im Hinblick auf Kosten und Hochlaufgeschwindigkeit – für Vor- und Aufbereitung minimiert. Um diese optimale Qualität für das Gesamtsystem zu etablieren, sollte neben den Diskussionen um bestehende Qualitätsniveaus (Grade A und D) der Fokus auf Untersuchungen von Grenzwerten für einzelne Verunreinigungen gelenkt werden. Hier ist vor allem für Speicherbetreiber zu prüfen, ob für einzelne Verunreinigungs-komponenten höhere Anforderungen erreicht werden können, als für Grade A aktuell vorgesehen. Gleichzeitig sollten die konkreten, differenzierten Anforderungen verschiedener Anwender erfasst werden.

Sowohl auf nationaler als auch europäischer Ebene gibt es dabei aktuell Diskussionen um die Aktualisierung von Qualitätsniveaus: So gibt es auf deutscher Seite das Verbundprojekt "Normungsroadmap Wasserstofftechnologien", in dem nationale Standards erarbeitet werden. Parallel hat die CEN auf europäischer Ebene kürzlich eine Umfrage zu Wasserstoffqualitätsanforderungen von zukünftigen Anwendern durchgeführt, um darauf aufbauend Qualitätsniveaus zu definieren. Eine Mehrzahl der Befragten gab dabei an, eine Qualität von 99,5% zu akzeptieren. Parallel werden auch in anderen Europäischen Staaten ähnliche Überlegungen angestellt – etwa von den Niederlanden, die kürzlich ebenfalls eine Qualität von 99,5% für das niederländische Netz vorgeschlagen haben.

In einem zukünftigen integriertem europäischen Wasserstoffnetz bleibt die Einbindung der nationalen Diskussion auf der europäischen Ebene daher weiterhin essenziell.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|---|---------------------------------------|----|
| 1 | Methodik | 1 |
| 2 | Executive Summary | 3 |
| 3 | Hintergrund | 4 |
| 4 | Wasserstoffreinheit – Erzeugung..... | 10 |
| 5 | Wasserstoffreinheit – Transport..... | 13 |
| 6 | Wasserstoffreinheit – Speicher..... | 17 |
| 7 | Implikation für das Gesamtsystem..... | 20 |
| 8 | Nächste Schritte | 22 |

1 Methodik

Um eine Bestandsaufnahme der aktuellen Erkenntnisse bezüglich der erreichbaren Wasserstoffqualität im Netz vorzunehmen, wurden Interviews mit Unternehmensvertretern geführt, die aktiv an aktuellen Demonstrations- und Umsetzungsprojekten beteiligt sind.

Die Auswahl der Gesprächspartner erfolgte unter Berücksichtigung von drei Faktoren:

- **Projektstandort:** Um einen Überblick über die Entwicklungen auf nationaler Ebene zu schaffen lag der Fokus der Studie auf Projekten, die in Deutschland verortet sind.
- **Projektfortschritt:** Projekte, die eine fortgeschrittene Planung bzw. Realisierung aufweisen und eine Inbetriebnahme bis ungefähr 2030 anstreben wurden priorisiert, um möglichst konkrete Überlegungen zu erfassen.
- **Projektdiversität:** Zur Betrachtung eines möglichst umfassenden Bildes wurden Projekte mit diversen Technologien und Rahmenbedingungen entlang der gesamten Wasserstoffwertschöpfungskette von der Erzeugung über den Transport und die Speicherung ausgewählt.

Eine Übersicht der beteiligten Unternehmen ist in Abbildung 1 zu sehen.

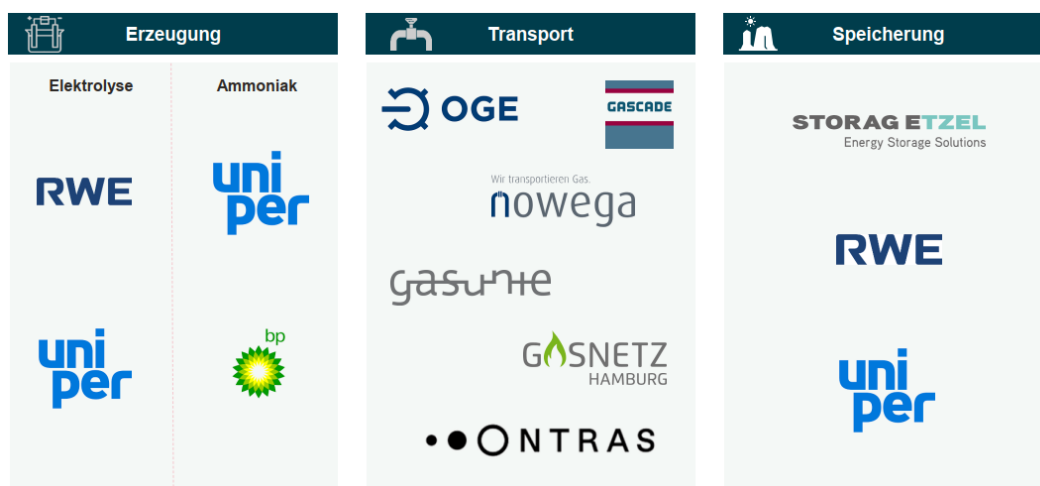


Abbildung 1: Übersicht der Unternehmen, die Interviewpartner angehören, eingeteilt in die Themenfelder Erzeugung, Transport und Speicherung

Zur Gesprächsvorbereitung wurden Fragebögen an die Gesprächspartner geschickt, die sich in fünf verschiedene Fragenkategorien unterteilen lassen. In den ersten beiden Fragenkategorien „Allgemeine Unternehmensinformationen“ und „Fragen zu Marktaktivitäten“ wurden grundsätzliche Informationen zu Unternehmen und Projekten abgefragt. Diese waren inhaltlich für alle Gesprächspartner identisch. Die verbleibenden drei Fragenkategorien „Allgemeine Fragen zur Wertschöpfung“, „Fragen zu technischen Daten“ und „Fragen zur Wasserstoffqualität“ waren spezifisch auf das jeweilige Themengebiet abgestimmt. Gemeinsam mit den Fragebögen wurden für die verschiedenen Themengebiete spezifische erwartete Verunreinigungsprofile erstellt und an die Gesprächspartner verteilt, die als Diskussionsgrundlage dienten.

In den anschließenden Gesprächsterminen wurde in strukturierten Interviews der erwartete Eintrag von Fremdstoffen herausgearbeitet und kritische Punkte aus den Fragebögen vertieft. Hauptaugenmerk lag bei der Auswertung auf Fragestellungen bezüglich erwarteter

Verunreinigungen, eingesetzter und diskutierter Aufreinigungstechnologien, projektspezifischen Diskussionen bezüglich Reinheitsniveaus und projektinterner Vereinbarungen bezüglich Verantwortlichkeiten.

Nach Abschluss aller Gespräche wurden die Ergebnisse strukturiert ausgewertet. Ein besonderes Augenmerk lag auf wiederkehrenden Mustern, identifizierten Strategien und unterschiedlichen Herangehensweisen zwischen Projekten. Die Aufbereitung der Ergebnisse erfolgte anonymisiert, um die Möglichkeit, Rückschlüsse auf einzelne Unternehmensaussagen ziehen zu können, zu vermeiden. Die Ergebnisse der Studie wurden final in einem Workshop mit den beteiligten Unternehmensvertretern besprochen, um mögliche Missverständnisse auszuräumen und zu einem abgestimmten Bild zu kommen.

