

# **H<sub>2</sub>@AgTech – Ein Projekt der Metropolregion Nordwest**

Wasserstoff in der Landwirtschaft und Landtechnik

*Abschlussbericht*



**AGROTECH VALLEY**  
*H<sub>2</sub>@AgTech*

Gefördert von der  
Metropolregion Nordwest:



**METROPOLREGION  
NORDWEST**

## **Ansprechpartner:**

Lucas Hüer (Projektkoordinator)

Hochschule Osnabrück

Tel.: +49 (541) 969-7292

E-Mail: [l.hueer@hs-osnabrueck.de](mailto:l.hueer@hs-osnabrueck.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b>	<b>2</b>
<b>I. WISSENSCHAFTLICHE LITERATURANALYSE UND EXPERTENINTERVIEWS</b>	<b>3</b>
<b>Potentiale von Wasserstoff für Energie- und Antriebstechnologien in Landwirtschaft und Landtechnik – Eine systematische Literaturrecherche</b>	<b>3</b>
1. Wasserstoff als Schlüsselement der Energiewende – Potential für die Landwirtschaft	3
2. Methodik – Systematische Literaturrecherche	5
3. Erzeugung, Speicherung, Transport und Nutzung von Wasserstoff – Stand der Technik	6
4. Wasserstoff in der Landwirtschaft/Landtechnik – Potentiale und Hindernisse	16
<b>II. SWOT-ANALYSE</b>	<b>21</b>
<b>Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken von Wasserstofftechnologien für die Landwirtschaft/Landtechnik mit besonderem Fokus auf die Metropolregion Nordwest</b>	<b>21</b>
1. Stärken – Strengths	21
2. Schwächen – Weaknesses	23
3. Chancen – Opportunities	24
4. Risiken – Threats	25
<b>III. HANDLUNGSSTRATEGIEN UND EINSTIEGSSZENARIEN</b>	<b>26</b>
1. Gestaltungsrahmen und Methodiken	26
2. Handlungsstrategie	26
2.2 Wasserstoffherzeugung	27
3. Einstiegsszenarien – Wasserstoff in der Landwirtschaft und Landtechnik	30
<b>IV. LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>39</b>

## Beteiligte Projektpartner



# I. Wissenschaftliche Literaturanalyse und Experteninterviews

## Potentiale von Wasserstoff für Energie- und Antriebstechnologien in Landwirtschaft und Landtechnik – Eine systematische Literaturanalyse

### 1. Wasserstoff als Schlüsselement der Energiewende – Potential für die Landwirtschaft

Um die globale Erwärmung zu begrenzen und damit den Klimawandel weiterhin zu bekämpfen, nimmt die klimaneutrale Energieerzeugung eine wichtige Schlüsselrolle ein, sodass es zukünftig effiziente Alternativen zu fossilen Energieträgern geben muss. Eine besonders vielversprechende Alternative bietet klimafreundlich hergestellter grüner Wasserstoff (BMW 2021), welcher es in Zukunft ermöglichen soll „die fossilen Brennstoffe großflächig [zu] ersetzen, als Speicher für erneuerbare Energien [zu] dienen, Mobilität [zu] ermöglichen und die verschiedenen Energiesektoren miteinander [zu] koppeln“ (Forschungszentrum Jülich 2021). Das hohe Potential welches Wasserstofftechnologien mit sich bringen spiegelt sich in Wissenschaft, Politik und Praxis gleichermaßen wider (Schmidt 2020). So gab es in den letzten Jahren zahlreiche wissenschaftliche Publikationen die sich mit den verschiedensten Themen rund um die Wasserstoffherzeugung, -nutzung und -speicherung beschäftigen (Apostolou und Xydis 2019; Fonseca et al. 2019; McDowall und Eames 2006). Deutsche Politiker schließen sich diesem Forschungsthema vermehrt an, sodass eine nationale Wasserstoffstrategie ausgegeben wurde, bei der das Ziel verfolgt wird „Deutschland international zu einem Vorreiter bei grünem Wasserstoff zu machen und langfristig die Weltmarktführerschaft bei Wasserstofftechnologien zu erlangen und

zu sichern“ (BMBF 2021). Und auch in der Praxis findet Wasserstoff immer mehr Anerkennung, was sich in zahlreichen Unternehmens-Projekten widerspiegelt, bei denen Wasserstoff in diversen Verfahren hergestellt, transportiert, genutzt und gespeichert wird, um somit unter anderem CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. 2021b). Es kann laut Radtke (2021) vor allem beobachtet werden, dass beim Ausbau der Wasserstoff-Infrastruktur „staatliche Förderung und Steuerung in Kombination mit Forschung erhebliche Grundlagen schaffen können“ (S. 25).

Wasserstoff<sup>1</sup> ist das leichteste und das häufigste Element im Universum und ist in seiner Reinform ein unsichtbares, ungiftiges Gas, welches eine große Menge an Energie bereitstellen kann. Allerdings ist es auf der Erde fast ausschließlich „in chemischen Verbindungen (Wasser, Säuren, Kohlenwasserstoffen, etc.)“ (BMW 2021) vorhanden und muss daher „mit Hilfe von Energie aus einem wasserstoffreichen Ausgangsstoff abgespalten werden“ (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. 2021a). Um molekularen Wasserstoff (H<sub>2</sub>) zu gewinnen, gibt es verschiedene Herstellungsprozesse. Hierzu gehört in der industriellen Gewinnung vor allem die Dampfreformierung, bei der fossile Brennstoffe (z.B. Erdgas) verwendet werden und mit Hilfe einer chemische Reaktion Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und der

---

<sup>1</sup> Das chemische Symbol von atomarem Wasserstoff ist **H**. Dieser atomare Wasserstoff kommt auf der Erde unter Normalbedingungen allerdings nicht vor. Stattdessen

existiert der molekulare Wasserstoff als farb- und geruchloses Gas und ist als **H<sub>2</sub>** bekannt.

sogenannte graue Wasserstoff<sup>2</sup> entstehen. „Wenn das entstandene CO<sub>2</sub> nach der Wasserstoff-Herstellung aufgefangen und in geologischen Lagerstätten gespeichert (Carbon Capture and Storage, CCS) oder weiterverwendet wird (Carbon Capture and Utilization, CCU), spricht man von blauem Wasserstoff<sup>3</sup>“ (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. 2021a). Neben der Dampfreformierung gibt es auch das thermische Verfahren der Methanpyrolyse bei welchem Erdgas in türkisen Wasserstoff<sup>4</sup> und festen Kohlenstoff gespalten wird. Die nachhaltigste Lösung bietet die Elektrolyse, welche grünen Wasserstoff herstellen kann, indem Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird. Um dieses Verfahren klimaneutral durchzuführen, muss der benötigte Strom aus regenerativen Energiequellen (Solar, Windkraft, Wasserkraft etc.) bereitgestellt werden (EWE 2021). „Dieses Verfahren zur Herstellung des sogenannten „grünen Wasserstoffs“ wird auch als Power-to-Gas bezeichnet und ist eine der Power-to-X-Technologien (PtX-Technologien), bei denen Strom genutzt wird, um zum Beispiel Gase (Power-to-Gas), Wärme (Power-to-Heat) oder flüssige Energieträger (Power-to-Liquid) herzustellen. PtX-Technologien gelten als wichtige Lösung, um die Klimaziele einzuhalten und den Ausstoß von Treibhausgasen zu verringern.“ (BMW 2021)

Mit dem somit gewonnenen grünen Wasserstoff<sup>5</sup> werden vielfältige Lösungen für Energie- und Wärmeversorgung, für industrielle Prozesse sowie für eine zukunftsfähige Mobilität ermöglicht

(BMBF 2021). So können mit Hilfe des Wasserstoffs unter anderem Strom und Wärme erzeugt, Hochöfen für die Stahlindustrie beheizt, Rohstoffe für die Chemieindustrie produziert oder als Antriebstechniken in der Mobilität genutzt werden. Laut dem Forschungszentrum Jülich (2021) ist bei zahlreichen dieser Wasserstoffanwendungen der Einsatz von Brennstoffzellen entscheidend. Vor allem im Bereich der Mobilität kommen Brennstoffzellen vermehrt zum Einsatz und gelten in der Antriebstechnik als saubere Alternative zu Verbrennungsmotoren (ADAC 2021). So sollen im Zuge der Verkehrswende Verbrennungsmotoren komplett durch Elektromobilität und Wasserstoff ersetzt werden, „wobei erstere primär für Individualverkehr, zweiter für den Güterverkehr eingesetzt werden sollen“ (Radtke 2021). Neben dem Güterverkehr kommen laut Schmidt (2020) insbesondere landwirtschaftliche und industrielle Nutzfahrzeuge als „realistische Anwendungsfälle für Wasserstoff und Brennstoffzellentechnik“ (S. 433) in Frage, da vor allem die „große Reichweite [...], die kurzen Betankungszeiten und Nullemissionen von Schadstoffen und Lärm“ (S. 433) vorteilhaft sind. Diese Vorteile können vornehmlich in der Landtechnik generiert werden, wodurch die Dekarbonisierung der Landwirtschaft weiter fortschreitet (Schmidt 2020; Schwaderlapp 2017). Dies ist besonders wichtig, da im Bereich der mobilen Maschinen die Landwirtschaft als emissionsrelevantester Sektor Deutschlands angesehen wird (Landesagentur für Elektromobilität und

---

<sup>2</sup> „Grauer Wasserstoff“ ist eine Bezeichnung für Wasserstoff, der nicht klimaneutral hergestellt wurde.

<sup>3</sup> „Blauer Wasserstoff“ ist eine Bezeichnung für Wasserstoff, der ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen hergestellt wurde. Allerdings sind die Langzeitfolgen der CO<sub>2</sub>-Speicherung noch ungewiss. Dieser Wasserstoff ist also klimaneutral, solange die Emissionen nicht in die Atmosphäre gelangen.

<sup>4</sup> „Türkiser Wasserstoff“ ist eine Bezeichnung für Wasserstoff, der, sofern der Kohlenstoff dauerhaft gebunden bleibt, klimaneutral ist.

<sup>5</sup> „Grüner Wasserstoff“ ist eine Bezeichnung für Wasserstoff, der unter Einsatz erneuerbarer Energien hergestellt wurde.

Brennstoffzellentechnologie GmbH 2017; Helms und Heidt 2014).

Um das hohe Potential, welches Wasserstofftechnologien (insbesondere in Form von Antriebstechniken) für die Landwirtschaft bieten, zu erörtern, befasst sich dieser Beitrag zunächst mit bereits bestehenden wissenschaftlichen und praktischen Erkenntnissen. Indem eine systematische Literaturrecherche nach Webster und Watson (2001) durchgeführt wurde (Kapitel 2), können der aktuelle Stand der Wissenschaft sowie der Stand der Technik abgebildet werden. Hierbei fokussiert sich der Beitrag in Kapitel 3 zunächst auf die Themen zur/zum allgemeinen Wasserstoffgewinnung, -speicherung, -transport, und -nutzung über eine Brennstoffzelle. Anschließend werden Anwendungsmöglichkeiten für die Sektoren Landwirtschaft und Landtechnik vorgestellt (Kapitel 4). So soll im Laufe des Beitrags geklärt werden, wie der Status Quo und die zukünftigen Potentiale der Wasserstofftechnologien im Allgemeinen und mit speziellem Bezug auf die Landwirtschaft aussehen. Anschließend werden die Ergebnisse in einer SWOT-Analyse erweitert und validiert, bevor eine Handlungsstrategie und Einstiegszenarien folgen.

## 2. Methodik – Systematische Literaturrecherche

Die Ergebnisse dieses Beitrags basieren auf einer systematischen Literaturanalyse, die nach der Vorlage von Webster & Watson (2001) durchgeführt wurde, um alle relevanten wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Thema Wasserstoff und besonders dessen Nutzung in der Landwirtschaft und Landtechnik zu erlangen. So wurden in einem ersten Schritt Keywords für eine Stichwortsuche ermittelt und über Boolesche Operatoren (AND, OR, NOT, \* etc.) kombiniert. Zu den Keywords gehören folgende Wörter und ihre englischen Synonyme: „Wasserstoff, Wasserstoffantrieb, Brennstoffzelle, Elektrolyse, alternative Antriebe, Landwirtschaft, Landtechnik, Arbeitsmaschinen, H<sub>2</sub>, Wasserstoffspeicher, Infrastruktur, Wasserstoffgewinnung/-herstellung, Antriebstechnik, Nutzfahrzeuge“. Verschiedene Kombinationen dieser Stichworte wurden in „großen, anerkannten und umfassenden“ (Pickering et al., 2015) Journaldatenbanken, Patentdatenbanken sowie wissenschaftlichen und praxisrelevanten Suchportalen eingegeben. Um relevante und aktuelle Erkenntnisse zu erlangen, wurden nur Quellen, die seit 2000 veröffentlicht wurden berücksichtigt. Einige Ausnahmen entstanden, wenn die gefundenen Artikel auf frühere wissenschaftliche Erkenntnisse verwiesen.

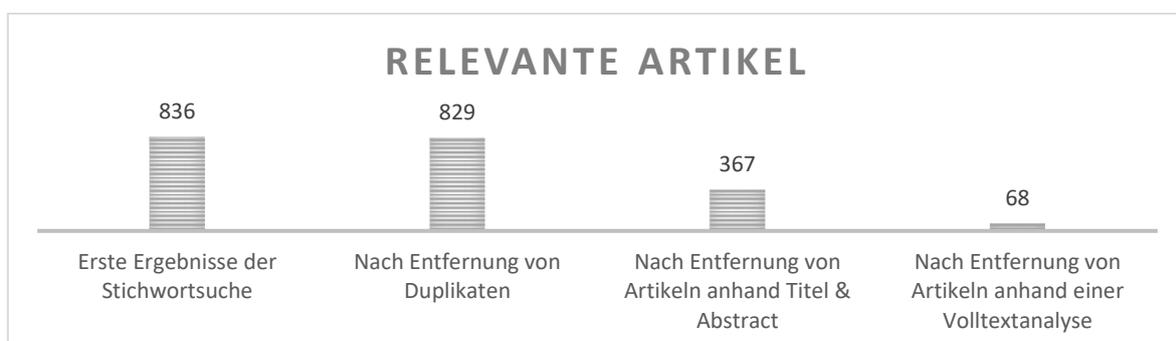


Abbildung 1 - Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche

Insgesamt mündete die Suche in 836 verschiedenen Artikeln, von welchen 7 Duplikate entfernt wurden. Die verbliebenen 829 Artikel wurden auf Grundlage ihrer Titel und Abstracts weiter analysiert, wodurch 462 irrelevante Artikel aus der Liste entfernt wurden. Die Artikel dieser Liste wurden komplett gelesen, sodass auf Grundlage einer Volltextanalyse insgesamt 68 relevante Artikel identifiziert wurden. Die Erkenntnisse hieraus dienen in den kommenden Kapiteln als Grundlage der Ergebnisse sowie der Diskussion. Ergänzend fanden verschiedene Experteninterviews und Workshops statt, um die Ergebnisse zu ergänzen und zu validieren.