2 Executive Summary

Interviewbasierte Analyse aktueller Entwicklungen zur Wasserstoffqualität im Auftrag von Get H2 und DVGW

| Hintergrund | <ul style="list-style-type: none"> Die Wasserstoffqualität im Netz ist eine der zentralen Fragestellungen im Aufbau der Wasserstoffwirtschaft. Aktuelle Diskussionen bezüglich der Wasserstoffqualität auf nationaler und europäischer Ebene unterstreichen die hohe Komplexität der Thematik. In vorangegangenen Studien wurden die Anforderungen an die H2-Reinheit eines künftigen Wasserstoffnetzes formuliert, aber bewusst keine unmittelbaren Handlungsempfehlungen oder Prognosen für ein künftiges Wasserstoffnetz ausgesprochen. Frontier Economics Ltd. & die DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH wurden von Get H2 (vertreten durch Nowega) und dem DVGW beauftragt, in einer interviewbasierten Kurzstudie den Umgang mit Wasserstoffqualität in ersten kommerziellen Projekten in Deutschland zu untersuchen. Ziel war eine Bestandsaufnahme der aktuellen Best-Practice-Lösungen in Erzeugung, Transport und Speicherung von Wasserstoff mit geplanter Inbetriebnahme bis 2027 | | | | | | |
|---|---|---|-----------|----------|---|--|---|
| Vorgehen | <ul style="list-style-type: none"> Zehn Unternehmen mit insgesamt zwölf Geschäftsbereichen wurden basierend auf Projektstandort, Projektfortschritt, und Projektdiversität als Teilnehmende der Studie ausgewählt: <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="background-color: #1a3d4d; color: white;">Erzeugung</th> <th style="background-color: #1a3d4d; color: white;">Transport</th> <th style="background-color: #1a3d4d; color: white;">Speicher</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>  </td> <td>  </td> <td>  </td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> Zur Diskussion mit teilnehmenden Unternehmensvertretern wurden Fragebögen verschickt; im Anschluss wurde über strukturierte Interviews der erwartete Eintrag von Fremdstoffen weiter herausgearbeitet und kritische Punkte vertieft. Nach Durchführung der Interviews wurden erfasste Informationen strukturiert ausgewertet, um sich wiederholende Muster und mögliche Widersprüche zu identifizieren. Ziel war die Identifikation einer übergreifenden Strategie für jede Wertschöpfungsstufe, die anhand einer Auswahl der ersten Wasserstoffprojekte für ein abstrahiertes Netzmodell eine Bestandsanalyse ermöglicht. | Erzeugung | Transport | Speicher |  |  |  |
| Erzeugung | Transport | Speicher | | | | | |
|  |  |  | | | | | |

Interviewbasierte Analyse aktueller Entwicklungen zur Wasserstoffqualität im Auftrag von Get H2 und DVGW

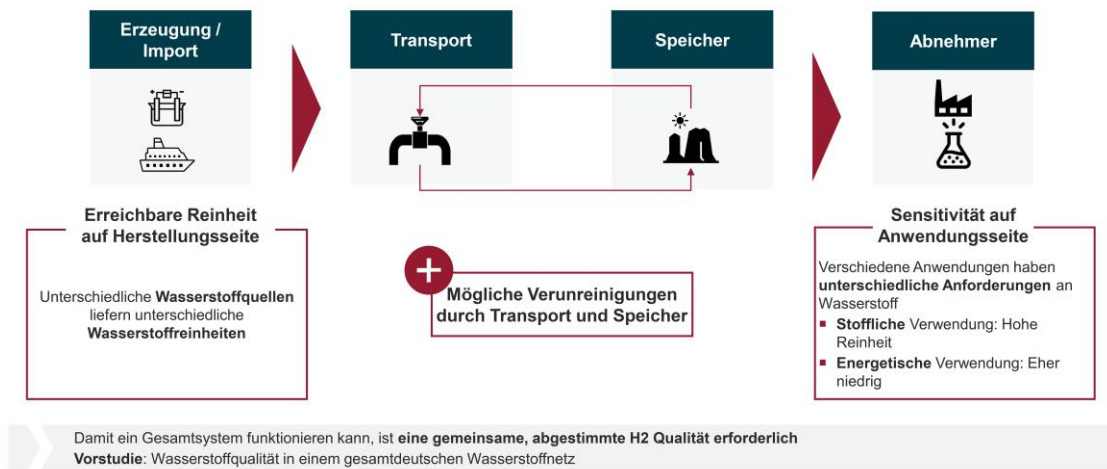
| | | | |
|-----------------------------|--|--|---|
| Kern- ergebnisse | Erzeugung | <ul style="list-style-type: none"> Qualität des erzeugten Wasserstoffs variiert je Technologie <ul style="list-style-type: none"> Aus Elektrolyse kann (mit Sauerstoffabscheidung und Trocknung) eine hohe Qualität erreicht werden Höhere Unsicherheiten für Ammoniak-Cracking, mit einer Druckwechselsorption soll jedoch trotzdem eine Qualität über der aktuellen Grade A erreicht werden können Erzeugungsseitig kann insgesamt voraussichtlich eine Qualität über dem aktuellen Grade A erreicht werden. | <p>Aktuelle Einschränkungen der Speicher begrenzen die erreichbare Qualität im Gesamtnetz</p> |
| | Transport | <ul style="list-style-type: none"> Verunreinigungen durch Transport unterscheiden sich zwischen neuen und umgewidmeten Leitungen. <ul style="list-style-type: none"> für neue Leitungen kurzfristig eine hohe Qualität haltbar (Grade D) In umgewidmeten Leitungen werden kurzfristig stärkere Verunreinigungen erwartet, mittel- bis langfristig kann eine mittlere Qualität gehalten werden, die über die aktuelle Grade A hinausgeht. Langfristig kann im Transportnetz eine Qualität >A (aber < D) erreicht werden. | |
| | Speicher | <ul style="list-style-type: none"> Aus Speicherung werden signifikante Verunreinigungen erwartet; bei Einspeicherung von Grade A ist der ausgespeicherte Wasserstoff voraussichtlich unter Grade A Weiterer Analysebedarf besteht bzgl. erreichbarer Grenzwerte einzelner Verunreinigungen Eine Aufreinigung zurück auf Grade A wird von den Befragten als umsetzbar eingeschätzt und in bisherigen Planungen berücksichtigt; höhere Qualitäten sind jedoch mit signifikantem Mehraufwand und großer Unsicherheit verbunden. | |
| Nächste Schritte | <ul style="list-style-type: none"> Diskussion der Wasserstoffqualitäten ist entscheidend; dabei sollte der Fokus weg von Diskussionen um bestehende Qualitätsniveaus (Grade A und D) und hin zu Untersuchungen von Grenzwerten für einzelne Verunreinigungen Die Einbindung der nationalen Diskussion auf der europäischen Ebene bleibt weiterhin essenziell | | |

3 Hintergrund

Hintergrund und Ziel der Studie

| | |
|--------------------------------------|--|
| Herausforderung | <ul style="list-style-type: none"> In Deutschland und Europa soll in Höchstgeschwindigkeit eine nachhaltige Wasserstoffwirtschaft aufgebaut werden. Um dieses Ziel zu erreichen, gilt es, diverse Wasserstoffquellen (und –"farben") zu nutzen um unterschiedlichste Abnehmer mit einem breiten Spektrum an Anforderungen zu versorgen. Netz- und Speicherbetreiber stehen vor der Herausforderung, eine effiziente Infrastruktur zu schaffen, die Produzenten und Abnehmer zusammenbringt. Wasserstoffqualität ist dabei eine wichtige Stellgröße für Investitionen. |
| Offene Fragen aus Vorarbeiten | <ul style="list-style-type: none"> Lösungsansätze: Die Vorstudie hat die Anforderungen an die H2-Reinheit eines künftigen Wasserstoffnetzes formuliert, aber bewusst keine unmittelbaren Handlungsempfehlungen oder Prognosen für ein künftiges Wasserstoffnetz ausgesprochen. Kurzfristige Implikationen: Viele bestehende Studien haben einen Fokus auf die langfristigen Vision 2045, von unmittelbaren Entwicklungen wird oft abstrahiert. <ul style="list-style-type: none"> → Eine universalgültige Handlungsempfehlung über den gesamten Entwicklungspfad erscheint aufgrund der Heterogenität der Einzelbestandteile und Vielzahl von Variablen des Gesamtsystems schwierig. |
| Unser Ansatz | <ul style="list-style-type: none"> Um die Heterogenität von Projekten zu adressieren, wurden in einer interviewbasierten Auswertung konkrete Lösungsansätze zum Umgang mit diversen Qualitätsanforderungen an Wasserstoff untersucht, mit Fokus auf die Jahre bis 2027. Erste „First Mover“ Projekte gehen in den nächsten 5 Jahren in Betrieb und legen damit den Grundstein für das Wasserstoff-Kernnetz. Hierzu werden in den kommenden Monaten wegweisende Investitionsentscheidungen getroffen. <ul style="list-style-type: none"> → Ergebnis: Essenz der aktuellen „Best Practice“ in den ersten kommerziellen Projekten. |

Warum ist Wasserstoffreinheit für das Gesamtsystem relevant?