### 3. Erzeugung, Speicherung, Transport und Nutzung von Wasserstoff – Stand der Technik

Eine nachhaltige Energiegewinnung in Kombination mit einer effizienten Wasserstoffwirtschaft stellt laut Klell et al. (2018) „die nächste große industrielle Revolution dar, die nicht nur die Aussicht auf eine gesunde und lebenswerte Umwelt für spätere Generationen bietet, sondern auch die wirtschaftliche Chance auf innovatives Know-how und Technologieführerschaft“ (S. 1). Demnach soll in Zeiten eines hohen Stromangebots (beispielsweise im Sommer durch PV) über den Power-to-Hydrogen Ansatz überschüssiger Strom mittels Elektrolyse in den Energieträger Wasserstoff umgewandelt werden, sodass dieser „im Sinne einer regenerativen Sektorenkopplung als Strom, Wärme und Kraftstoff für alle Anwendungen zur Verfügung [gestellt wird]“ (Klell et al., 2018). Neben der Elektrolyse gibt es noch viele weitere Arten der physikalischen und chemischen Wasserstoffgewinnung, die notwendig sind.

#### 3.1 Wasserstoffherzeugung

Wasserstoff wird entweder als Nebenprodukt bei Industrieprozessen (z.B. bei der Herstellung von Chlor) oder durch Eigenerzeugung gewonnen. Das bisher am häufigsten durchgeführte Verfahren zur direkten Erzeugung von Wasserstoff ist die **Reformierung fossiler Kohlenwasserstoffe**. Hierzu gehört auch das wirtschaftlichste nicht-regenerative industrielle Verfahren zur Wasserstoffherstellung, die Dampfreformierung (Klell et al. 2018). Als Ausgangsmaterial dienen hierbei kohlenstoffhaltige Brennstoffe wie z.B. Methan oder Erdgas, welche in eine chemische Reaktion mit Wasserdampf gelangen, sodass Wasserstoff gewonnen wird. Hierbei können hohe Wirkungsgrade von bis zu 80% erreicht werden (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. 2021a; Klell et al. 2018). Eine weitere Möglichkeit der Wasserstoffgewinnung bietet die **Vergasung fossiler Kohlenstoffe**. Bei dessen verbreitetstem Verfahren, der Kohlevergasung, reagieren die stark erhitzte Kohle und der Wasserdampf, sodass unter anderem Wasserstoff entsteht und Kohlenstoffdioxid emittiert wird. In den letzten Jahren werden zunehmend andere Ausgangsstoffe für die Vergasung erforscht/genutzt, um CO<sub>2</sub>-Neutralität zu erreichen, hierzu gehören beispielsweise Biomasse, Holz oder organische Abfälle. Da neben Wasserstoff auch andere Stoffe entstehen, ist anschließend ein sorgfältiger Reinigungsprozess erforderlich. „Die Wirkungsgrade der Vergasung variieren je nach Ausgangsstoff und erreichen Werte bis zu 55 %“ (Klell et al. 2018). Diverse **biologische sowie chemische Prozesse** bieten weitere Möglichkeiten, um Wasserstoff zu gewinnen. Hierzu zählen beispielsweise „die Biophotosynthese von photosynthetisch aktiven Mikroorganismen wie Grünalgen oder Cyanobakterien sowie die Fermentation verschiedener Bakterienarten.“ (Klell et al. 2018) Zudem bestehen die Möglichkeiten der

thermischen und der chemischen Spaltung zur Gewinnung von Wasserstoff. Um Wasserstoff allerdings komplett emissionsfrei herzustellen, gibt es laut Klell et al. (2018) nur eine einzige Möglichkeit: Die **Elektrolyse** mit vollständiger Energiezufuhr durch erneuerbare Energien. Bei einer Elektrolyse kann Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten werden. Da eine große Energiezufuhr benötigt wird, um das Wasserstoffmolekül abzuspalten, kann der gewonnene Wasserstoff nur als „grün“ bezeichnet werden, wenn ausschließlich erneuerbare Energien für das Verfahren verwendet wurden (EWE 2021; BMWI 2021). Drei Wasserelektrolysetechnologien sind denkbar (Brinner 2013; Pichlmaier et al. 2019):

- Die Alkalische Elektrolyse (AEL), welche bereits seit über 80 Jahren im Einsatz ist und immer noch zum aktuellen Stand der Technik gehört (Ghaib 2017; Pichlmaier et al. 2019). Hierbei werden zwei durch eine Membran getrennte Elektroden in eine alkalische, wässrige Lösung getaucht und eine Stromspannung erzeugt, sodass an der positiv geladenen Anode Sauerstoff und an der negativ geladenen Kathode Wasserstoff entsteht (Pichlmaier et al. 2019).
- Die Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEM), bei der Anode und Kathode über eine Polymer-Elektrolyt-Membran voneinander getrennt werden. Bei diesem Verfahren wird die Elektrode meistens „direkt auf die Membran aufgebracht. Diese Anordnung bildet die wichtigste Komponente einer PEM-Elektrolysezelle, die MEA (engl.: membrane electrode assembly). Auf

beiden Seiten der MEA befinden sich poröse Stromableiter, die den Stromfluss zu den Elektroden ermöglichen und für die Produktgase, sowie für Wasser durchlässig sind. Die bipolaren Platten rahmen die beiden Halbzellen ein und sind mit einem so genannten Flowfield ausgestattet, um den Transport von flüssigem Wasser zur Zelle und das Entweichen der Produktgase zu gewährleisten.“ (Smolinka et al. 2010, Pichlmaier et al. 2019)

- Die Hochtemperatur-Festelektrolyt-Elektrolyse (Solid Oxide Electrolyzer, SOEL), befindet sich im fortgeschrittenen Forschungsstadium und verspricht ein großes Potential für zukünftige Praxisanwendungen. „Das Besondere ist, dass hier mit sehr hohen Temperaturen gearbeitet wird. Dabei kann ein Teil der benötigten Energie zur Spaltung des Wassers aus Wärme bereitgestellt werden. Das führt zu einem verringerten Strombedarf. Für die Trennung der Halbzellen wird dabei ein festes Oxid verwendet, durch welches Sauerstoff-Ionen diffundieren können.“ (Pichlmaier et al. 2019)

Neben den beschriebenen Elektrolysetechniken gibt es noch andere (theoretische) Möglichkeiten Wasserstoff CO<sub>2</sub> neutral herzustellen. Darunter fällt zum Beispiel auch die Reformierung von Biomethan oder anderen erneuerbaren Kohlenwasserstoffe, welches ebenfalls als grüner Wasserstoff bezeichnet werden kann. Oft kommt es bei diesen Prozessen jedoch z.B. zu ungewollter Methanfreisetzung, so dass die CO<sub>2</sub>-Neutralität nicht einfach gewährleistet werden kann.

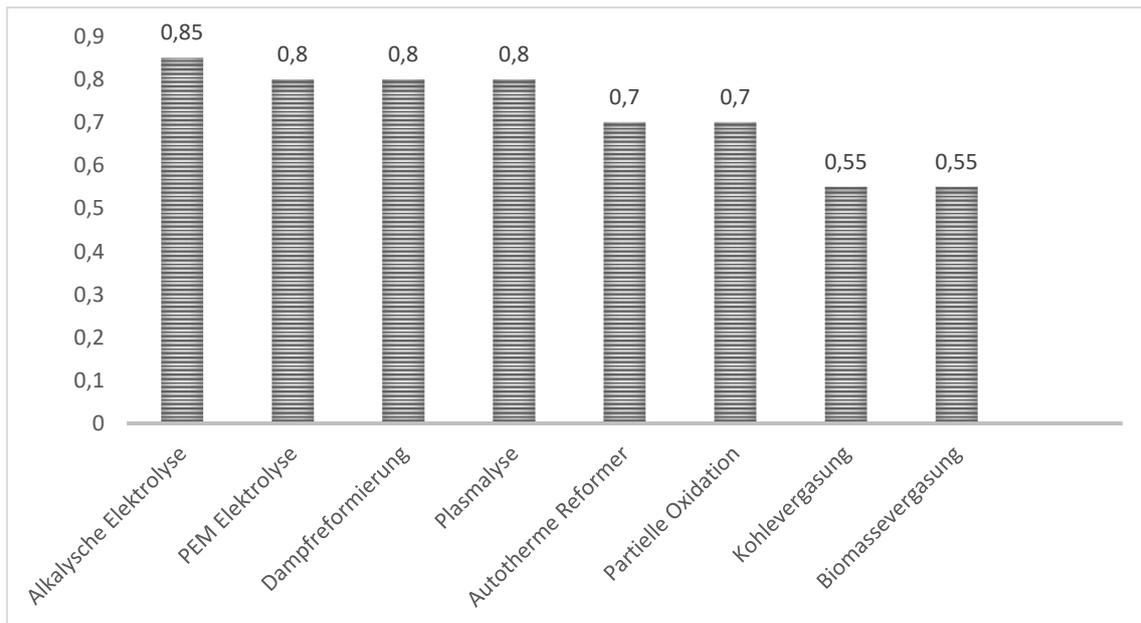


Abbildung 2 – Wirkungsgrade H<sub>2</sub>-Erzeugung nach Klell (et al. 2018) und Behrens (2021)

Ein innovativer Ansatz, welcher eine Alternative zu Speicherung von CO<sub>2</sub> (CCS) bietet, stellt laut dem Unternehmen Graforce GmbH (2020) die Plasmalyse dar: „Die Methan-**Plasmalyse** ermöglicht die Produktion großer Mengen an hochreinem Wasserstoff aus Erdgas, mit nur einem Viertel der Energie, die die Elektrolyse benötigt. Beim Methan-Plasmalyse-Prozess [...] wird das Methan (CH<sub>4</sub>) nicht katalytisch oder mit sehr hoher Temperatur zerlegt, sondern mittels eines Plasmas in seine molekularen Komponenten Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Kohlenstoff (C) aufgespalten. So entstehen z.B. aus vier Kilogramm Methan und 10 kWh Strom 1 kg Wasserstoff und 3 kg elementarer Kohlenstoff. Bei Verwendung von Biomethan wird durch die Methan-Plasmalyse der Atmosphäre Kohlendioxid entzogen.“ Die Plasmalyse weist laut Jens Hanke (Interview im Tagesspiegel – Behrens, 2021) einen Wirkungsgrad von 75% auf, der mit der Nutzung von ammoniakhaltigem Wasser auf bis zu 80% steigen kann. Abbildung 2 stellt vergleichend die Wirkungsgrade verschiedener Wasserstoff-Herstellungungsverfahren dar.

### 3.2 Wasserstoffspeicherung

Wasserstoff weist eine sehr geringe Dichte auf, wodurch eine effiziente Speicherung äußerst anspruchsvoll ist. Besonders große Herausforderungen bei der Speicherung entstehen laut Eberle (et al. 2009) „beim Einsatz in Fahrzeugen mit Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen“. Trotz der hohen Anforderungen gibt es diverse Methoden um Wasserstoff zu speichern. Die Speicherung von Wasserstoff kann entweder in **gasförmigem Zustand** durch einen Druckbehälter mit einem üblichen Druck von 300-700 bar (Compressed Gaseous Hydrogen = CGH<sub>2</sub>), in **flüssigem Zustand** durch einen Kryobehälter mit einer Temperatur von unter -253 °C (Liquid Hydrogen = LH<sub>2</sub>) oder in **chemisch/physikalisch gebundener Form** stattfinden (Klell et al. 2018).

#### Wasserstoffspeicherung gasförmig (CGH<sub>2</sub>)

Nach dem Verdichten lässt sich gasförmiger Wasserstoff bei hohem Druck in einem Tank speichern. Im Verkehr hat sich zum Beispiel ein Druckniveau von 350 bar für Nutzfahrzeuge und 700 bar für PKW

durchgesetzt. Bei 700 bar beträgt die Dichte dann ca. 40 kg/m<sup>3</sup> (24 kg/m<sup>3</sup> bei 350 bar). Der Hochdruckspeicher wird vor allem in mobilen Anwendungen eingesetzt, da er für kleine Speichermengen eine günstige Lösung bietet. (EMCEL GmbH 2009)

#### Wasserstoffspeicherung flüssig (LH2)

Des Weiteren besteht eine Alternative in der Verflüssigung von Wasserstoff. Im flüssigen Zustand besitzt LH2 eine wesentlich höhere Dichte (71 kg/m<sup>3</sup>) und muss bei -253 °C gespeichert werden. Die benötigten Speicher sind bei größeren Speichermengen günstiger und werden daher häufig beim Transport von H<sub>2</sub> über weite Strecken eingesetzt. Ein Nachteil ist das Abdampfen des H<sub>2</sub>, welches durch Erwärmung hervorgerufen wird. In der Regel kann der Wasserstoff aber dann in Brennstoffzellen zur Strom- und Wärmezeugung oder im Antriebsstrang genutzt werden. (EMCEL GmbH 2009)

#### Wasserstoffspeicherung mittels Metallhydrid

Metallhydride können gasförmigen Wasserstoff absorbieren. Beim Kontakt des Wasserstoffgases mit der Feststoffoberfläche der Speichermaterialien zerfallen die Wasserstoffmoleküle in atomaren Wasserstoff und dringen in das Material ein. Die Beladung und Entladung der Metallhydridspeicher erfolgt bei einem Druckniveau von ca. 30 – 60 bar. Ein wesentlicher Nachteil ist, dass diese Speichersysteme im Verhältnis zum aufgenommenen H<sub>2</sub>-Gehalt schwer sind. Sie werden für Spezialanwendungen (Kleinstspeicher, U-Boote, etc.) genutzt. (EMCEL GmbH 2009)

#### Wasserstoffspeicherung mittels LOHC

Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) speichern den Wasserstoff in einem flüssigen Trägermedium. Dieses Thermalöl bindet Wasserstoff chemisch durch eine

katalytische Reaktion. Der gespeicherte Wasserstoff kann dann ähnlich wie Dieseltreibstoff gehandhabt werden. Diese Technologie eignet sich besonders für die Speicherung und den Transport von großen Wasserstoffmengen. Nachteilig ist die relative hohe Temperatur von ca. 250 °C bis 300 °C und die damit verbundene große Energiemenge zum Herauslösen des Wasserstoffs benötigt wird. (EMCEL GmbH 2009)

#### Potentialspeicherung durch Oxidation von Eisen

Speicherung durch die Reduktion und Oxidation von Eisen (Fe): Beim Laden des Speichers wird Eisenoxid durch das zugeführte H<sub>2</sub> reduziert. Dabei wird Wasserdampf frei. Bei der Entladung wird durch die Zuführung von Wasserdampf und die Oxidation des Eisens das eingesetzte H<sub>2</sub> wieder frei (Ambartec AG 2021).