Frontier Economics und DBI leiten als neutrale dritte Partei die Durchführung der Studie



- Beratungsunternehmen mit Fokus auf Gestaltung von Marktregeln und Strategien in verschiedensten Branchen
- Über 80 Ökonom:innen aktiv im Geschäftsbereich Energie, (größte Sektorexpertise des Unternehmens)

- Unterstützung von Unternehmen bei ökonomischen Herausforderungen und Hilfe bei der Entwicklung innovativer politischer Instrumente und Regulierungsregimes
- Erfahrung erstreckt sich auf diverse Branchen

| Themengebiete | | | |
|---|---|--|--|
| Energie und Klima | | | |
| Synthetische Kraftstoffe | Strom | Gas | Wasserstoff |
| Handel / Verbraucher | Finanzdienstleistungen | Automotive | Transport |
| Wasser | Technologie | Gesundheit / Soziales | Kommunikation |
| Relevante Projekterfahrung | | | |
| FNB Gas | Analyse der Rolle von Wasserstoff im Wärmemarkt | Bewertung von Politikmaßnahmen zur Regulierung von Wasserstoffnetzen | |
| Beratung zu Hemmnissen für Hochlauf klimaneutraler Gase und entsprechender Politikmaßnahmen | | Green Gas Initiative | Identifizierung / Analyse der Perspektiven von klimaneutralen Gasen und erforderlichen Politikmaßnahmen in 8 europäischen Ländern. |



- Dienstleistungs- und Engineeringunternehmen im Bereich der Gasindustrie
- Über 150 Mitarbeiter:innen mit dem Fokus auf Lösungen im Bereich Transport, Speicherung und Anwendung von Gasen

- Umfangreiche Erfahrungen bei der Lösung von chemischen und technischen Fragestellungen beim Übergang von Erdgas auf „grüne“ Gase
- Erfahrungen auf der gesamten Wertschöpfungskette von Gaserzeugung bis zur Anwendung

| Fachgebiete | | | |
|----------------------------|-----------------|--------------|---------------------------------|
| Gasspeicherung | Gasnetze | Gaschemie | Erneuerbare Gase |
| Prüfstelle | Gasaufbereitung | Gasanwendung | Gasverfahrenstechnik |
| Relevante Gase | | | |
| Wasserstoff | Erdgas / LNG | Biogas | CO ₂ |
| Relevante Projekterfahrung | | | |
| ENERGIEPARK BAD LAUCHSTÄDT | HIPS | H2-Infra | Leitprojekt H2Giga |
| MeHySto | | | verifyHy HydrogenREADY Database |

Projektüberblick



- **Auswahl teilnehmender Unternehmen** nach Projektstandort, Projektfortschritt, und Projektdiversität
- Entwicklung eines „**Verunreinigungsprofils**“ je Wertschöpfungsstufe und Technologie
- Versenden von **Fragebögen** zur Diskussion mit teilnehmenden Unternehmensvertretern
- Über strukturierte Interviews wurde der erwartete Eintrag von Fremdstoffen herausgearbeitet und kritische Punkte aus den Fragebögen vertieft
- Nach Durchführung wurden die Interviews strukturiert **ausgewertet**.
- Besonderes Augenmerk lag dabei auf
 - Wiederkehrenden Mustern
 - Identifizierten Strategien
 - (Scheinbaren) Widersprüchen zwischen Projekten
- Aus den konkreten Ergebnissen wurden (anonymisiert) Bestandsanalysen für abstrahierte Netzmodelle abgeleitet.
- Final wurden erste **Handlungsempfehlungen** für weitere Marktteilnehmer und Verbände abgeleitet

Die Auswahl der Interviewpartner erfolgte auf Basis relevanter Kriterien

| | Anforderung | Hintergrund |
|--------------------|---|--|
| Standort | <ul style="list-style-type: none"> Projektstandorte möglichst in Deutschland bzw. deutscher Regulatorik unterliegend | <ul style="list-style-type: none"> Lokale Projekte sind unmittelbar umzusetzen und passen zum zeitlichen Fokus (Umsetzung bis 2027). Die Verbindung zu einem integrierten europäischen Backbone wird erwartungsgemäß erst mittelfristig relevant |
| Projektfortschritt | <ul style="list-style-type: none"> Zeitnahe Inbetriebnahme (bis ~2030) | <ul style="list-style-type: none"> Fortgeschrittene Projekte haben die Frage nach Wasserstoffqualität bereits diskutiert und können konkrete Antworten basierend auf praktischen Erkenntnissen geben. |
| Projektvielfalt | <ul style="list-style-type: none"> Abdeckung diverser Technologien und Rahmenbedingungen | <ul style="list-style-type: none"> Abdeckung eines möglichst umfassenden Bildes an möglichen Fällen durch die Studie Diverse Teilnehmende pro Technologie / Wertschöpfungsstufe, um eine solide Ausgangsbasis zu schaffen |

Die befragten Unternehmen decken alle relevanten Stufen der Wertschöpfung ab

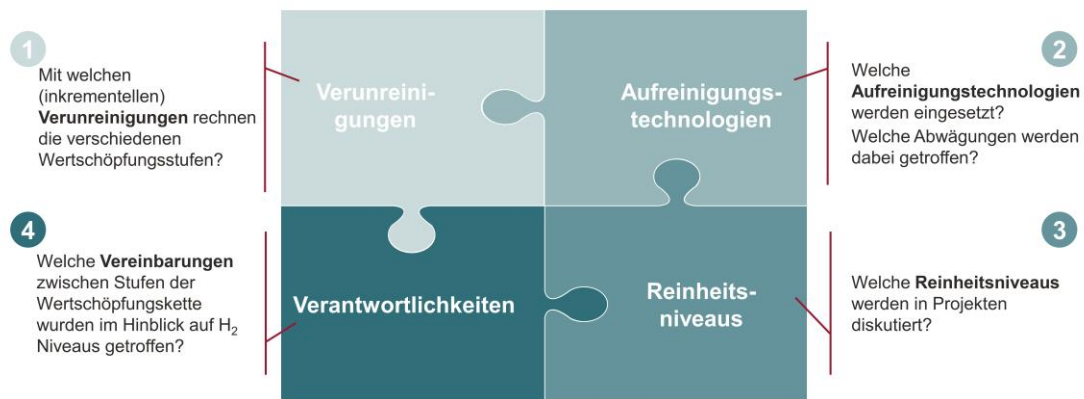
| | Erzeugung | Transport | Speicherung |
|---------------------------|--|--|---|
| Geplante Interviewpartner | <p>Elektrolyse</p> <p>RWE</p> <p>uni per</p> | <p>OGE</p> <p>GASCADE</p> <p>Wir transportieren Gas.</p> <p>nowega</p> <p>gasurHE</p> <p>GASNETZ HAMBURG</p> <p>ONTRAS</p> | <p>STORAG ETZEL</p> <p>Energy Storage Solutions</p> <p>RWE</p> <p>uni per</p> |
| | <p>Ammoniak</p> <p>uni per</p> <p>bp</p> | | |