#### Untergrundspeicher

Neben diesen obertägigen Speichermöglichkeiten kann gasförmiger Wasserstoff auch in künstlichen Hohlräumen unter Druck untertägig in Salzkavernen (über längere Zeiträume und in sehr großen Mengen) gespeichert werden. Für die Wasserstoffspeicherung müssen verschiedenste geologische Kriterien erfüllt sein. Eine geologische Formation kann geeignet sein, wenn die Dichtigkeit gewährleistet und die Belastung durch Bakterien oder organische und anorganische Verbindungen minimal ist. Künstlich geschaffene Salzkavernen eignen sich besonders zur Speicherung von Wasserstoff, da Steinsalz (Halit) eine äußerst geringe Durchlässigkeit für Gase wie Wasserstoff aufweist und darüber hinaus gegenüber Wasserstoff inert ist. Zusätzlich eignen sich die Speicher aufgrund ihrer Bauweise als Hohlraum mit einem Zugangsschacht besonders für eine flexible Ein- und Auslagerung. Bei den Abmessungen solcher Speicherkavernen handelt es sich typischerweise um

Hohlräume mit einem Fassungsvermögen von 250.000 bis 750.000 Kubikmetern. Abhängig von den Randbedingungen werden Speicherdichten von 8 bis 11 kg/m<sup>3</sup> geometrischer Kavität für Wasserstoff erreicht. Eine 500.000 Kubikmeter große Kaverne verfügt somit über eine Speicherkapazität pro Umschlag von 133 bis 183 GWh, bezogen auf den unteren Heizwert (LHV) von Wasserstoff. Die Leistung des Speichers beträgt somit mehrere 100 MW, je nach Ausführung des Zugangsschachtes. In Europa befinden sich momentan keine Salzkavernen zur Speicherung von Wasserstoff in Benutzung. Im Projekt HyCavMobil (gefördert über das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie) beteiligt sich das DLR seit Mitte 2019 am wissenschaftlichen Nachweis, dass Salzkavernen als großtechnische Energiespeicher für reinen Wasserstoff in Deutschland eingesetzt werden können, der eingelagerte Wasserstoff als Energieträger für die Sektorenkopplung sicher gespeichert, sowie in der Mobilität eingesetzt werden kann. Die Eignung soll anhand eines praktischen Wasserstoff-in-situ-Kavernentests belegt werden (DLR 2020).

### Speicherung in Tanks

Als Tankformen in der obertägigen Speicherung in stationären und mobilen Anwendungen werden zylindrische oder kugelförmige Tanks bevorzugt. Aufgrund der aufwändigeren Herstellung von Kugeltanks werden in der Praxis häufiger zylinderförmige Tanks verwendet. Eine Problematik bei der Speicherung von Wasserstoff in Tanks ist seine Neigung, an metallischen Oberflächen zu adsorbieren, zu dissoziieren und in bzw. durch das Material zu diffundieren. Dies kann zu einer Versprödung des Materials führen. Für Wasserstoffanwendungen geeignete Materialien sind etwa austenitische Stähle sowie eine Reihe von Legierungen.

„Jede dieser Varianten hat ihre Berechtigung. Entscheidend bei der Auswahl einer geeigneten Speichertechnologie ist der spezielle Anwendungsfall (z. B. stationär, mobil, gespeicherte Menge Wasserstoff usw.)“ (EMCEL GmbH 2019)

### *3.3 Wasserstofftransport*

Angesichts der großen Distanzen bieten sich für den globalen Wasserstofftransport drei Optionen an, die alle auf in flüssigem Zustand gespeichertem Wasserstoff basieren: flüssiger Wasserstoff (LH<sub>2</sub>), Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und die so genannten flüssigen organischen Wasserstoffträger (LOHC). Diese werden im Folgenden genauer betrachtet.

Die Verschiffung von LH<sub>2</sub> liefert Wasserstoff in reiner Form an den Ort des Empfängers, vergleichbar mit der für Flüssiggas (LNG) verwendeten Technologie. Trotz der derzeit hohen Transportkosten (im Jahr 2020 zum Beispiel 14€ pro Kilogramm für die Strecke von Saudi-Arabien nach Japan) werden sich die Investitionen in die Infrastruktur für Wasserstoffproduktion und -übertragung bei einer zunehmenden Verbreitung der Technologie amortisieren. Entsprechend wird ein deutlicher Rückgang der Transportkosten auf der genannten Strecke von 15 auf 1,6€ pro Kilogramm im Jahr 2030 erwartet. Eine solche Entwicklung wird mit einer Vergrößerung der typischen Schiffskapazität von 160 Tonnen auf etwa 10.000 Tonnen und einer Erhöhung der weltweiten Verflüssigungskapazität von 10 bis 50 Tonnen pro Tag auf bis zu 500 Tonnen pro Tag einhergehen. Wenn anschließend die lokale Distribution mit Lastwagen sowie die Lagerung oder die direkte Nutzung von Wasserstoff als LH<sub>2</sub> möglich ist, profitieren diese nächsten Schritte vom LH<sub>2</sub>-Transport, da keine weiteren Umwandlungsschritte erforderlich sind. Der Transport von Ammoniak als Wasserstoffträger erfordert aufgrund seiner Toxizität eine sorgfältige Handhabung

durch zertifizierte Betreiber entsprechender Transportinfrastruktur. Dabei lässt sich die bereits bestehende weltweite Transport- und Vertriebsinfrastruktur nutzen. Sofern das Ammoniak auch für die Endnutzung benötigt wird, kann zudem auf die weitgehend etablierte Wasserstoff-zu-Ammoniak-Konvertierungstechnologie und vorhandene Transportwege zurückgegriffen werden. Für ein solches Szenario werden Transportkosten prognostiziert, die um den Faktor 3 günstiger sind als die für den LH2-Transport. Sollte die Endnutzung jedoch reinen Wasserstoff erfordern, ist ein zusätzlicher Schritt zur Rückumwandlung erforderlich. Diese Technologie befindet sich derzeit in einem recht frühen Entwicklungsstadium. Darüber hinaus würde die Rückumwandlung den Zugang zu kostengünstiger Energie am Ankunftshafen oder am Ort des Verbrauchers erfordern. Je nach technologischer Entwicklung und den lokalen Bedingungen könnte dieser Schritt der Rückumwandlung ergänzend zu den Umwandlungs- und Transportkosten weitere 1€ bis 2€ pro Kilogramm beitragen.

LOHCs bestehen aus Paaren wasserstoffarmer und wasserstoffreicher organischer Verbindungen wie Toluol/Ethylcyclohexan. Sie können durch wiederholte katalytische Hydrierungs- und Dehydrierungszyklen Wasserstoff speichern bzw. wieder abgeben und weisen ein hohes Wasserstoff-Aufnahmevermögen auf. Der Transport von Wasserstoff mittels LOHC hat den Vorteil, dass die bestehende Transportinfrastruktur für Rohstoffe und Zwischenprodukte der Erdöl- und Petrochemie genutzt werden kann. Ähnlich wie beim Ammoniak liegt die Herausforderung im Dehydrierungsschritt: Dieser erfordert die Entwicklung von großskalierten Anlagen und den dazugehörigen Prozessen ebenso wie einen erheblichen Energieeinsatz am Importhafen oder am Ort des Verbrauchers. Im Gegensatz zu Ammoniak macht diese Form des Wasserstoffträgers zusätzlich noch den

Rücktransport des dehydrierten Trägermaterials zum Ursprungshafen oder zum Wasserstoff-Erzeugungsort erforderlich. Hinzu kommt, dass zurzeit unterschiedliche Techniken zur Nutzung von LOHC untersucht und entwickelt werden, die eine Economy of Scale behindern könnten, sofern es nicht gelingt, universelle Standards zu etablieren. Angesichts des geringen Reifegrades der Technologie sind die Kostenschätzungen für LOHC, die in ähnlicher Größenordnung liegen wie die für LH2, sowie für die erreichbare Anzahl an Be- und Entladungszyklen noch sehr unsicher und erfordern noch zusätzliche Forschung und Entwicklung.

Welche Transporttechnologie die kostengünstigste Option sein wird, hängt von Faktoren wie der Endanwendung, der Distanz und dem Transportmittel für den erforderlichen Landtransport, der Größe des Marktes sowie der technologischen Entwicklung ab. Wenn in der Endanwendung Wasserstoff genutzt werden soll, scheint LH2 im Vergleich zu NH<sub>3</sub> und LOHC in der gesamten Wertschöpfungskette die höchste technologische Reife aufzuweisen. Eine signifikante Maßstabsvergrößerung und die Marktdurchdringung als entscheidende Parameter für Kostensenkungen vorausgesetzt, kristallisiert sich LH2 zumindest bis zum Jahr 2030 als die kostengünstigste Transportmethode für den globalen Transportabschnitt heraus.

Für die Wasserstoffverteilung auf lokaler bzw. regionaler Ebene bieten sich auf mittelfristige Sicht drei Optionen an: der Transport von komprimiertem gasförmigem Wasserstoff mittels Lkw, der Transport von verflüssigtem Wasserstoff mittels Lkw sowie der Transport von komprimiertem gasförmigem Wasserstoff durch Pipelines. Die Wahl der Transportform von Wasserstoff hängt von unterschiedlichen Faktoren ab, unter anderem der Entfernung zwischen Produktionsstandort und Tankstelle, vom

Wasserstoffbedarf, von standortspezifischen Bedingungen (zum Beispiel vorhandene Infrastruktur und Platzbedarf), sowie von örtlichen Gegebenheiten und wirtschaftlichen Kriterien. Für kürzere Entfernungen verursacht komprimierter gasförmiger Wasserstoff (GH<sub>2</sub>) die geringsten Kosten. Für Entfernungen von mehr als 300 bis 400 km ist der Flüssiggas-Transport am wirtschaftlichsten. Wenn der Wasserstoff bereits in flüssiger Form am Produktions- oder Lieferort verfügbar ist, sind für diese Transportform auch kürzere Entfernungen wirtschaftlich. Komprimierter gasförmiger Wasserstoff per Lkw-Transport eignet sich für kürzere Entfernungen in kleineren Mengen, während bei großen Mengen Pipelines vorteilhaft sind. Bei zentralen, großmaßstäblichen Anwendungen wie der Ammoniakproduktion oder Raffinerien

wird Wasserstoff in der Regel entweder vor Ort oder in der Nähe (zum Beispiel in einem Industriekomplex mit mehreren Wasserstoffverbrauchern) erzeugt und dann über Pipelines verteilt. Da eine solche Infrastruktur bereits heute in großem Maßstab vorhanden ist, ist deren Beitrag zu den Gesteungskosten gering. Bei dezentralen Nutzern von Wasserstoff stellt sich die Situation hingegen anders dar: Hier ist die Verteilung auf der sogenannten letzten Meile ein maßgeblicher Kostentreiber – oft verantwortlich für mehr als 50 Prozent der gesamten Wasserstoff-Gesteungskosten. Der Wasserstoffvertrieb kann in diesem Kontext sehr wettbewerbsfähig werden, wenn die Industrie einen substantiellen Teil des Markts abdecken und einen hohen Nutzungsgrad entlang der gesamten Wertschöpfungskette erzielen kann.

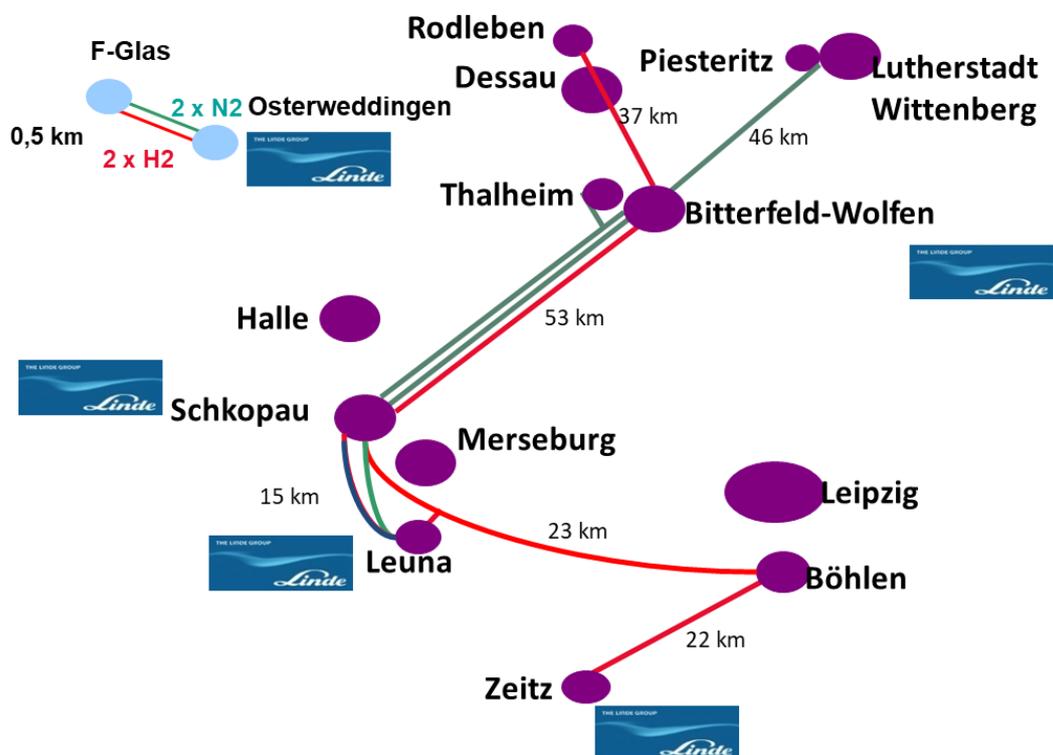


Abbildung 3 - Wasserstoffnetz in Ostdeutschland (Linde AG)

Der Aufbau eines neuen Pipelinenetzwerks für die Wasserstoffdistribution ist mit langjährigen hohen Investitionen verbunden. Die Wirtschaftlichkeit dieser Investitionen setzt ausreichende Mengen an transportiertem und verkauftem Wasserstoff voraus. Regionale Wasserstoff-Pipelines oder entsprechende kleine Netze sind an einigen Standorten bereits verfügbar – die längsten in den USA und Westeuropa. Die Nutzung der bestehenden Infrastruktur für die Erdgasversorgung (Pipelines und unterirdische Speicher) und die Beimischung von Wasserstoff in das Erdgasnetz ist für eine Übergangsphase eine potenzielle Alternative, bis die Umstellung auf die reine Wasserstoffverteilung vollständig etabliert ist. Eine Beimischung von bis zu 20 Prozent Wasserstoff in das Erdgasnetz könnte bereits heute umgesetzt werden, ohne dass größere Änderungen an den Leitungen und an den mit dem entsprechenden Brennstoffgemisch betriebenen Haushaltsgeräten erforderlich wären.

Obwohl es sich nicht um eine vollständig kohlenstofffreie Technologie handelt, könnten somit erhebliche Mengen an CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden. Auch würde sich der Sicherheitsstatus gegenüber dem Betrieb mit reinem Erdgas kaum ändern. Somit eignet sich das deutsche Erdgasnetz in seiner bestehenden Infrastruktur, um als riesiger Speicher für mehrere Milliarden Kilowattstunden (kWh) zu fungieren. Seit 1938 existieren in Deutschland Gasnetze für Wasserstoff und sind somit erprobt und in Benutzung. Abbildung 3 zeigt 150 km Wasserstoffgasnetz welches die chemische Industrie mit den Wasserstoff Verbrauchszentren Schkopau, Leuna, Zeitz, Böhlen, Bitterfeld und Rodleben verbindet. Auch im Ruhrgebiet in NRW ist schon ein umfangreiches Wasserstoffnetz vorhanden, Abbildung 4 zeigt die verschiedenen Leitungen, die dort Erzeuger und Verbraucher miteinander verbinden.