Fragebogen und Interview haben alle für die Kurzstudie relevanten Themengebiete aus technischer und organisatorischer Perspektive abgedeckt

| Fragekategorie | Inhalt |
|--|--|
| 1 Allgemeine Unternehmensinformationen | <ul style="list-style-type: none"> Unternehmen, Größe des Unternehmens Identifikation des Ansprechpartners und Kontaktdaten |
| 2 Fragen zu Marktaktivitäten | <ul style="list-style-type: none"> Auflistung der relevanten Projektaktivitäten Auswahl der relevanten Wertschöpfungsstufen |
| 3 Allgemeine Fragen zur Wertschöpfung | <ul style="list-style-type: none"> Unternehmensstandorte mit relevanten Anlagen (Geplantes) Datum der Inbetriebnahme zur zeitlichen Einordnung |
| 4 Fragen zu technischen Daten | <ul style="list-style-type: none"> Technologie der Erzeugung, Kapazität der Anlage, erwartete Produktion, Infrastrukturanbindung Länge/Größe der Infrastruktur, Betriebsdruck, ehem. Nutzung für Erdgas |
| 5 Fragen zur Wasserstoffqualität | <ul style="list-style-type: none"> Erwartete Wasserstoffqualität in jedem Prozessschritt, erwartete Verunreinigungen, geplante Aufreinigungsprozesse, potenziell festgelegte Qualitätsstandards Entstehung von Nebenprodukten, Wasserstoffverluste, Erwartungen und Anforderungen an Wasserstoffqualität Aufteilung der Verantwortlichkeiten zwischen Projektpartnern, Berücksichtigung unterschiedlicher Wasserstoffqualitäten |

Teil 3, 4 und 5 separat für jede relevante Wertschöpfungsstufe aufgesetzt

Die Ergebnisse der Studie orientieren sich an vier Kernthemen

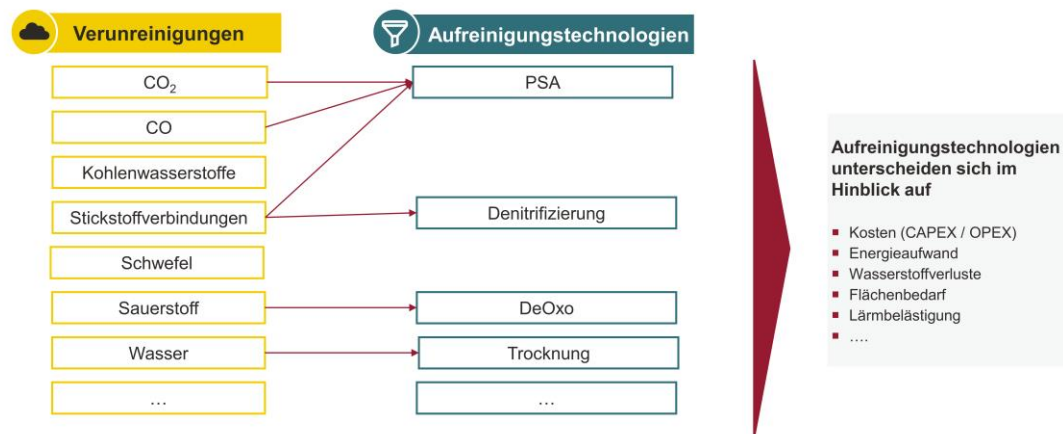


Die Kernthemen sind grundsätzlich **eng miteinander verbunden** und nicht gänzlich voneinander trennbar. Die Untergliederung dient hauptsächlich der **Strukturierung**.

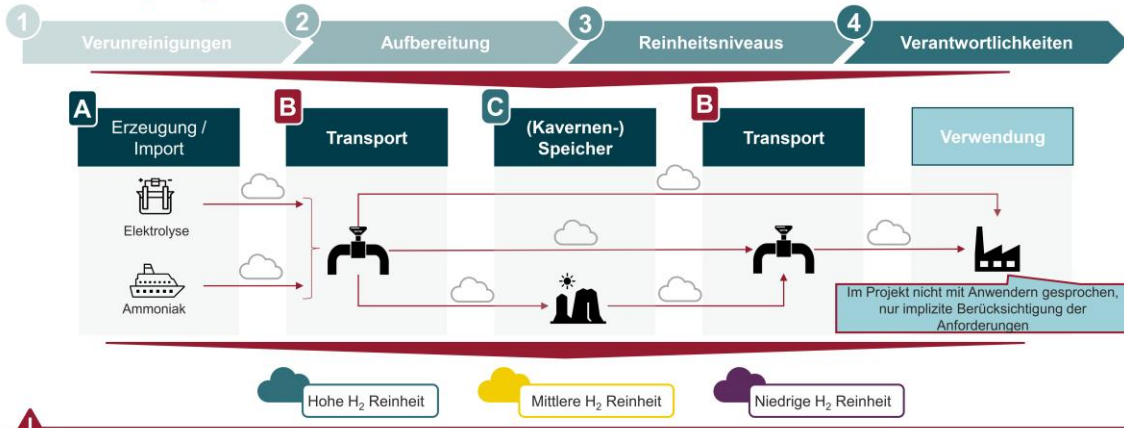
Recap - Aktuell diskutierte Wasserstoff Reinheitsniveaus

| Parameter | DVGW G 260 H ₂ , Gruppe D | vorgeschlagen durch DNV, KIWA* | DVGW G 260 H ₂ , Gruppe A |
|----------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--|
| Wasserstoff | ≥ 99,97 mol-% | ≥ 99,5 mol-% | ≥ 98 mol-% |
| Nicht H ₂ -Gase | ≤ 300 ppm | ≤ 0,5 mol % | ≤ 2 mol % |
| Wasser (Taupunkt) | 5 ppm | ≤ - 8 °C bei 70 bara | 200 bzw 50 mg / m ³ |
| NMKW | 2 ppm | < 0,5 mol% inkl. CH ₄ | - |
| Methan | 100 ppm | | |
| KW-Kondensationspunkt | - | ≤ - 2 °C bei 1 - 70 bara | ≤ - 2 °C bei 1 - 70 bara |
| Sauerstoff | 5 ppm | 10 ppm | 0,001 mol-% (=10 ppm) / 1 mol-% (=10.000ppm) |
| Kohlenstoffdioxid | 2 ppm | 20 ppm | 2,5 / 4 mol-% (=40.000 ppm) |
| Kohlenstoffmonooxid | 0,2 ppm | 20 ppm | 0,1 mol-% (=1.000 ppm) |
| Gesamt-Schwefel | 0,004 ppm | 3 ppm | 10 mg / m ³ (mit Odorierung) |
| Ammoniak | 0,1 ppm | 10 ppm | 10 mg / m ³ (NH ₃ + Amine) |

Verschiedene Technologien stehen zur Aufbereitung von Wasserstoff zur Verfügung



Kernthemen ergeben mögliche H₂ Qualitäten und müssen für jeden Schritt der Wertschöpfungskette durchdacht werden



! Die Ergebnisse der Studie basieren auf den Angaben der befragten Unternehmen. Sie können kein abschließendes Bild über die Einschätzung aller (zukünftigen) Marktteilnehmenden bilden.