Abbildung 4 - Wasserstoffcluster Ruhrgebiet (Energie Agentur NRW, 2018)

Analysen deuten darauf hin, dass die Kosten für alle Wege der Wasserstoffverteilung in den nächsten zehn Jahren erheblich sinken dürften: um etwa 60 Prozent, wenn man die Produktion einschließt, und sogar um etwa 70 Prozent, wenn nur der Vertrieb und der Handel betrachtet werden. Dadurch könnten die Kosten für Wasserstoff an der Zapfsäule bis 2030 auf weniger als 5€ pro Kilogramm sinken. Das Erreichen solcher Kostenziele hängt von der Steigerung der Nachfrage und der damit verbundenen höheren Auslastung der Verteilinfrastruktur ab. Die Erhöhung des Lkw-Fuhrparks sowie die zunehmende Größe und Dichte des Tankstellennetzes können Kosteneinsparungen in der Größenordnung von 0,10 bis 0,50€ pro Kilogramm bewirken. Die größte Kostenreduktion lässt sich bei den Wasserstofftankstellen (HRS) erreichen, die derzeit den größten Anteil an den Wasserstoffkosten an der Zapfsäule haben und etwa 70 Prozent der gesamten Vertriebs- und Handelskosten ausmachen. Dazu ist eine Steigerung der Nachfrage und der Größe der HRS notwendig, da das heutige Preisniveau überall dort, wo es keiner strategischen Regulierung unterliegt, auch bei kleinen Tankstellen vorrangig auf die geringe Auslastung zurückzuführen ist. Durch die genannten Maßnahmen wird ein Kostenrückgang von etwa 80 Prozent – bei einem jetzigen Niveau von etwa 5€ bis 6€ pro Kilogramm im Jahr 2020 bis auf etwa 1€ bis 1,50€ pro Kilogramm im Jahr 2030 – möglich.

### *3.4 Wasserstoffnutzung über Brennstoffzelle*

In den aktuellen Diskussionen rund um das Thema Wasserstoff fällt immer wieder der Begriff „Brennstoffzelle“. Vor allem in alternativen Antriebstechnologien und für die allgemeine Umwandlung von Wasserstoff und Sauerstoff zu elektrischer Energie, spielt die Brennstoffzelle eine große Rolle. Im Folgenden wird die Funktion daher genauer vorgestellt:

Brennstoffzellen bestehen für gewöhnlich aus mehreren Einzelzellen, die in Reihe

geschaltet einen Brennstoffzellenstapel ergeben. Dabei verfügt eine Einzelzelle über jeweils zwei Halbzellen, die durch einen Elektrolyten (Membran) voneinander getrennt sind. In jeder Halbzelle befindet sich zumeist eine poröse Gasdiffusionsschicht (gas diffusion layer, GDL) und eine auf die Membran aufgebraute Katalysatorschicht (catalyst layer, CL), die Anode oder die Kathode. Die Katalysatorschichten bilden zusammen mit der Membran eine Membran-Elektroden-Einheit (membrane electrode assembly, MEA). Zwischen den Einzelzellen in einem Brennstoffzellenstapel befinden sich Bipolarplatten. Sie verfügen über eingearbeitete Strömungskanäle, die zusammen mit der Gasdiffusionsschicht für die Zuleitung von den Reaktanden bzw. die Ableitung von den Produkten zuständig sind. An der negativ geladenen Anode findet die Oxidation von Wasserstoff statt, bei der aus dem Wasserstoffmolekül zwei Protonen und zwei Elektronen entstehen. Beim Einsatz einer protonenleitenden Membran, wie es beispielsweise bei der Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) der Fall ist, gelangen die Protonen über die Membran von der Anodenseite auf die Kathodenseite. Dort erfolgt dann die Reduktion von Sauerstoff aus der Luft mit den Protonen zu Wasser. Die Gesamtreaktion in einer Brennstoffzelle kann demnach wie folgt zusammengefasst werden:



Bipolarplatten besitzen neben den Strömungskanälen noch weitere relevante Eigenschaften, die für einen Brennstoffzellenstapel erforderlich sind. Sie gewährleisten einerseits eine physische Trennung zwischen den Zellen während sie andererseits eine elektrisch leitende Verbindung der Einzelzellen innerhalb eines Stapels ermöglichen. Die bei der

Oxidation von Wasserstoff freigesetzten Elektronen fließen aufgrund der entstehenden Potentialdifferenz von der negativ geladenen Anode zur positiv geladenen Kathode über den äußeren Stromkreislauf. Über den Elektronenfluss kann Arbeit verrichtet werden, d.h. elektrische Geräte können über den resultierenden Strom betrieben werden. (Carrette, Friedrich & Stimming, 2001)

### Anwendungen in der Antriebstechnologie

Man kann allgemein zwischen drei Antriebsarten bei Brennstoffzellenfahrzeugen unterscheiden:

- Dominanter Brennstoffzellenantrieb
- Range Extender Antrieb
- Hybridantrieb (Nachrüstlösung)

Beim Range Extender Antrieb wird die Wasserstoffbrennstoffzelle dafür genutzt, die Reichweite des hauptsächlich batteriebetriebenen Fahrzeugs zu erhöhen. Es lässt sich also Wasserstoff und Strom tanken. Im Falle des dominanten Brennstoffzellenantriebes lässt sich nur Wasserstoff tanken. Hier wird die Batterie nur zur Rekuperation von Bremsenergie und zur Leistungsunterstützung bei der Beschleunigung genutzt. Das Konzept für diese Antriebsarten kann in Abbildung 5

eingesehen werden. Bei einer hybriden Nachrüstlösung wird in einem bestehenden Dieselmotor eine Wasserstoffdirekteinspritzung nachgerüstet. Der Motor wird befähigt ein Diesel-Wasserstoffgemisch zu verbrennen und somit die CO<sub>2</sub> Emissionen um mehr als 85 % gegenüber dem reinen Dieselmotor zu reduzieren [Xinyu 2022]. Die Stickoxid Emissionen, welche sonst bei der Verbrennung von Wasserstoff entstehen, können mit genauer Kontrolle der Konditionen im Zylinder im Schichtbetrieb vermieden werden. Der Hybridverbrenner ist zwar 26 % effizienter als ein reiner Dieselmotor, dafür aber wesentlich ineffizienter als ein Brennstoffzellenfahrzeug. Allerdings könnten durch eine Nachrüstlösung bestehende Fahrzeuge weiter genutzt werden und die Investitionskosten gesenkt werden. Zudem ist für diese Variante (anders als bei der Brennstoffzelle) der Reinheitsgrad des Wasserstoffs nicht relevant und es kann stark verunreinigter Wasserstoff genutzt werden. Keyou, eine Firma in Süddeutschland bietet die Nachrüstung neuer Dieselmotoren mit dieser Technik an.

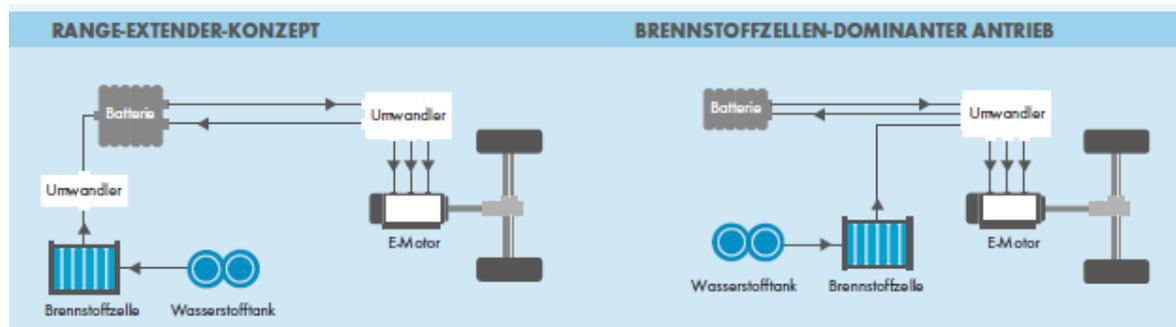


Abbildung 5 - Range Extender-Konzept und Brennstoffzellen-Dominanter Antrieb (Klell et al., 2018)

#### 4. Wasserstoff in der Landwirtschaft/Landtechnik – Potentiale und Hindernisse

Die Landwirtschaft bietet, in Kopplung mit den weiteren Sektoren Strom, Wärme und Mobilität, vielversprechende Grundlagen und bereits vorhandene Infrastrukturen, die es zukünftig ermöglichen sollen, grünen Wasserstoff zu produzieren, zu speichern, zu transportieren und zu nutzen. Diesbezüglich gibt es bereits erste wissenschaftliche und praxisorientierte Forschungsprojekte. Das Projekt H2Agrar erklärt seine Motivation zum Beispiel wie folgt: „Der ländliche Raum und die Landwirtschaft haben im Zuge der Energiewende durch das zur Verfügung stellen von Flächen wesentlich zum Ausbau Erneuerbarer Energien beigetragen, sodass eine infrastrukturelle Einbindung und Nutzung von „grünem Wasserstoff“ in der Landwirtschaft folgerichtig sind.“ (CEC Haren, 2021)

Betrachtet man die Nutzungsmöglichkeiten von Wasserstoff in der Landwirtschaft nimmt die Antriebstechnologie von Landmaschinen einen wichtigen Stellenwert ein. Denn für die Landtechnik sind laut Schwaderlapp (2017) „leistungsstarke Motoren und hohe Energiespeicherkapazitäten gefragt“, weshalb eine Dieselantriebstechnik der Branchenstandard für Landmaschinen sei. Diesbezüglich wird auch ein vergleichendes Beispiel zwischen Diesel und Elektroantrieb gegeben: „So ermöglicht ein 590-l-Diesel-Tank in einem schweren Traktor etwa 10 h Pflugarbeiten bei hoher Last auf dem Feld. Zum Vergleich: Ein reiner Elektroantrieb müsste – auf Basis aktuell marktüblicher Batterietechnik – mit einem Akkupaket von etwa 4500 l Volumen und 12 t Gewicht ausgestattet werden, um die gleiche Arbeit verrichten zu können. Dennoch ist CO<sub>2</sub>-Reduzierung (Dekarbonisierung) in der Landwirtschaft notwendig und möglich. Durch den Einsatz

alternativer Kraftstoffe und Elektrifizierung von Nebenantrieben kann die Effizienz von Verbrennungsmotoren gesteigert und perspektivisch sogar ein CO<sub>2</sub>-neutraler Betrieb erreicht werden.“ (Schwaderlapp, 2017). Diesbezüglich wird auch der Einsatz von Wasserstoff in Verbrennungsmotoren als Ansatzpunkt mit großem Potential gesehen, sodass „zukünftig eine weitere Diversifizierung“ der Kraftstoffe beobachtet werden kann. Für „Hersteller ist es dabei wichtig, frühzeitig die richtigen Lösungen anzubieten – der Markt wird letztlich entscheiden, welche Konzepte sich durchsetzen.“ (Schwaderlapp, 2017). Wasserstoffbetriebene Landmaschinen sind zwar derzeit noch nicht auf dem breiten Markt zu finden, doch es existieren bereits erste Prototypen und weitere befinden sich in der Entwicklungsphase. Im Sommer 2020 stellte zum Beispiel das China Agricultural Machinery Equipment Innovation Center (CHIAIC) den unbemannten und wasserstoffbetriebenen Traktor ET504-H vor. „Gemäß Hersteller kann der ET504-H in drei bis fünf Minuten genügend Wasserstoff tanken, um Reichweite für weitere vier Stunden Einsatz zu erhalten. Benötigt wird dazu aber eine professionelle Wasserstofftankstelle.“ (Schweizer Bauer, 2020) In Europa gibt es einige wenige prototypische Traktoren, die mit Wasserstoff betrieben werden können. New Holland präsentierte bereits 2009 einen Konzepttraktor, der mit Wasserstoff betrieben werden kann. Dieser „120-PS-Traktor basiert auf der Serie T6000 von New Holland und verfügt anstelle eines Verbrennungsmotors über Brennstoffzellen“ (Bauhof-Online, 2009). Auch Fendt erforscht die Technologie (agrarheute, 2022) und Deutz hat sogar angekündigt, 2024 mit einem Wasserstoffmotor in die Serienproduktion zu gehen (Motorsport Total, 2021). In den kommenden Monaten und Jahren ist mit weiteren Forschungs- und



## Potentiale Wind

Derzeit sind 6071 Windanlagen mit einer gesamten Nettonennleistung von 11,49 GW in Niedersachsen in Betrieb, davon:

- 6023 an Land (Nettonennleistung 11,27 GW)
- 49 in der Niedersächsischen Nordsee (Nettonennleistung 224 MW)
- 2363 in der Metropolregion (Nettonennleistung 446,3 MW)

In Planung sind derzeit weitere 317 Anlagen mit einer gesamten Nettonennleistung von 1,47 GW (alle davon sind an Land geplant) in Niedersachsen; In der Metropolregion sind 66 Anlagen mit zusammen 28,3 MW in Planung

## Potentiale Biomasse

Derzeit sind 4212 Biomasseanlagen in Niedersachsen in Betrieb mit einer gesamten Nettonennleistung von 1,79 GW; die größte Anlage hat eine Nettonennleistung von 53,7 MW; In der Metropolregion sind 1549 Anlagen in Betrieb mit einer gesamten Nettonennleistung von 58 MW

Weitere 60 Biomasseanlagen mit einer gesamten Nettonennleistung von 151,9 MW sind in Planung bzw. derzeit im Bau; In der Metropolregion sind 28 Anlagen in Planung, allerdings finden sich hierfür keine finale Leistungsangaben

## Potentiale Kernkraft

In Niedersachsen ist derzeit noch das Kernkraftwerk Emsland in Lingen am Netz, es hat eine Nettonennleistung von 1,34 GW; Der Landkreis Emsland gehört allerdings

nicht zur Metropolregion, Lingen plant allerdings im zukünftigen Wasserstoffhochlauf eine Vorreiterrolle zu spielen.

## **PV-Potentiale von Stallgebäuden**

Es ist schwierig, allgemein gültige Aussagen über die Maße von Stallgebäude zu treffen. Je nach Tierart, Zweck (z.B. Mast oder Milcherzeugung) und Haltungsform (Bio oder konventionell) können die Abmaße variieren. Ebenfalls bauen Landwirte die Ställe nicht nach Baukasten, sondern diese sind immer individuell gestaltet. Um dennoch eine ungefähre Aussage über das Potential machen zu können, werden im Folgenden zwei Beispiele vorgestellt. Es wird ein Milchvieh-, sowie ein Schweinemastbetrieb betrachtet.