4 Wasserstoffreinheit – Erzeugung

1 Kontakt 2 Interviews 3 Auswertung 4 Diskussion

Erzeugung 

A Erzeugung



frontier economics 

19

1 Kontakt 2 Interviews 3 Auswertung 4 Diskussion

Erzeugung 

A Erzeugung: Kernergebnisse



- Qualität des erzeugten Wasserstoffs variiert je Technologie
 - Aus **Elektrolyse** kann (mit Sauerstoffabscheidung und Trocknung) **eine hohe Qualität erreicht werden**
 - Höhere Unsicherheiten für **Ammoniak-Cracking**, mit einer Druckwechseladsorption soll jedoch trotzdem eine Qualität über der aktuellen Grade A erreicht werden können



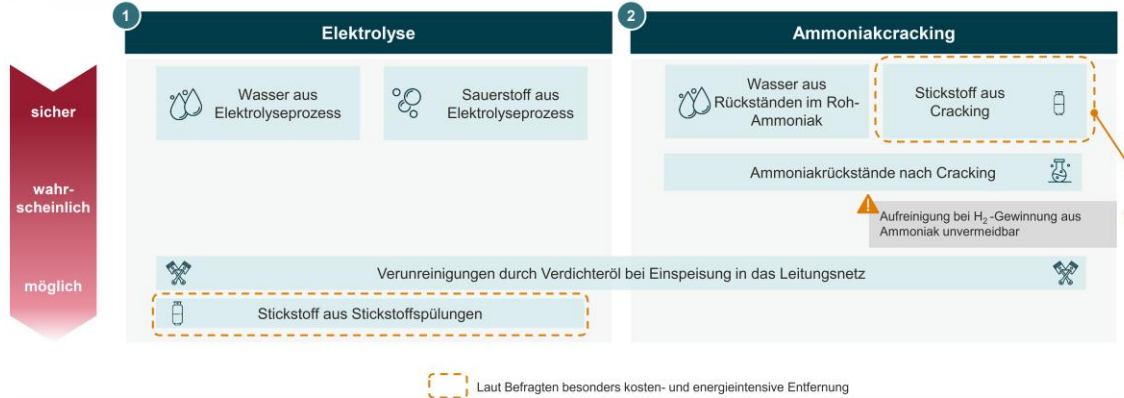
- Erzeugungsseitig kann insgesamt voraussichtlich eine Qualität über dem aktuellen Grade A erreicht werden.

frontier economics 

20

A Verunreinigungen aus der Erzeugung sind stark von der Art der Erzeugung oder des Imports abhängig

- Verunreinigungen aus der Erzeugung hängen von der **Art der Erzeugung** ab.
- Während H₂ aus Elektrolyse vergleichsweise „sauber“ ist, ist bei **Importen über Carriermoleküle mit stärkeren Kontaminationen** zu rechnen. Hier fehlen aktuell aber noch Erfahrungen aus dem industriellen Betrieb von Anlagen.



A Durch Aufbereitungstechnologien können mögliche Verunreinigungen minimiert werden

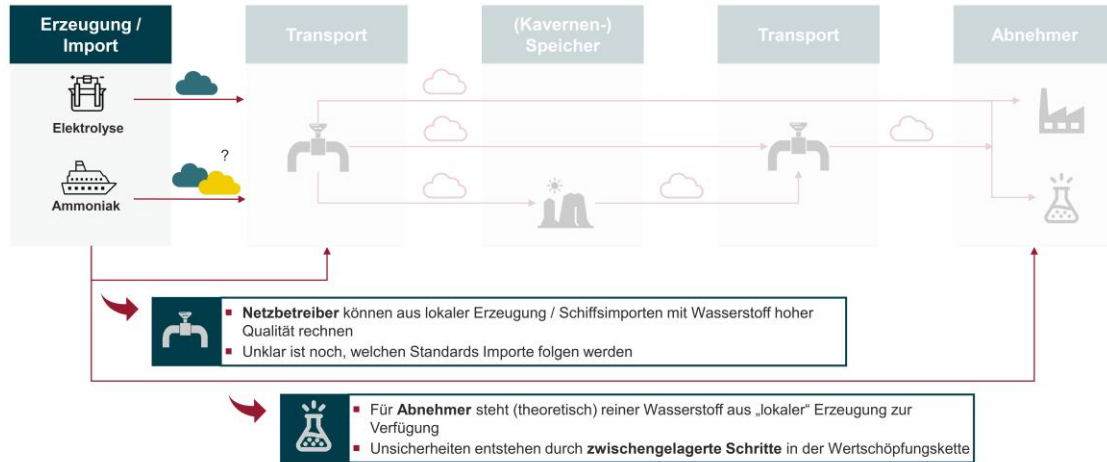
| | Maßnahmen | Wirkung | Aktuell geplant? |
|---------------------------|--|---|--|
| 1 Elektrolyse | <ul style="list-style-type: none"> Trocknung Sauerstoffentfernung PSA (?) | <ul style="list-style-type: none"> Entfernung von Sauerstoff und Wasserrückständen im Anschluss an Elektrolyse, um eine hohe Wasserstoffreinheit zu erreichen Anlagen werden entweder von Elektrolyse Herstellern mit eingeplant oder müssen explizit beauftragt werden Sollte es zu signifikanten Stickstoffrückständen durch Spülungen kommen, wäre eine PSA erforderlich | <ul style="list-style-type: none"> Alle befragten Elektrolysebetreiber planen Trocknung und Sauerstoffentfernung unmittelbar an Erzeugung anzuschließen PSA sind in Planungen bisher nicht berücksichtigt |
| 2 Ammoniakcracking | <ul style="list-style-type: none"> Verwendung ölfreier Verdichter PSA Trocknung | <ul style="list-style-type: none"> Sicherer Ausschluss von Verunreinigungen durch KWS aus Mitriss von Schmiermitteln Entfernung des unvermeidbaren Stickstoffanteils nach Ammoniakcracking Entfernung von Ammoniakrückständen Entfernung von Wasserrückständen | <ul style="list-style-type: none"> Von befragten Projekten teilweise bereits berücksichtigt PSA bei befragten Unternehmen integrierter Teil der Anlage, bei der der Teilgasstrom im Cracker verwendet werden kann Trocknung grundsätzlich geplant |

■ Aktuell sind nach **Elektrolyse** nur **geringfügige Verunreinigungen** erwartet

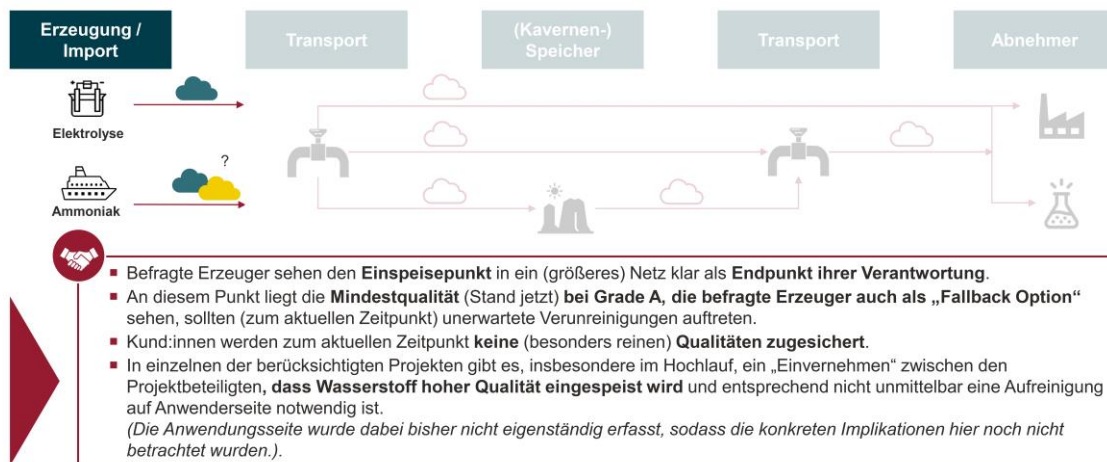
■ Erfahrungen aus dem Betrieb von Pilotanlagen fehlen aber noch

■ Verunreinigungen nach Cracking kommt andere Rolle zu, auch diese können aber **minimiert** werden

A Aus der Reinheit des eingespeisten Wasserstoffs ergeben sich keine unmittelbaren Wechselwirkungen mit folgenden Wertschöpfungsstufen

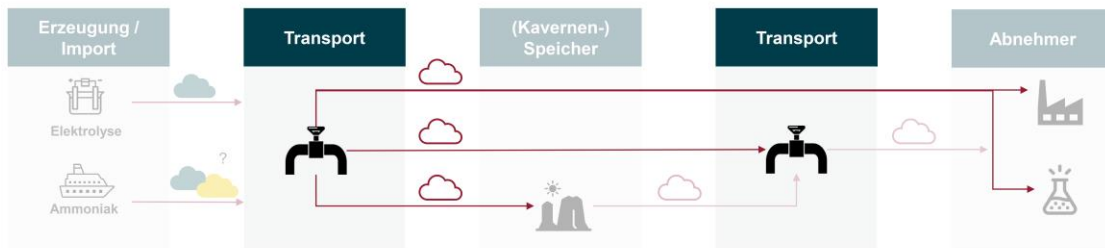


A Erzeuger sehen die Einspeisung ins Netz als klaren Endpunkt ihrer Verantwortung



5 Wasserstoffreinheit – Transport

B Transport



B Transport: Kernergebnisse



- Verunreinigungen durch Transport **unterscheiden sich zwischen neuen und umgewidmeten Leitungen.**
 - für **neue** Leitungen kurzfristig **eine hohe Qualität haltbar** (Grade D)
 - In umgewidmeten Leitungen werden kurzfristig stärkere Verunreinigungen erwartet, **mittel- bis langfristig kann eine mittlere Qualität gehalten werden**, die über die aktuelle Grade A hinausgeht.



- Langfristig kann im **Transportnetz eine Qualität >A (aber < D)** erreicht werden.

B Insbesondere bei Bestandsleitungen werden Qualitätsveränderungen durch den Transport erwartet

- Kurzfristig ist vor allem bei **umgewidmeten Leitungen** mit **Verunreinigungen** aus **ehemaligem Erdgasbetrieb** zu rechnen, abhängig von Alter und vorheriger Nutzung.
- Mittel- bis langfristig werden diese abnehmen – einige **Verunreinigungen können jedoch auch langfristig nicht komplett eliminiert werden**.

| | A Bestandsleitungen mit vorheriger Nutzung für Erdgas | B Neubau-Leitungen |
|---------------|---|---|
| unmittelbar | <ul style="list-style-type: none"> Feuchtigkeit und Stickstoff aus Umwidmungs- und Reinigungsprozessen Schwefel- und Feststoffablagerungen, Glykole und Gaskondensate aus ehemaligem Gasbetrieb | <ul style="list-style-type: none"> Feuchtigkeit und Stickstoff aus Inbetriebnahmeprozessen |
| mittelfristig | <ul style="list-style-type: none"> Verunreinigungen durch Eintrag von Verdichterölen Schwefelverbindungen aus schwefelhaltigen Ablagerungen | |
| langfristig | <ul style="list-style-type: none"> Feuchtigkeit und Sauerstoff aus Netzbetrieb und Instandhaltungsarbeiten Glykole durch Eintrag aus Speichern | |

- ⚠️ Aufbau des H₂ Netzes wird von Befragten als langfristiger, iterativer Prozess erwartet, in dem immer wieder Leitungsabschnitte ergänzt werden.
- Auch langfristig sind damit durch neue Umwidmungen bei Integration in das Gesamtsystem Verunreinigungen möglich.

frontier economics DBI Laut Befragten besonders kosten- und energieintensive Entfernung
 Anmerkung: Die Kostenintensität hängt insbesondere vom Ausgangszustand der Leitung und dem angestrebten Reinheitsniveau ab. 28

B Zusätzliche Aufbereitungsmaßnahmen können die Qualität verbessern, aber nicht alle Verunreinigungen verhindern

| | Maßnahmen | Wirkung | Aktuell geplant? | |
|--|---|--|---|---|
| Anpassung der Einspeisung Nur Bestandsleitungen | <ul style="list-style-type: none"> Verwendung von ölfreien Verdichtern | <ul style="list-style-type: none"> Vermeidung Ölmitriss aus Verdichtungsprozessen Im Vergleich zu herkömmlichen Kolbenverdichtern kostenintensiver | Keine festen Pläne seitens befragter Unternehmen | Aktuell nur langfristige und sequenzielle Anpassung der Einspeisung möglich |
| Vorbereitung der Pipelines | <ul style="list-style-type: none"> Molchung Ultraschallmolchung Hydrocleaning Stickstoffspülung Wasserstoffspülung | <ul style="list-style-type: none"> Entfernung von Verunreinigungen und Ablagerungen aus Gasbetrieb Aus Erfahrungswerten Zweifel, ob alle relevanten Verunreinigungen entfernbar Maßnahmen müssen wirtschaftlich abgewogen werden (Kosten / Nutzen); zusätzlicher Nutzen nicht handfest belegt | <p>Molchung: Ja (Bestandsleitungen großteils molchbar)</p> <p>Andere Maßnahmen nur bedingt (nur vereinzelt bzw. in einzelnen Leitungsabschnitten)</p> | Verunreinigungen durch Bestandspipelines können verringert, gerade im Spurenelementbereich aber nicht vermieden werden |
| Aufreinigung an der Ausspeisestelle | <ul style="list-style-type: none"> z.B. mehrstufige Adsorptionsreinigung Trocknung Sauerstoffentfernung PSA | <ul style="list-style-type: none"> Entfernung von durch Transport entstandene Verunreinigungen (z.B. mehrstufige Adsorptionsreinigung) | Aktuell höchstens dezentral und nur für Abnehmer mit hohen Qualitätsansprüchen oder nur in lokalen Netzen | Keine pauschale Zusicherung von hoher Qualität geplant |

frontier economics DBI 29

B Die Zuteilung der Verantwortlichkeiten für zusätzliche Aufreinigung ist wird als abhängig von der Anzahl der Nachfrager eingeschätzt

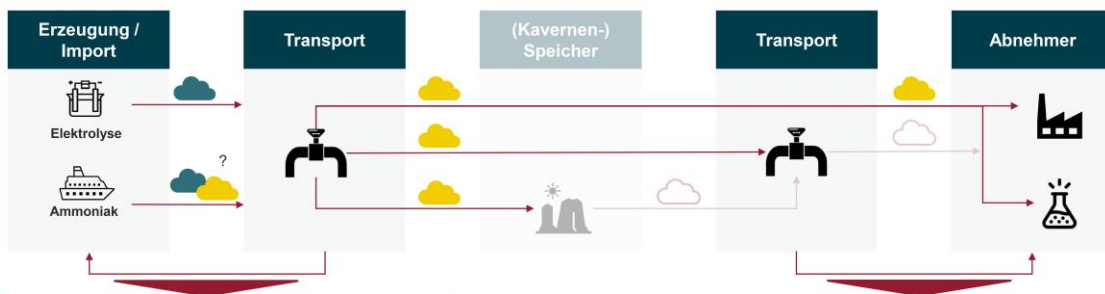
Mit aktuellem Technologiestand in einem integrierten Gesamtnetz höchstens mittlere Qualität erreichbar

Mögliche Verantwortlichkeiten für Qualität bei Abnehmern mit höheren Anforderungen

| | | |
|--|---|---|
| <p>Dezentrale Aufreinigung in Verantwortung von Abnehmern</p> <ul style="list-style-type: none"> Vereinzelte Abnehmer mit hohen Qualitätsansprüchen (z.B. Petrochemie) führen eigene Aufreinigung durch Keine zusätzlichen Aufreinigungsmaßnahmen durch Netzbetreiber | <p>Dezentrale Aufreinigung als Dienstleistung des Netzbetreibers</p> <ul style="list-style-type: none"> Bereitstellung von Aufreinigungsprozessen für Abnehmer mit höheren Qualitätsansprüchen Als Zusatzleistung für Entgelt oder in Verantwortung des Netzbetreibers | <p>Kleine Netzabschnitte in hoher Qualität</p> <ul style="list-style-type: none"> In kleineren Netzabschnitten mit sehr vielen Abnehmern mit hohen Qualitätsansprüchen Aufrechterhaltung hoher Qualität denkbar |
|--|---|---|

Anzahl Abnehmer mit hohen Qualitätsansprüchen

B Mit aktuellem Technologiestand ist in einem integrierten Gesamtnetz höchstens mittlere Qualität erreichbar