Beispiel gewählt. 62,9 % aller Milchviehbetriebe hat eine Anzahl von 50 bis 199 Milchkühen<sup>6</sup>, daher wird ein Betrieb in dieser Größenordnung untersucht. Die Maße eines beispielhaft betrachteten, in der Wesermarsch stehenden, Stalles für ca. 150 Milchkühe ist 30 m x 80 m (inkl. Melkstand, Futtertisch, Liegeboxen usw.). Somit ergibt sich eine Grundfläche von 2400 m<sup>2</sup>. Um eine gute Belüftung im Stallgebäude zu gewährleisten sind die Dächer oft hoch und haben in der Regel eine Sattel-, Sched- oder Pultdachform. Durch die hohe Bauweise sind die Dachflächen meist nicht durch Bäume verschattet. Der Beispielstall hat ein relativ flaches Satteldach mit 15 ° Neigung, somit eine Dachfläche von ca. 2500 m<sup>2</sup>. Im ungünstigsten Fall ist der Stall so ausgerichtet, dass nur die Hälfte des Daches für PV verwendbar ist, daher stehen für PV-Anlagen 1250 m<sup>2</sup> zur Verfügung. Als Faustformel für die installierbare Leistung gilt ca. 5,5 qm pro kWp<sup>7</sup>. Dies entspräche

---

<sup>6</sup> Vgl. Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Die niedersächsische Landwirtschaft in Zahlen, verfügbar unter:

[https://www.ml.niedersachsen.de/download/178349/Die\\_niedersaechsische\\_Landwirtschaft\\_in\\_Zahlen\\_2021.pdf](https://www.ml.niedersachsen.de/download/178349/Die_niedersaechsische_Landwirtschaft_in_Zahlen_2021.pdf).

<sup>7</sup> <https://www.dachvermieten.net/wieviel-qm-dachflaeche-fuer-1-kwp-kilowattpeak/>

einer mit PV realisierbaren Leistung von 227 kWp. In dieser Größenordnung gibt es in Niedersachsen 2402 Betriebe. 4475 Betriebe sind kleiner, 781 Betriebe sind größer. Seien die kleineren Betriebe zur Hälfte mitberücksichtigt und die größeren voll, so ergibt sich ein geschätztes Potential (nur für die Milchviehställe) von:  $227 \text{ kWp} * (781 + 2402 + 0,5 * 4475) = 1.230.454 \text{ kWp} \sim 1,23 \text{ GWp}$ .

Da die Schweinemast ebenfalls eine bedeutende Rolle in der Metropolregion einnimmt, soll hierfür ebenfalls ein Potential geschätzt werden. Insgesamt gibt es in Niedersachsen 5907 Betriebe, die insgesamt 5.614.176 Mastschweine halten. 26,8 % dieser Betriebe hält zwischen 400 und 999 Schweine. 39,8 % der Betriebe ist kleiner, 33,4 % ist größer.<sup>8</sup> Ein existierender Stall für ca. 500 Schweine aus dem Landkreis Cuxhaven hat eine ungefähre Grundfläche von  $60 \text{ m} \times 21 \text{ m} = 1260 \text{ m}^2$ . Unter Annahme der gleichen baulichen Gegebenheiten wie beim beispielhaft betrachteten beispielhaften Kuhstall und unter Annahme, dass 80 % der halben Dachfläche genutzt werden kann (auf Schweineställen sind oft diverse

Lüftungsschächte oben im Dach), so ergibt sich eine realisierbare PV-Leistung von ca. 95 kWp. Unter der Annahme, dass diese Leistung ungefähr bei allen Betrieben im Mittel installierbar ist ergibt sich folgendes schätzungsweise Potential:  $95 \text{ kWp} * 5907 = 561.165 \text{ kWp} \sim 0,561 \text{ GWp}$ .

Neben den Gebäuden in der Landwirtschaft, gibt es die Möglichkeit landwirtschaftliche Nutzflächen mit Photovoltaik zu versehen. Zukünftig gibt es über das EEG eine Prämie in Höhe von 1.2 Cent pro Kilowattstunde um die aufwändige Unterkonstruktion zu berücksichtigen. Außerdem wird der gesetzliche Anspruch bezüglich EU-Direktzahlungen zu 85 % der flächenbezogenen Zahlungen bestehen bleiben. Ziel der Agri-PV-Anlagen ist es, neben der dualen Nutzbarkeit der Fläche noch weitere Synergieeffekte zu nutzen. Beispielsweise können die Pflanzen durch die PV-Anlagen vor Starkregen, Hagel und Austrocknung geschützt werden. Leider muss für die Aufständigung oft der Flächennutzungsplan geändert werden, was viel Zeit in Anspruch nimmt und den Markthochlauf von Agri-PV-Anlagen verzögert.



Abbildung 7 - Hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlagen (Fraunhofer ISE)

<sup>8</sup> Vgl. Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Die niedersächsische Landwirtschaft in Zahlen, verfügbar unter:

[https://www.ml.niedersachsen.de/download/178349/Die\\_niedersaechsische\\_Landwirtschaft\\_in\\_Zahlen\\_2021.pdf](https://www.ml.niedersachsen.de/download/178349/Die_niedersaechsische_Landwirtschaft_in_Zahlen_2021.pdf).

Außer der Installation von Photovoltaik auf den Flächen des landwirtschaftlichen Betriebes gibt es weitere Möglichkeiten die Treibhausgase zu reduzieren. Beispielsweise lassen sich auch die Abfallprodukte aus der Landwirtschaft für die Wasserstoffgewinnung nutzen: Biogene Wasserstoffherzeugung kann auch mit bestehenden Biogasanlagen umgesetzt werden.. Wird das Biogas reformiert und in

einem chemical-looping Prozess in Eisenoxid gespeichert (wie oben beschrieben), lassen sich hohe Reinheitsgrade erreichen. Diese Erweiterung von Biogasanlagen ist bereits erprobt und marktreif. Es fehlt allerdings bisher an Nutzungsmöglichkeiten für den Wasserstoff, um diese Umrüstung profitabel zu machen.

## II. SWOT-Analyse

### Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken von Wasserstofftechnologien für die Landwirtschaft/Landtechnik mit besonderem Fokus auf die Metropolregion Nordwest

Nach einem Austausch mit den verschiedenen Praxispartnern entstand im Laufe des Projektes eine SWOT-Analyse die bereits in Form einer PowerPoint-Datei mit den Projektpartnern geteilt wurde. In dieser Analyse werden der Status-Quo von Wasserstofftechnologien in Landwirtschaft und Landtechnik, sowie dessen Zukunftsaussichten vorgestellt. Die SWOT-Analyse welche an der Havard Business School entwickelt wurde, beinhaltet vier Aspekte (Hill und Westbrook, 1997): 1. Strengths (Stärken), Weaknesses

(Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Risiken) Während die Stärken und Schwächen durch eine interne Analyse ermittelt werden, basieren die Chancen und Risiken auf einer externen Analyse (der Umweltgegebenheiten, Gesetzeslage, Marktsituation etc.). Die Vorteile liegen in der Simplizität und der Fokussierung auf die Schlüsselfragen (vgl. Pickton 1998, S. 103-104). Häufig werden diese vier Dimensionen in einer Matrix dargestellt, die wie folgt aussehen kann:



Abbildung 8 - SWOT Analyse Matrix (©<https://swot-analyse.net>)

In den kommenden Unterkapiteln werden nun die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken für Wasserstoff in der Landwirtschaft und Landtechnik aufgezeigt. Diese Informationen stammen aus einem Experten-Workshop und beziehen sich hauptsächlich auf die betrachtete Region der Metropolregion Nordwest. Um die gesammelten Informationen besser zu strukturieren und die Diskussion während des Workshops zu leiten, wurden die gesammelten Ergebnisse in folgende Kategorien eingeordnet: Wasserstoffherstellung,

Wasserstofftransport,  
Wasserstoffspeicherung,  
Wasserstoffnutzung und Allgemeines.

### 1. Stärken – Strengths

In Form der Wasserstoffstrategie der Metropolregion Nordwest (2021) gibt es bereits gute Vorarbeiten und Ideen für die generelle Einbettung von Wasserstofftechnologien in Industrie und Gesellschaft, um grünen Wasserstoff zukünftig flächendeckend nutzen zu können. Durch diese und ähnliche

Strategien, sowie einem immer stärker werdenden Willen etwas zu unternehmen, welcher durch externen Druck sowie durch intrinsische Motivation gleichermaßen entsteht, sind die verschiedenen Stakeholder der Metropolregion im Allgemeinen gut für einen Wandel hin zu stärkerer Einbindung von Wasserstoff gewappnet.

Wie schon in der wissenschaftlichen Recherche erläutert, besitzen landwirtschaftliche Höfe große Potentiale für die Erzeugung und Nutzung von Erneuerbaren Energien, wodurch Landwirte immer mehr auch zu Energiewirten werden. Die so gewonnene Energie kann zum Beispiel in Elektrolyseuren für die Herstellung grünen Wasserstoffs genutzt werden. Der so erzeugte Wasserstoff kann entweder eigens genutzt werden, oder an Kunden transportiert werden. Hier bieten sich zum Beispiel auch die Binnenhäfen der Region an. Auch die Speichermöglichkeiten sind in der betrachteten Region in großen Mengen vorhanden, etwa durch Salzkavernen.

Betrachtet man nun eine mögliche Nutzung des Wasserstoffs auf landwirtschaftlichen Höfen, so wird schnell deutlich, dass die vielen Landtechnikunternehmen viel Know-how in der Herstellung von Landmaschinen haben. Die kurzen Wege zwischen den einzelnen Unternehmen und der Austausch über Netzwerke (wie z.B. das Agrotech Valley) bieten eine gute Grundlage für zukünftige Kooperationen in der Forschung und Entwicklung neuer Wasserstoffantriebstechnologien. Durch das vorhandene Know-how und etwaige Vorarbeiten können die Unternehmen der Region realistisch einschätzen, für welche Maschinen und vor allem welche Leistungsspektren ein Wasserstoffantrieb sinnvoll sein kann (erste grobe Einschätzung: 75kW – 150 kW). Zudem gibt es durchaus Vorteile von Wasserstoff gegenüber anderen alternativen Antrieben. Im Gegensatz zu Bio Fuels ist der Wirkungsgrad zum Beispiel höher. Betrachtet man den landwirtschaftlichen Hof ganzheitlich, so kann Wasserstoff zukünftig als ein wichtiges Element in Kreislaufwirtschaften dienen.

## Stärken - Strengths

### Allgemeines

- Erste Strategien für die Region aufgestellt (Wasserstoffstrategie der Metropolregion Nordwest)
- Der Wille etwas zu unternehmen (externer Druck?)

### Wasserstoffherstellung

- Erneuerbare Energien auf landwirtschaftlichen Höfen verfügbar

### Wasserstofftransport

- Häfen und Binnenschifffahrt zum Transport vorhanden

### Wasserstoffspeicherung

- Speicher und Kavernen bereit für H<sub>2</sub>

### Wasserstoffnutzung

- Viel Know-How durch Landtechnikunternehmen → Hersteller in einer Region (kurze Wege)
- Leistungsspektrum bekannt (realistische Einschätzung wo H<sub>2</sub>-Antrieb möglich ist)
- Wirkungsgrad im Gegensatz zu Bio-Fuels hoch
- Kreislaufwirtschaft auf landwirtschaftlichen Höfen

## 2. Schwächen – Weaknesses

Bei der Erstellung der SWOT-Matrix waren sich die Experten einig, dass es allgemein noch zu unsicher sei, ob Wasserstofftechnologien die „richtige Wahl für die Zukunft“ seien. Dies gilt insbesondere für die Antriebstechnologie in der Landtechnik. Denn es gibt viele verschiedene Möglichkeiten, den Dieselbetriebenen Motor zukünftig auszutauschen (Elektromobilität, E-Fuels, Wasserstoff etc.) und es ist noch nicht absehbar, welche Technologie sich in Zukunft durchsetzt und zum Standard bei den Kunden der Landtechnik-Unternehmen wird. Durch den Wechsel hin zu neuen Standards, wird die komplette Antriebstechnologie inklusive des Tank-/Ladevorgangs auch komplexer werden. Da Unternehmen das Risiko der Forschung- und Entwicklung solcher unsicheren Technologien nicht allein stemmen wollen und können, sind sie daher auf Fördermittel angewiesen. Diese müssen eine gewisse Höhe haben, da sehr hohe

Kosten erwartet werden. Auch waren sich die Experten nicht sicher, inwiefern grüner Wasserstoff ohne massive Importe in Deutschland zur Verfügung gestellt werden können, da die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien noch zu gering ist.

Schaut man sich explizit das Anwendungsfeld der Landwirtschaft an, so ist ein großes Problem, dass die Landmaschinen nicht nur für das reine Fahren angetrieben werden müssen, sondern auch Energie für die verschiedenen Arbeitsprozesse wie z.B. das Häckseln benötigen. Zudem gibt es bislang nur unausgereifte Ideen, wie Wasserstoff ganzheitlich in der Landwirtschaft genutzt werden kann. Vor allem die saisonale Nutzung könnte hierbei zu Problemen führen. Insgesamt führen diese Unsicherheiten und aktuellen Schwächen dazu, dass ein Henne-Ei Problem entsteht, sodass weder genug Wasserstoff produziert wird noch genug Wasserstoff genutzt wird.

### **Schwächen – Weaknesses**

#### **Allgemein**

- Unsicherheit ob man mit Wasserstoff auf die „richtige Zukunft“ setzt
- „Geschäftsmodell/Infrastruktur PKW“ nicht übertragbar für Landwirtschaft → Energie muss zum Betrieb (zur Maschine) kommen
- Gesetzeslagen
- Henne-Ei Problem
- Bedrohung: Auf Förderung angewiesen

#### **Wasserstoffherstellung**

- Verfügbarkeit erneuerbare Energien zu gering (ganz Deutschland)

#### **Wasserstoffnutzung**

- Verlassen eines Standards (Dieselmotor) für eine Vielfalt an Möglichkeiten (E-Fuels, H<sub>2</sub>, E etc.) → Komplexität wird zunehmen
- Zu hohe Kosten (Nutzung, Umrüstung von Fahrzeugen, Second-Life ist nicht gegeben etc.)
- Breitgestreuten Anwendungsfälle (nicht nur fahren sondern auch häckseln etc.)
- Wenig Ideen, wie Wasserstoff ganzheitlich in der Landwirtschaft genutzt werden kann
- Saisonale Nutzung in der Landwirtschaft

### 3. Chancen – Opportunities

Trotz der soeben aufgelisteten Schwächen sind sich die Experten einig, dass Wasserstofftechnologien ein enormes Potential für die Landtechnik und Landwirtschaft bergen. Daher ergeben sich einige Chancen für die zukünftige Entwicklung dieses Themenkomplexes. Die Erforschung und Entwicklung von Wasserstofftechnologien nehmen momentan genau wie die Akzeptanz auf der ganzen Welt Fahrt auf, so entstehen Chancen für starke Kooperationen und neue Finanzierungsmöglichkeiten. Durch die großen Fortschritte, die in der Entwicklung zu erwarten sind, können Prozesse effizienter und somit auch günstiger werden. Besonders in der Landwirtschaft gibt es riesige Potentiale, indem überschüssige Energie aus dezentralen

Erzeugungsanlagen für die Erzeugung grünen Wasserstoffs genutzt werden können. Hier bekommt vor allem die voranschreitende Einbindung von Agri PV eine große Bedeutung (siehe auch die Ergebnisse aus der Recherche – insbesondere für die Metropolregion). Auch die Wasserstoffherzeugung aus Biogas kann ein wichtiger Bestandteil für lokale Hersteller werden. Auch die Verteilung des Wasserstoffes könnte zukünftig einfacher werden, wenn die vorhandenen Erdgasnetze weiter umfunktioniert werden. Insgesamt kann Wasserstoff ein wichtiges Element in der Energieversorgung und auch in der Antriebstechnologie auf landwirtschaftlichen Höfen werden und dazu beitragen, dass ressourcenschonende Kreislaufwirtschaften entstehen.