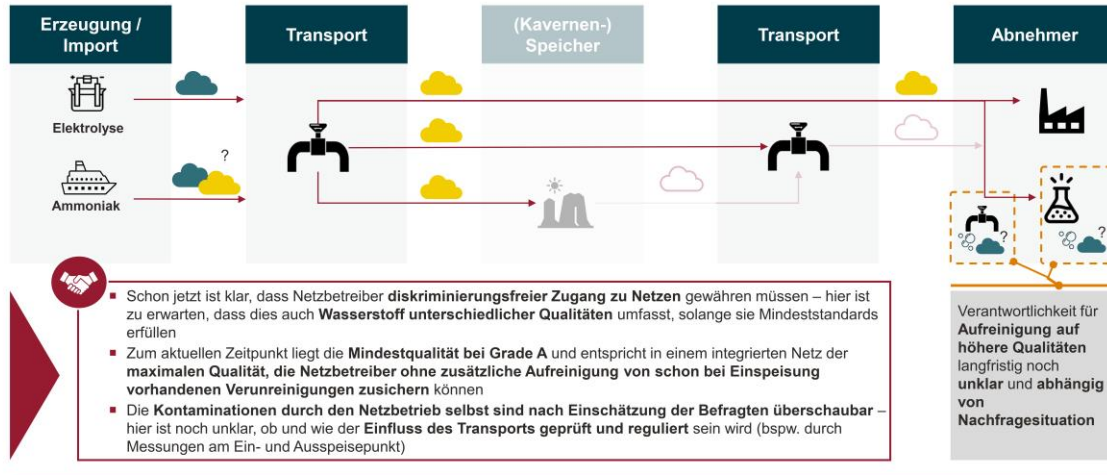
Implikationen für Erzeuger

- Aus lokaler Erzeugung mit großer Wahrscheinlichkeit (sehr) hohe Qualität erreichbar
- Wenn hohe Qualität im Netz nicht gehalten werden kann geringe Incentivierung für zusätzliche Aufreinigungsschritte um hohe Qualität zu halten auf Erzeugungsseite
- Definition von „diskriminierungsfreiem Zugang“ noch unklar

Implikationen für Abnehmer

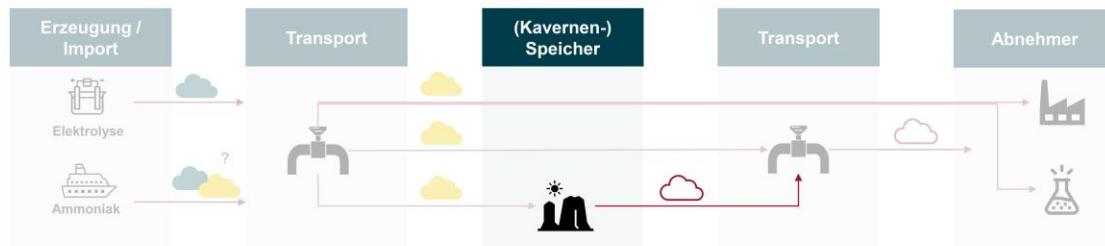
- Abnehmer, die Wasserstoff energetisch verwenden, sind nicht qualitätssensibel (z.B. Stahlindustrie), daher voraussichtlich mit mittlerer Qualität zufrieden
- Abnehmer mit chemischen Wasserstoffprozessen (z.B. Petrochemie) benötigen nach aktuellem Kenntnisstand zusätzliche Aufreinigung

B Standards für Verantwortlichkeiten und Zugang müssen noch final festgelegt werden



6 Wasserstoffreinheit – Speicher

C Speicherung



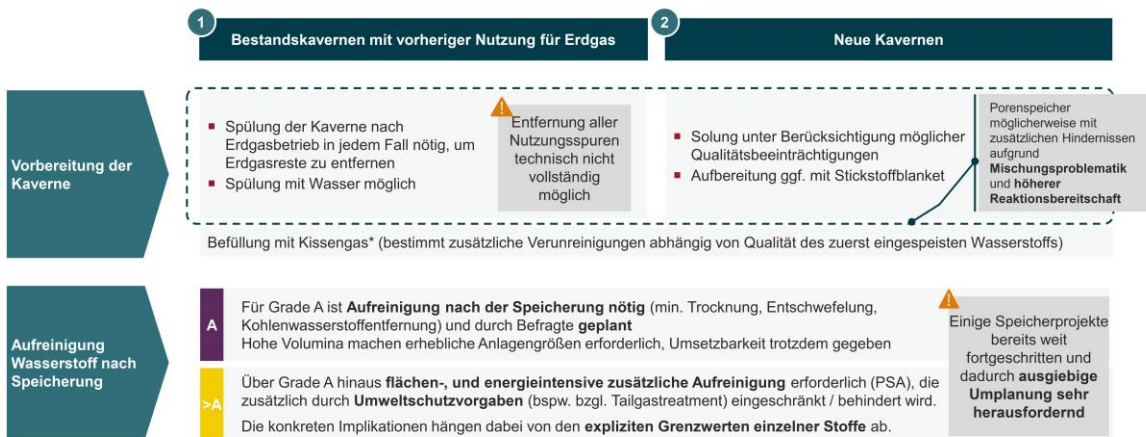
C Speicher: Kernergebnisse



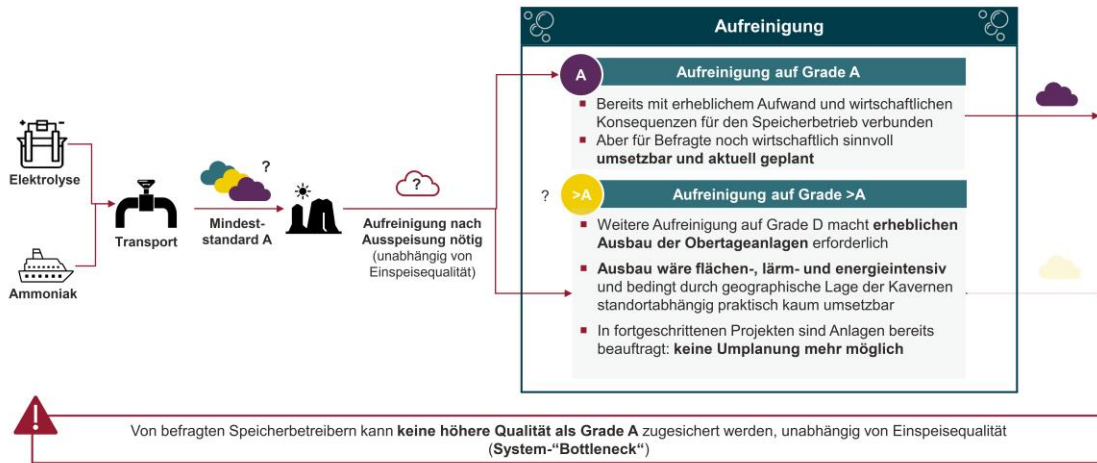
- Aus Speicherung werden **signifikante Verunreinigungen erwartet**; bei Einspeicherung von Grade A ist der ausgespeicherte Wasserstoff voraussichtlich unter Grade A
- Weiterer **Analysebedarf** besteht bzgl. **erreichbarer Grenzwerte einzelner Verunreinigungen**.



- Eine Aufreinigung zurück auf Grade A wird von den Befragten als umsetzbar eingeschätzt und in bisherigen Planungen berücksichtigt; **höhere Qualitäten sind jedoch mit显著antem Mehraufwand und großer Unsicherheit verbunden**.