## Chancen – Opportunities

### Allgemein

- Stärkere Kooperationen und zukünftige Netzwerke sowie (staatliche / wissenschaftliche) Finanzierungen
- Kreislaufwirtschaft bei lokaler Elektrolyse möglich
- Niedrigere Kosten durch effizientere Prozesse (und Subventionen?)

### Wasserstofftransport

- Nutzung der vorhandenen Erdgasnetze

### Wasserstoffherstellung

- Agri-PV
- Modulare Einheiten für Stromerzeugung (saisonale Probleme angehen) → Bi-Direktionale Einheiten
- H<sub>2</sub>-Herstellung aus Biogas (aber Wirkungsgrad beachten)
- Überschüssiger Strom kann umgewandelt werden

### Wasserstoffnutzung

- Anforderungen von Local Zero Emissions gerecht werden → Generell Emissionen
- Gesellschaftliche Akzeptanz (Studie: Mehrheit der Deutschen sieht H<sub>2</sub> sehr positiv)

#### 4. Risiken – Threats

Um die Vorteile von Wasserstofftechnologien voll ausschöpfen zu können, müssen auch die Hindernisse und Risiken bedacht und überwunden werden. Allgemein ist vor allem die unsichere Zukunft ein Problem, das Unternehmen von großen Investitionen in Wasserstofftechnologien abhält. So gibt es zum Beispiel Bedenken, dass es zukünftig nur wenige Abnehmer für erzeugten Wasserstoff geben könnte. Außerdem könnten Technologiesprünge aus anderen Bereichen (wie z.B. effizientere Batterien)

dafür sorgen, dass andere Antriebstechnologien wesentlich attraktiver sind. Ein weiteres großes Hindernis stellt die Verfügbarkeit von Ressourcen da. So benötigt man zum Beispiel eine große Menge an Wasser, um Wasserstoff zu erzeugen und dieser Wasserstoff ist nur dann nachhaltig, wenn er mit Hilfe erneuerbarer Energien erzeugt wird. Auch mögliche Nutzungskonflikte (besonders im Bezug auf landwirtschaftliche Flächen) können ein Risiko für die Wasserstoffherstellung mit sich bringen.

### Risiken – Threats

#### Allgemein

- In der Zukunft keine Abnehmer für Wasserstoff
- Effizientere Akkus wären unschlagbar
- Ressourcennutzung (Bsp.: Wasser) und Abfallstoffe die entstehen

#### Wasserstoffnutzung

- Motorenhersteller schwenken um → Landtechnik fällt rüber (Bsp.: LKW setzen komplett auf Batterie und Landtechnik hängt am Tropf dieser Hersteller)
- Nur dann nachhaltig, wenn grüner Wasserstoff hergestellt und genutzt werden kann
- Nutzungskonflikte (Bsp.: Flächennutzung → Ausgleichsflächen)

### III. Handlungsstrategien und Einstiegsszenarien

#### 1. Gestaltungsrahmen und Methodiken

Aufbauend auf den Ergebnissen aus der Recherche, den Experten-Interviews sowie der SWOT-Analyse, wird im Folgenden eine erste Handlungsstrategie für die

Einführung von Wasserstofftechnologien in die Landwirtschaft und Landtechnik in der Metropolregion Nordwest vorgeschlagen. Darauf aufbauend werden im Anschluss Einstiegsszenarien präsentiert.

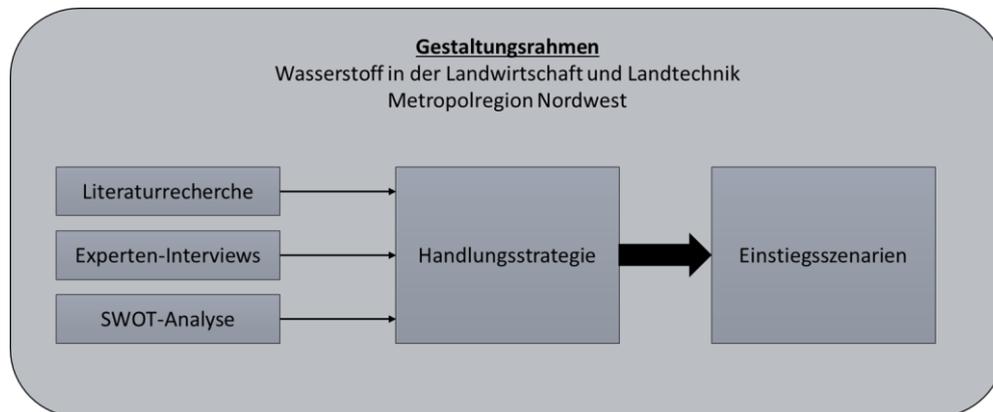


Abbildung 9 - Erstellung der Handlungsstrategie und Einstiegsszenarien

#### 2. Handlungsstrategie

Auf Grundlage aller oben beschriebenen Ergebnisse wird nun eine Handlungsstrategie für die Metropolregion Nordwest vorgeschlagen, die weitere Vorgehensweisen mit Bezug zum Thema Wasserstoff in der Landwirtschaft und Landtechnik beinhaltet. Insbesondere werden hierbei zukünftige Ziele, Potentiale und Herausforderungen differenziert betrachtet, um so eine fundierte und realistische Einschätzung für die Entwicklung des Themas zu geben. Um die Strategie für ein solch großen Themenbereich besser zu strukturieren, wird dieses Kapitel in die Bereiche Allgemeine Rahmenbedingungen, Wasserstoffherzeugung, Wasserstoffspeicherung und -transport sowie Wasserstoffnutzung aufgeteilt. In jedem dieser Bereiche wird auf die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten für die Landwirtschaft und die Landtechnik eingegangen.

#### 2.1 Allgemeine Rahmenbedingungen

##### **Einordnung in existierende Strategien: Nationale Wasserstoffstrategie und Wasserstoffstrategie Metropolregion Nordwest**

Die hier beschriebene Strategie kann in die bereits existierende Wasserstoffstrategie der Metropolregion Nordwest (2021) eingebettet werden, welche wiederum auf anderen strategischen Ansätzen (regional, national, europäisch) aufbaut. Die somit indirekten und direkt berücksichtigten Strategien fokussieren sich alle „auf die Implementierung einer grünen Wasserstoffwirtschaft und die Chancen für die Wirtschaft im Heimatmarkt“ (Metropolregion Nordwest, 2021). Zudem bezieht sie sich in großen Teilen auf die nationale Wasserstoffstrategie Deutschlands (BMWi, 2020) und den darin beschriebenen Hintergründen und Maßnahmen. Die betrachteten existierenden Strategien werden durch diesen Vorschlag in der Hinsicht ergänzt,

dass die Branchen Landwirtschaft und Landtechnik explizit ergänzt werden.

### **Wasserstoff nur komplett nachhaltig, wenn „grün“**

Ein Punkt der in den bestehenden Strategien, der wissenschaftlichen Literatur und den Experten-Interviews gleichermaßen Beachtung findet, ist die unterschiedliche Herstellung und die anschließende Einordnung des Wasserstoffs. „Es gibt verschiedene Herstellungs- oder Gewinnungsmethoden. Als farbloses Gas hat Wasserstoff an sich keine Farbe; die Aufteilung in grünen, blauen, türkisen oder grauen Wasserstoff [es gibt auch schwarzen, orangen oder roten Wasserstoff] dient dazu, die Herstellungsarten und letztlich das Maß an Klimaneutralität des so erzeugten Wasserstoffs zu unterscheiden“ (ENBW, 2021). Diese Aufteilung ist auch für die Landwirtschaft von großer Bedeutung, da Nachhaltigkeit ein zentraler Punkt in der Bewirtschaftung von Feld und Hof darstellt. Bevor also im Folgenden über die Erzeugung und weitere Nutzung von Wasserstoff in Landwirtschaft und Landtechnik gesprochen wird, soll deutlich gemacht werden, dass Wasserstoff nur als nachhaltige Alternative für Energiespeicherung und Antriebstechnologien gesehen werden kann, wenn dieser auch aus nachhaltigen Quellen erzeugt wird. Nur so können heutige und zukünftige Probleme dieser Branche ganzheitlich überwunden werden.

- **Ergänzung bestehender Strategien, indem die Besonderheiten der Landwirtschaft/Landtechnik betrachtet werden**
- **Für nachhaltige Prozesse auf Höfen, muss der Wasserstoff „grün“ sein**

## 2.2 Wasserstofferzeugung

### **Erzeugungstechnologie – Großes Potential der Elektrolyse für Landwirtschaft**

Die verschiedenen Erzeugungsarten, die in der Recherche erläutert wurden, eignen sich in unterschiedlicher Art und Weise für die Landwirtschaft. Die größten und realistischsten Potentiale, um Wasserstoff emissionsfrei herzustellen liegen diesbezüglich aber wohl in der Elektrolyse. In Kombination mit eigenen erneuerbaren Energiequellen wie z.B. PV-Anlagen, Windkraftanlagen und Biogasanlagen kann unter großer Energiezufuhr Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten werden. Da es allerdings noch nicht weit verbreitet ist, dezentrale Elektrolyseure auf landwirtschaftlichen Höfen zu betreiben, müssen hierfür zukünftig die richtigen Weichen gestellt werden. Hierzu gehört zum Beispiel das Zusammenspiel zwischen Politik, Forschung und Landwirten. Fördermittel müssen bereitgestellt werden, um die Potentiale der landwirtschaftlichen Energieerzeugung und der gekoppelten Wasserstofferzeugung über Elektrolyseure weiter erforschen zu können. Zudem gibt es viele Nebenfelder die weiterer Forschung bedarf, wie z.B. die Nutzung von Reststoffströmen und anderen landwirtschaftlichen Nebenprodukten. Nur durch eigene Erzeugung von Wasserstoff können Landwirte zukünftig ihren eigenen Treibstoff für potenziell wasserstoffbetriebene Landmaschinen herstellen. Es gibt aber natürlich auch die Möglichkeit, diesen Wasserstoff einzukaufen. Welch großes Potential in der landwirtschaftlichen Energieerzeugung und damit auch indirekt in der Elektrolyse steckt, wurde in der Recherche insbesondere für die Metropolregion Nordwest aufgedeckt. Nun gilt es, die richtigen Investitionen und Entscheidungen zu treffen, um den Ausbau zu erweitern.

- **Analyse ob eigene Erzeugung oder Einkauf von H<sub>2</sub> sinnvoller ist – Jeder Hof ist unterschiedlich**
- **Erneuerbare Energieerzeugung erhöhen, um grünen Wasserstoff herstellen zu können (Agri-PV etc.)**
- **Zusammenspiel zwischen Politik, Forschung und Landwirtschaft um H<sub>2</sub>-Erzeugungsanlagen (z.B. Elektrolyseure) weiter zu erforschen und für die Praxis zu finanzieren**
- **Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe für Kreislaufwirtschaft**
- **Alternative Erzeugungsarten: Plasmalyse, dunkle Fermentation etc.**

### 2.3 Wasserstoffspeicherung und -transport

#### Existierende Technologien

Wie schon in der Recherche beschrieben, gibt es verschiedene Speichertechnologien für Wasserstoff, sodass es keine allgemeingültige Auswahl für geeignete Speichertechnologien gibt. Stattdessen ist der spezielle Anwendungsfall von Bedeutung für die richtige Auswahl (z. B. stationär, mobil, gespeicherte Menge Wasserstoff). Welche Vor- und Nachteile die gasförmige, flüssige oder gebundene Speicherung haben, wird in der Recherche erklärt. Allerdings ist es für die Metropolregion wichtig, die verschiedenen Möglichkeiten auch weiterhin zu erforschen und über Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zu verbessern. Denn nur mit effizienten Speichermöglichkeiten, kann die Nutzung von Wasserstoff zukünftig lukrativ erfolgen.

#### Besonderheiten Landwirtschaft: Mobile Tankstellen, Agrarlogistik etc.

Zur Betankung von Landmaschinen muss es zudem innovative Lösungen geben. Denn viele Maschinen sind ganztägig auf dem Feld unterwegs und haben so nicht die Möglichkeit zentrale Tankstellen anzufahren. In einigen Fällen macht die dezentrale Tankstelle auf einem landwirtschaftlichen Hof Sinn, in anderen Fällen wiederum, müssen mobile Tankstellen zur Verfügung gestellt werden. Diese mobilen Tankstellen (z.B. Container) stehen dann an dem bewirtschafteten Feld parat. So können Landmaschinen ohne große Zeitverluste aufgetankt werden. Die Landwirtschaft ist allerdings sehr vielfältig und so gibt es auch Anwendungsbeispiele, die eher an logistische Prozesse zwischen Hof, Acker und Kunde erinnern. Diese können auch mit wasserstoffbetriebenen LKWs durchgeführt werden. Auch hier zählt also, dass keine allgemeingültigen Aussagen zum Transport getätigt werden können. Allerdings muss es definitiv mobile und flexible Möglichkeiten der Betankung geben. Auch hier sind weitere Forschungs- und Entwicklungsvorhaben unablässig.

- **Je nach Anwendungsfall verschiedene Speichermöglichkeiten – Diese müssen weiter erforscht und entwickelt werden, um Prozesse zu optimieren**
- **Es müssen innovative Lösungen für die speziellen Probleme der Landwirtschaft entwickelt werden (z.B. Mobile Tankstellen)**
- **Auch die Agrarlogistik auf den Transportwegen zwischen Hof, Acker und Kunde muss mitgedacht werden**

## 2.4 Wasserstoffnutzung

### **Antriebstechnologie: Wasserstoff kann kurz- und mittelfristig nur Teil der Lösung sein (und nur bis zu einer bestimmten Leistungsgrenze)**

Bislang gibt es nur wenige landtechnische Prototypen, die mit Wasserstoff betrieben werden (können). Allerdings findet momentan eine Abkehr zu den fossilen Brennstoffen statt, sodass in den nächsten Monaten und Jahren mit einigen Technologiesprüngen zu rechnen ist. Es ist allerdings momentan nur schwer vorstellbar, dass auch die ganz großen Landmaschinen irgendwann komplett mit Wasserstoff betrieben werden können, da sie nicht nur für das reine Fahren Energie benötigen, sondern auch für die verschiedenen Bewirtschaftungsprozessen (häckseln etc.). Zudem gibt es weitere Probleme, die in der Landtechnik auftauchen, wie z.B. eine große Staubentwicklung auf dem Feld oder extreme Vibrationen und Wärmeentwicklungen in Maschinen. Diesbezüglich müssen also noch einige Innovationen und Entwicklungen erfolgen. So ist es momentan nur realistisch kleinere Geräte bis hin zu einer Leistungsgrenze von maximal 150 kW bzw. 200 PS mit Wasserstoff zu betreiben. Eine weitere Barriere für die Technologie, birgt die Existenz von Alternativen (E-Mobilität, E-Fuels etc.) und die Umstellung von jahrelanger Benzin- und Dieselnutzung. Die Landtechnik hängt zudem sehr stark von der LKW-Branche ab, da meist dieselben Motoren bezogen werden. Es kann also festgehalten werden, dass die Nutzung von Wasserstoff in landwirtschaftlichen Maschinen kurz- und mittelfristig noch sehr unsicher ist und höchstens eine Nebenrolle neben Alternativen einnehmen wird. Es kann allerdings mit kleinen Schritten stetig voran gehen, da einige Forschungs- und

Entwicklungsvorhaben angekündigt sind. Der Markt muss weiterhin genau beobachtet werden, um fundierte Entscheidungen zu treffen und „auf das richtige Pferd“ zu setzen.

### **Als Energiespeicher auf dem Hof**

Landwirtschaftliche Höfe weisen oftmals gute Bedingungen vor, um Wasserstoff herzustellen. Denn viele Landwirte sind mittlerweile auch Energiewirte (oder haben zumindest das Potential dazu). Denn die großen Flächen können vielfältig für Erzeugungsanlagen erneuerbarer Energien genutzt werden. So können über PV-, Windkraft oder Biogasanlagen große Mengen an Strom dezentral erzeugt und genutzt werden. Für die zukünftige Wasserstoffherzeugung scheint ein solches dezentrales Netz von Energieerzeugern gekoppelt mit Elektrolyseuren sinnvoll. Dieser dezentral erzeugte Wasserstoff kann über Brennstoffzellen auch optimal für eine Energiespeicherung auf dem Hof genutzt werden, um die Schwankungen der erneuerbaren Energiequellen abzufangen. Über eine Rückverstromung mittel Brennstoffzelle (umgekehrte Elektrolyse), wird der Wasserstoff so wieder zu nutzbarer elektrischer Energie.

- **Verschiedene Nutzungsmöglichkeiten auf dem Hof oder in der Antriebstechnologie von Maschinen**
- **In der Landtechnik gibt es bislang nur wenige Prototypen mit H<sub>2</sub>-Antrieb – Es muss weitere Entwicklungen geben**
- **Auch das Henne-Ei Problem zwischen Erzeugung und Nutzung muss Schritt für Schritt gelöst werden**
- **Mittelfristig wird Wasserstoff „nur“ ein Teil der zukünftigen Landwirtschaft sein – Hat allerdings große Potentiale**

### 3. Einstiegsszenarien – Wasserstoff in der Landwirtschaft und Landtechnik

Um einen zukünftig breiteren Einstieg von Wasserstofftechnologien in der Landwirtschaft und Landtechnik zu ermöglichen, muss es zunächst Ideen geben, wie dies erfolgreich gelingen kann. Da es verschiedene Möglichkeiten gibt, Wasserstoff innerhalb (und außerhalb) der Landwirtschaft herzustellen und diesen zu nutzen, werden im Folgenden ausgewählte Szenarien erläutert, wie der Einstieg von Wasserstofftechnologien in die Landwirtschaft und Landtechnik in den nächsten Jahren gelingen kann. In drei allgemeinen Szenarien soll dem Leser so zunächst nähergebracht werden, welche Schritte für Landwirte und Unternehmen notwendig sind, damit sich die Eigenerzeugung oder die Nutzung von Wasserstoff bezahlbar macht. Anschließend werden diese allgemeinen Aussagen konkretisiert, um einen Einstieg für einen beispielhaft betrachteten landwirtschaftlichen Hof darzustellen.

Die beiden ersten allgemeinen Szenarien beschäftigen sich mit der Wasserstoffherzeugung und Nutzung auf landwirtschaftlichen Höfen; dies geschieht aus Sicht eines Landwirts. Die Nutzung als Antriebstechnologie für Landmaschinen wird dabei zunächst außen vorgelassen, da diese explizit im dritten Szenario betrachtet wird; dies wird aus der Sichtweise eines Landmaschinenherstellers entwickelt. Anschließend werden die drei Szenarien zusammengefasst und konkretisiert.

#### *3.1 Allgemeines Einstiegsszenario 1: Wasserstoffherzeugung auf dem landwirtschaftlichen Hof*

Wie bereits erläutert, bietet die Landwirtschaft mit ihren vorhandenen Energieerzeugungsanlagen, den weitläufigen Flächen und auch den landwirtschaftlichen Reststoffen ein **enormes Potential für die Erzeugung von Wasserstoff**. Viele landwirtschaftliche

Höfe betreiben bereits große Energieerzeugungsanlagen, die Strom in einer so großen Menge produzieren, dass es für mehr als die eigene Nutzung ausreicht. Zu diesen Erzeugungsanlagen gehören oftmals Biogas-, PV- und Windkraftanlagen. Da die Einspeisung des überschüssigen Stroms nicht mehr so lukrativ ist, werden andere Möglichkeiten der **Stromnutzung** immer begehrt. Eine attraktive Möglichkeit bietet zum Beispiel die Nutzung des **Überschussstroms** über sogenannte **Power-to-X-Technologien**, welche diesen ungenutzten Strom für die Speicherung oder anderweitige Nutzung ermöglichen. Power-to-X beinhaltet unter anderem die **Elektrolyse**, bei welcher Energie benötigt wird (hier in Form von überschüssigem Strom), um Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zu zerlegen. Auf landwirtschaftlichen Höfen mit viel Überschussenergie ist es also durchaus möglich, zukünftig Wasserstoff zu erzeugen. Hierfür müssen interessierte Landwirte allerdings einige Weichen stellen.

So muss zunächst analysiert werden, ob die **richtigen Voraussetzungen** vorhanden sind, um einen Elektrolyseur oder eine andere H<sub>2</sub>-Erzeugungsanlage anzuschaffen und ob eine Erzeugung von Wasserstoff wirtschaftlich sinnvoll ist. Dafür ist es vorab notwendig zu wissen, ob der Wasserstoff hauptsächlich selbst **genutzt oder verkauft** werden soll. Eine hybride Lösung ist auch denkbar. Zudem muss analysiert werden, ob genügend **Energie und Ressourcen** (Wasser, Platz etc.) vorhanden sind. Diesbezüglich bietet Kapitel 3.4 einen Überblick. Sind die ersten Ziele und Bedingungen des Hofes geklärt, muss die **Finanzierung der Anlage** und des Betreibermodells überdacht werden. Vorab sollte jedoch eine **Kosten-Nutzen-Analyse** durchgeführt werden, um herauszufinden, ob sich die Investition sowie der Betrieb einer H<sub>2</sub>-Erzeugungsanlage langfristig lohnt. In diesem Kontext ist vor allem zu

prüfen, wie hoch die eingesparten Kosten durch den erzeugten Wasserstoff sind und ob man diesen womöglich verkaufen kann. Im Anschluss lohnt es sich, Informationen zu **Fördermitteln und Subventionen** einzuholen. Sind diese Grundlagen geklärt, geht es über zur **Planung** und zum **Bau der Anlage**. Hierfür kommen verschiedene Hersteller in Frage (siehe Kapitel 3.4 für Liste möglicher Hersteller) und es muss

geklärt werden, welche Größe sinnvoll ist und ob noch weitere Investitionen für den Betrieb notwendig sind (z.B. in der Infrastruktur). Steht die H<sub>2</sub>-Erzeugungsanlage, kann mit der **Erzeugung** begonnen werden. Nun kann der Wasserstoff entweder selbst genutzt werden (z.B. als Speicher) und/oder verkauft werden.

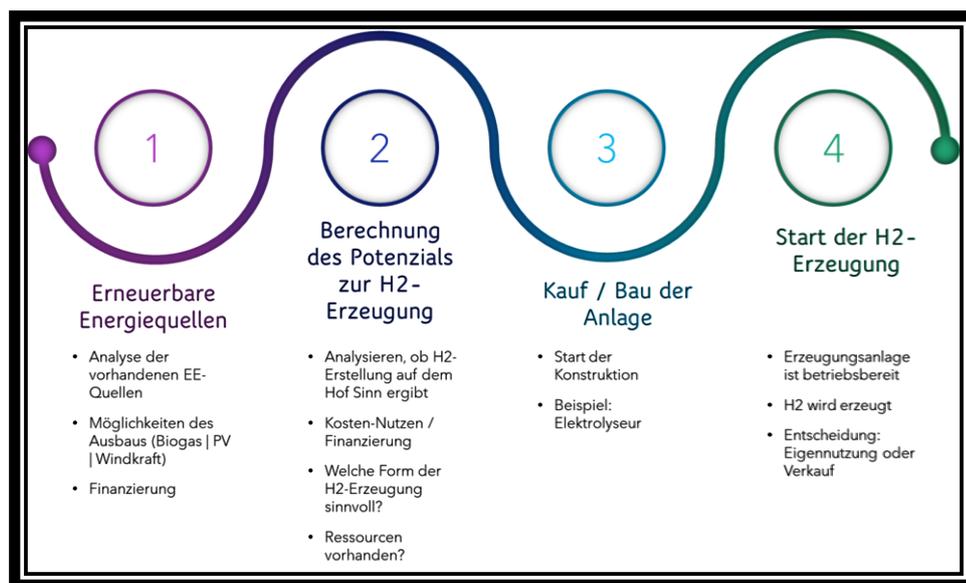


Abbildung 10 - Wasserstoffherzeugung auf dem landwirtschaftlichen Hof

### 3.2 Allgemeines Einstiegsszenario 2: Wasserstoff für die eigene Energieversorgung auf dem Hof

Sobald die Phase erreicht ist, in der ein landwirtschaftlicher Hof seinen eigenen Wasserstoff erzeugt, gibt es **verschiedene Möglichkeiten diesen einzusetzen**. Denn Wasserstoff ist ein flexibler Energieträger, der durch das **Power-to-X-Verfahren** Strom über eine lange Zeit speichern kann. „Im System können Erneuerbare Energien als chemische Energie gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt zum Beispiel mittels Brennstoffzellen wieder in elektrische Energie umgewandelt werden – und das vollkommen emissionsfrei“ (BDEW, 2022). Der eigens erzeugte Wasserstoff kann also als **Speichermedium** dienen, sodass grüner Strom auch zu den Zeiten verfügbar ist, zu denen die

Energieerzeugung keinen Ertrag bringt, beispielsweise an sonnen- oder windarmen Tagen. Zudem kann er als Treibstoff für **H<sub>2</sub>-betriebene Maschinen** genutzt werden. Denkbar ist dies zum Beispiel für Beregnungsmaschinen oder für Fahrzeuge, die für die Agrarlogistik genutzt werden. Die Nutzungsmöglichkeiten in Landmaschinen wird explizit im dritten Einstiegsszenario erläutert. Insgesamt wird eine zunehmende Erzeugung von Wasserstoff auf landwirtschaftlichen Höfen zur Lösung des **Henne-Ei Problems** beitragen. Denn durch eine Erweiterung der H<sub>2</sub>-Infrastruktur, wird es wahrscheinlicher, dass zukünftig mehr **nutzbare Wasserstofftechnologien** (wie z.B. Landmaschinen) entwickelt werden. Landwirte, die eigenen Wasserstoff erzeugen sollten unter anderem folgende

Themen in ihre Entscheidungen einfließen lassen:

Zunächst muss die **Ausgangslage** erörtert werden, indem z.B. die **Auslastung der Erzeugungsanlage** und somit die **Effizienz** analysiert wird. Auch die **Kosten für Investitionen und Betrieb** der Anlage sollten berücksichtigt werden, um Nutzungs- oder Verkaufsmöglichkeiten zu bestimmen. In beiden Fällen – Verkauf und

auch Eigennutzung – ist es wichtig zu analysieren, **welche Technologien und Infrastrukturen notwendig** und vielleicht schon vorhanden sind. Außerdem ist auch hier wieder eine **Kosten-Nutzen-Analyse** sinnvoll, um zu entscheiden ob und wie viel Wasserstoff man selbst nutzen oder verkaufen möchte. Es kann auch sinnvoll sein, **flexibel auf veränderte Bedingungen zu reagieren** (beispielsweise erhöhte Energiekosten oder neue Technologien).

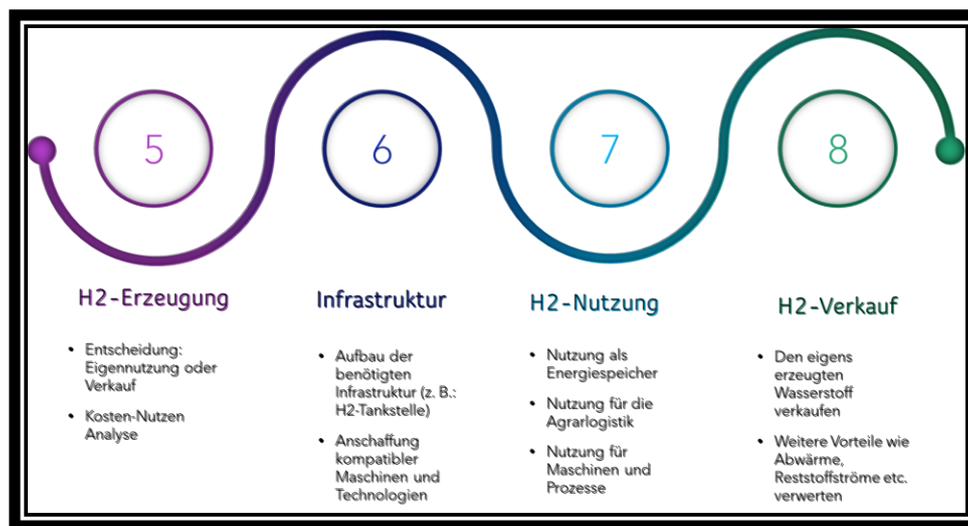


Abbildung 11 – Wasserstoff für die Energieversorgung auf dem Hof

### 3.3 Allgemeines Einstiegsszenario 3: Wasserstoff als Antriebstechnologie für die Landmaschinen nutzen

Betrachtet man nun die Lage aus Sicht der **Landtechnikunternehmen**, welche zukünftig H2-betriebene Landmaschinen entwickeln und vertreiben können, stellt man fest, dass sowohl bei Unternehmen als auch bei Landwirten noch große Unsicherheit hinsichtlich der zukünftig dominierenden Antriebstechnologie von Landmaschinen herrscht. Daher muss ein Unternehmen zunächst einmal für sich anhand seiner Bedarfe **entscheiden, welche Antriebstechnologie** man in den nächsten Jahren verfolgen möchte. Hier spielt vor allem das **Leistungsspektrum** der entsprechenden Maschinen eine große Rolle. Dabei muss realistisch eingeschätzt werden, für welche Maschinen und in

welchem Leistungsspektrum ein Wasserstoffantrieb sinnvoll ist. Erste Schätzungen belaufen sich aufgrund einer begrenzten Energiedichte auf einen **sinnvollen Leistungsbereich zwischen 75 kW und 150 kW**. Allerdings bringt nur ein stärkerer **Austausch zwischen Landtechnikunternehmen und Landwirten** Klarheit. Denn letztendlich entscheiden die Landwirte, welche Maschinen sie kaufen und nutzen. Für diesen Austausch ist es wichtig, Themen wie die **Versorgung von Landwirten mit Wasserstoff** (eigene Erzeugung vs. H2-Kauf) und auch die **logistischen Infrastrukturen** anzusprechen. Die Logistik spielt in diesem Kontext eine besondere Rolle, da viele Landmaschinen eine **mobile Lösung für die Betankung** benötigen. So muss zwischen allen

beteiligten Akteuren der Konsens bestehen, dass nur ein stetiger **Ausbau der vorhandenen Erzeugungs-, Transport- und Speicherinfrastruktur** – unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Besonderheiten – zu einer erfolgreichen Zukunft vom H2-Antrieb in Landmaschinen führen kann. Auch ein Austausch mit **Politik, Forschung und Fördermittelgebern** ist diesbezüglich sinnvoll, denn es sind noch viele weitere Schritte in der **Forschung und**

**Entwicklung** notwendig, um schließlich erste H2-betriebene Landmaschinen herzustellen. So können zunächst Prototypen und Kleinserien entstehen, welche durch Einsatz und Analysen weiter verbessert werden können. Anschließend können **Standardisierungen** zu niedrigeren Kosten in der Entwicklung führen. Ist dieser Status erreicht, rückt die perspektivische Serienentwicklung in den Fokus.