C Die Speicherung von Wasserstoff würde aktuell die Qualität für das Wasserstoff-Gesamtnetz bestimmen



C Aus Speichersicht ist ein Gesamtnetz mit hoher Wasserstoffqualität mit unproportional hohem Aufwand verbunden



7 Implikation für das Gesamtsystem

Die Sichtweise auf das Thema Wasserstoffqualität unterscheidet sich stark zwischen den verschiedenen Wertschöpfungsstufen

| | |
|-------------------------|---|
| <p>Erzeugung</p> | <p>Elektrolyse kann voraussichtlich ohne großen Aufwand eine hohe Qualität erreichen (Grade D)</p> |
| | <p>Zu Ammoniakcracking bestehen insgesamt noch höhere Unsicherheiten, aber eine Qualität >A ist realistisch erreichbar</p> |
| <p>Transport</p> | <p>Kurzfristig kann in einzelnen Punkt zu Punkt Verbindungen in neuen Leitungen eine hohe Qualität gehalten werden</p> |
| | <p>Je stärker der Grad der Integration eines Netzsystems wird, desto schwieriger wird es, Kontaminationen zu vermeiden</p> <p>Eine Qualität >A ist wird nach aktuellem Stand als erreichbar eingeschätzt</p> |
| <p>Speicher</p> | <p>Verunreinigungen durch die Speicherung, die die Gesamtqualität unter Grade A drücken sind laut Befragten unvermeidbar (Spurenkomponenten).</p> |
| | <p>Aufreinigung bis auf Qualität A ist umsetzbar – darüber hinaus gehende Qualitäten sind mit signifikantem Aufwand und großer Unsicherheit verbunden. Standortabhängig können höhere Reinheiten unter Umständen praktisch nicht implementiert werden.</p> |
| | <p>Die Einschränkungen der Speicher stellen damit aktuell den System-Bottleneck dar</p> |

! In allen Wertschöpfungsstufen beruhen Ergebnisse auf Laborauswertungen und ersten Tests

Aus dem Betrieb von Pilotanlagen und ersten kommerziellen Projekten werden neue Erkenntnisse erwartet

Unterschiedliche Projekte kommen damit im ersten Schritt zu unterschiedlichen Ansätzen

Abhängig von den **Rahmenbedingungen**, in denen einzelne Projekte agieren, haben sich unterschiedliche Ansätze im Hinblick auf die Wasserstoffqualität etabliert

| | 1 Hohe Qualität ausgehend von ersten Anwendungen | 2 Festlegung „eigener“ Qualität | 3 Niedrige Qualität in Erwartung des zukünftigen Gesamtsystems |
|--|---|--|---|
| | <p>Bei Versorgung durch Elektrolyse in einem lokalen Netz setzen einige Projekte kurzfristig einen hohen Standard um</p> | <p>Anpassung der existierenden Qualitätsstandards bzgl. einzelner Schwellenwerte</p> | <p>Vertragliche Zusage einer nur niedrigen Qualität</p> |
| Hintergründe | <ul style="list-style-type: none"> Alle möglichen, und insbesondere erste große Abnehmer können bedient werden Perspektivische Reduktion der Netzqualität wird als einfach umsetzbar eingeschätzt | <ul style="list-style-type: none"> Sicherstellung technischer Umsetzbarkeit für Teilnehmer der Wertschöpfungskette und gleichzeitig Sicherstellung der Verwendbarkeit für relevante Anwender | <ul style="list-style-type: none"> Unsicherheiten bei zukünftiger Qualität, z.B. durch Importe Wirtschaftliche Abwägungen, keine langfristig nicht haltbaren Ansätze zu verfolgen |
| Mögliche Implikation für Kernnetz | <ul style="list-style-type: none"> Bisher nur bei lokalen Netzen mit direkt geplanter Anbindung zwischen Elektrolyseur und Abnehmern Noch nicht mit Einbindung von Speichern umgesetzt | <ul style="list-style-type: none"> Individuelle Absprachen im Gesamtnetz komplex und schwer umzusetzen Noch nicht mit Einbindung von Speichern umgesetzt | <ul style="list-style-type: none"> Zusätzliche Aufreinigung für Abnehmer mit höheren Ansprüchen nötig Unsicherheiten bei Verantwortlichkeiten und individueller Umsetzbarkeit |

Die maximale Wasserstoffqualität wird durch die Wertschöpfungsstufe mit dem größten Aufreinigungsaufwand bestimmt



- (Hohe) Wasserstoffqualitäten sind für verschiedene Stufen der Wertschöpfungskette unterschiedlich zu bewerten.
- Neben der technischen Machbarkeit müssen auch praktische Aspekte sowie die wirtschaftliche Umsetzbarkeit berücksichtigt werden.
- Die höchstmögliche Qualität, die von der Stufe mit den größten Herausforderungen umsetzbar ist, bestimmt damit die für das Gesamtsystem maximal zu erreichende Qualität.
- Dabei muss nicht zwingend gelten, dass dies auch die für das Gesamtsystem optimale Qualität ist.








Die optimale Qualität des Gesamtsystems ist das Ergebnis einer ökonomischen Optimierung, gegeben der technischen Rahmenbedingungen

8 Nächste Schritte



Auf Basis der Studienergebnisse können im Anschluss Fragestellungen vertieft und weitere wichtige Themenfelder untersucht werden

| | |
|---|---|
|  <p>Diskussion einzelner Grenzwerte</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Um die optimale Qualität für das Gesamtsystem zu etablieren, sollte der Fokus weg von Diskussionen um bestehende Qualitätsniveaus (Grade A und D) und hin zu Untersuchungen von Grenzwerten für einzelne Verunreinigungen <ul style="list-style-type: none"> ➢ Welche Grenzwerte für welche Verunreinigungs-komponenten sind für Teilnehmer der Wertschöpfungskette umsetzbar? |
|  <p>Perspektive der Abnehmer</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Teilnehmende der aktuellen Studie haben unterschiedliche Ansprüche verschiedener Abnehmer betont, welche sich insbesondere auf Schwellenwerte einzelner Verunreinigungen beziehen <ul style="list-style-type: none"> ➢ Für welche Verwendungszwecke sind welche Verunreinigungen kritisch? Ist eine dezentrale Aufreinigung denkbar? ➢ Wie hoch ist der Anteil der Abnehmer, die mit einer „mittleren Qualität“ umgehen könnten? |
|  <p>Herausforderungen der Speicherbetreiber</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ In der Studie konnten Speicher als das voraussichtlich bindende Element der Wertschöpfungskette identifiziert werden <ul style="list-style-type: none"> ➢ Worin genau bestehen die Herausforderungen, höhere Qualitäten zu erreichen? (Verunreinigungen, Technologien) ➢ Welche Herangehensweise gibt es hier international? |
|  <p>Internationale Perspektive</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ In der perspektivischen Entwicklung spielt die Qualität und Herkunft zukünftiger Importe voraussichtlich eine große Rolle <ul style="list-style-type: none"> ➢ Welche Qualität ist aus welchem Ursprung und Transportweg zu erwarten - bspw. durch ATR, LOHC oder LH₂ Importe? ➢ Welchen Einfluss haben die Diskussionen in den Niederlanden? ➢ Welche Wechselwirkungen sind zwischen nationaler und internationaler (europäischer) Regulierung zu erwarten? |
|  <p>Wirtschaftliche Überlegungen</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Wirtschaftlichkeit der geplanten Projekte bestimmt auch die Diskussion der umsetzbaren Wasserstoffqualität im Gesamtnetz <ul style="list-style-type: none"> ➢ Was sind die zusätzlichen Kosten für die Erhöhung der Netzqualität von einer niedrigen zu einer mittleren Qualität? ➢ Welche potenziellen Aufreinigungsprozesse sind am kosteneffektivsten? |

Impressum

DVGW Deutscher Verein des
Gas- und Wasserfaches e. V.
Technisch-wissenschaftlicher Verein
Josef-Wirmer-Straße 1–3
53123 Bonn

Tel.: +49 228 9188-5
Fax: +49 228 9188-990
E-Mail: info@dvgw.de
Internet: www.dvgw.de

Download als pdf unter: www.dvgw.de

Nachdruck und Vervielfältigung nur im
Originaltext, nicht auszugsweise, gestattet.