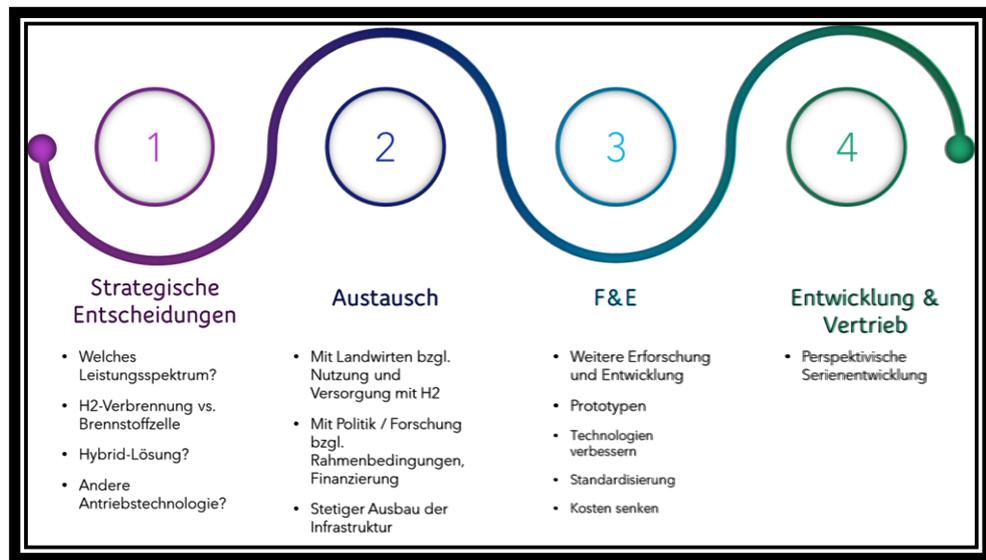


Abbildung 12 - Wasserstoff in der landtechnischen Antriebstechnologie

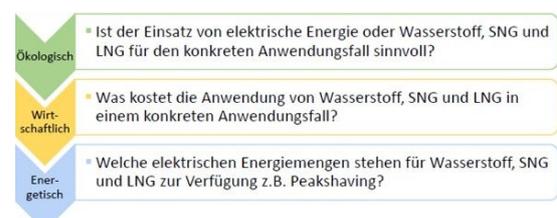
### 3.4 Konkrete erste Schritte für den Landwirtschaftlichen Betrieb

Da es diverse landwirtschaftliche Höfe mit unterschiedlichen Ausgangssituationen gibt, ist es schwierig allgemeine Handlungsempfehlungen bezüglich konkreter Schritte hin zu einer eigenen H2-Erzeugung (hier explizit für Elektrolyseure) zu entwerfen. Es gibt allerdings einige projektspezifische Dienstleistungen und Programme, die diese Schritte erleichtern und im Folgenden erklärt werden.

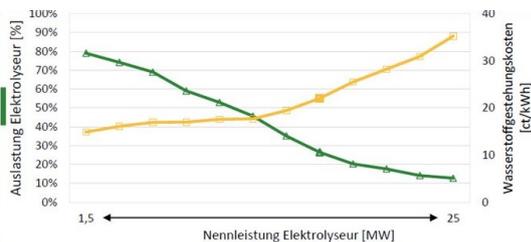
#### 1. Analysetool für H2-Erzeugung

Es existiert zum Beispiel das Power-to-Gas Simulationstool der EnergieSynergie GmbH, mit welchem eine ökologische,

wirtschaftliche und energetische Analyse zur Erzeugung von Wasserstoff in Kombination mit erneuerbaren Energieanlagen ermöglicht wird. Dieses Tool bietet eine gute Ausgangsposition, um die Anforderungen eines konkreten Wasserstoffprojekts zu untersuchen. Die Simulation verfolgt dabei ökologische, wirtschaftliche und energetische Ziele, um die gesamte Elektrolyse eines beliebigen Standorts automatisiert zu simulieren:



In der Simulation werden sowohl die erneuerbaren Energieanlagen als auch die projektspezifische Berechnung der Wasserstoffherzeugung betrachtet. Für die Energieerzeugung können dabei SCADA-Daten, Stromgestehungskosten, CO<sub>2</sub>-Emissionen und auch Wetterdaten genutzt werden. Somit kann berechnet werden, wie viel Wasserstoff hergestellt werden kann, wie hoch die Auslastung eines Elektrolyseurs wäre und wie hoch die Wasserstoffgestehungskosten aussehen können. Auch die Berechnung des CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionspotentials durch den Einsatz von Wasserstoff ist möglich. Zur Veranschaulichung hier ein Beispiel für die Betrachtung der Auslastung eines Elektrolyseurs in Kombination mit den Wasserstoffgestehungskosten (größere Nennleistung des Elektrolyseurs = geringere Auslastung und höhere Wasserstoffgestehungskosten):



Insgesamt kann mit dem Simulationstool auch die komplette Wertschöpfungskette betrachtet und analysiert werden (EnergieSynergie GmbH, 2023). Das Tool stellt einen optimalen Einstiegspunkt für interessierte Landwirte da, um die Potentiale einer eigenen Energie- und Wasserstoffherzeugung zu berechnen.

Das PtG-Tool wird im Rahmen des Forschungsprojektes H<sub>2</sub>-FEE aktuell weiterentwickelt. Ziel von H<sub>2</sub>-FEE (Flexible Energieträger für die Energiewende: Open-WebGIS zur digitalen Analyse von PtG-Potentialen an dezentralen Energiestandorten in Deutschland am Beispiel von Niedersachsen) ist die Etablierung einer transparenten Plattform zur Identifikation

von günstigen und naturverträglichen Standorten für die Wasserstoffproduktion auf Basis von EE-Anlagen (Onshore-Windenergie sowie Photovoltaik) insbesondere in Regionen mit hoher Bioenergie-Dichte sowie die Entwicklung von Geschäftsmodellen – unter anderem für die Landwirtschaft. Mehr Informationen finden Sie unter folgendem Link: <https://www.energiesynergie.de/flyer-ptg-tool/>

## 2. Fördermittel generieren

Sobald die Analyse abgeschlossen ist und festgestellt wurde, ob ein Elektrolyseur sinnvoll ist und welche Weichen gestellt werden müssen, um diesen aufzustellen und zu betreiben, tritt die Finanzierung des Projektes in den Vordergrund. Diesbezüglich gibt es zahlreiche Förderprogramme. PTJ Jülich fördert zum Beispiel die Investitionsausgaben zur Errichtung von Elektrolyseanlagen mit einer elektrischen Gesamtmindestleistung von 250 KW. Voraussetzung ist allerdings ein Bezug zum Verkehrsbereich, welcher in der Landwirtschaft über die Agrarlogistik erfolgen könnte. Die Deutsche IHK listet weitere Förderprogramme auf: [Wasserstoff-Förderprogramme im Überblick](#)

## 3. Bau der Elektrolyseanlage

Für den Bau der Elektrolyseanlage kommen verschiedene Dienstleister in Frage. Diesbezüglich hat C.A.R.M.E.N. e.V. im Jahr 2021 eine Marktstudie veröffentlicht, die verschiedene Hersteller von Elektrolyseanlagen betrachten. Diese sind:

- AVX/KUMATEC Hydrogen
- Elogen
- Enapter
- Green-H2-systems
- iph Hähn
- Hiatt
- Hoeller Electrolyzer
- H-TEC Systems
- Hydrogenics

- ITM Power
- McPhy Energy
- Ostermeier Hydrogen Solutions
- PlugPower
- Siemens Energy
- Sunfire
- Thyssenkrupp Uhde Chlorine Engineers

In der Marktübersicht sind die Elektrolyseure (Produkte) von jedem dieser Unternehmen aufgelistet und an Hand verschiedener Kategorien erklärt. Hierzu gehören zum Beispiel die Elektrolyseart, die verschiedenen Daten zur Leistung und Spannung, die Stromart, der Flächenbedarf, der Personalbedarf, die Möglichkeit der Wasseraufbereitung, die Wasserstoffmenge etc. Diese Übersicht ist eine große Hilfe, um den richtigen Elektrolyseur zu finden. Hier kann die komplette Liste eingesehen werden: [https://www.carmen-ev.de/wp-content/uploads/2022/06/Marktuebersicht-Elektrolyseure\\_2022-07.pdf](https://www.carmen-ev.de/wp-content/uploads/2022/06/Marktuebersicht-Elektrolyseure_2022-07.pdf)

### *3.5 Konkretes Einstiegsszenario für beispielhaften Milchviehbetrieb*

Aufbauend auf den Recherche-Ergebnissen werden insbesondere Milchviehbetriebe und Schweinemastbetriebe betrachtet, um deren potentielle Möglichkeiten zur Wasserstoffherzeugung und -nutzung aufzuzeigen. Hierfür werden ein durchschnittlicher Milchvieh- sowie ein durchschnittlicher Schweinemastbetrieb als Grundlage genutzt. Da bei einem durchschnittlichen Schweinemastbetrieb das geschätzte Potential für Solarenergieerzeugung bei ca. 95.000 kWh pro Jahr liegt und laut einer Studie der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (2012) ein solcher Betrieb einen ungefähren Stromverbrauch von 142.500 kWh pro Jahr hat, würde hier der Stromverbrauch von der eigenen Erzeugung nicht gedeckt werden. Es existiert also ohne weitere Erzeugungsanlagen kein

überschüssiger Strom, der für die H<sub>2</sub>-Erzeugung genutzt werden kann. Daher wird das Beispiel eines Milchviehbetriebes genauer betrachtet; vor allem wie der dezentral erzeugte Strom für die Wasserstoffherzeugung genutzt werden kann. Unter anderem sollen somit erste Erkenntnisse gewonnen werden, wie viel Wasserstoff aus überschüssigem Strom mittels eines Elektrolyseurs erzeugt werden kann, wie viel Wasser hierfür benötigt wird, wie die Nutzungsmöglichkeiten aussehen und welche ersten Erkenntnisse sich über die Wirtschaftlichkeit sagen lassen.

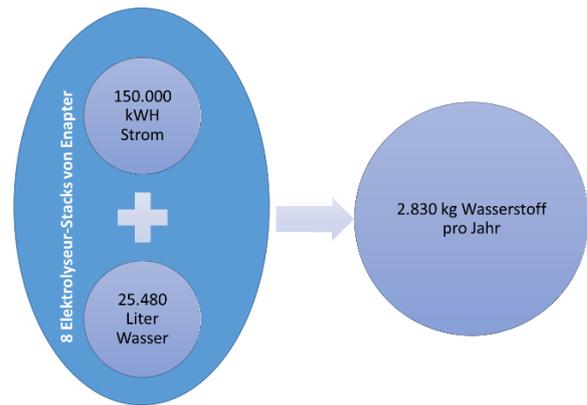
#### 1. Milchviehbetrieb – Potentiale durch PV von Stalldächern

Wie in der Recherche bereits beschrieben, ist es schwierig allgemeine Aussagen über Milchviehbetriebe zu treffen. Aber da 62,9% aller Milchviehbetriebe der Region eine Anzahl von 50 bis 199 Milchkühen haben, wird ein beispielhafter Betrieb in der Größenordnung von ca. 150 Milchkühen als Referenz für die folgenden Rechnungen und Beschreibungen gewählt. Ein solcher Hof hat die Möglichkeit eine etwa 227 kWp große PV-Anlage auf die vorhandenen Stalldächer zu platzieren. In dieser Größenordnung gibt es in Niedersachsen 2402 Betriebe. Die folgende Rechnung ist also für mehrere Landwirte aus der unmittelbaren Region relevant.

Wir gehen nun also davon aus, dass der beispielhaft betrachtete Hof eine 227 kWp PV-Anlage besitzt und somit ca. 227.000 kWh pro Jahr erzeugen kann. Laut einer Studie („Stromverbrauch und Energieeffizienz in der Tierhaltung“) der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (2012) hat ein Betrieb pro Milchvieh einen Energieverbrauch von 454 kWh/Jahr. Der geschätzte Energieverbrauch beträgt für einen Betrieb mit einer Milchvieh-Anzahl von 150 also 68.100 kWh pro Jahr. Wenn dieser Verbrauch nun mit dem eigens erzeugten

PV-Strom gedeckt wird, gibt es einen Strom-Überschuss von 158.900 kWh pro Jahr. Für die weitere Rechnung wird davon ausgegangen, dass hiervon 150.000 kWh pro Jahr für die Elektrolyse von grünem Wasserstoff genutzt werden kann. Hierbei wird auch berücksichtigt, dass ein durchschnittlicher Haushalt noch von dem übrigen Strom versorgt werden kann (durchschnittlicher Stromverbrauch in einem 4-Personen Haushalt liegt zwischen 2.600 und 5.000 kWh).

Da für die Erzeugung von 1 kg Wasserstoff laut GASAG (2022) 53 kWh Strom notwendig sind, könnte der beispielhafte Milchvieh-Betrieb in einem Jahr ca. 2.830 kg Wasserstoff erzeugen. Für diese Erzeugung würden insgesamt 25.470 Liter Wasser benötigt. Um diese Elektrolyse-Dimensionen zu erreichen, gibt es die Möglichkeit kleinere Elektrolyseure (Stacks) per Plug & Play aneinanderzureihen und so zu skalieren. Das Unternehmen Enapter bietet zum Beispiel den modularen Elektrolyseur EL 4.0 an, der pro Tag 1.0785 kg Wasserstoff erzeugen kann. Bei 365 Tagen im Jahr ermöglicht ein Stack also eine Wasserstoffherzeugung von ca. 394 kg Wasserstoff. Um die 2.830 kg Wasserstoff erzeugen zu können, werden daher 8 Stacks benötigt. Ein Stack ist dabei 38 kg schwer (ohne Wasser) und hat folgende Maße: 482 mm x 635 mm x 266 mm (B x T x H). Die Errichtung eines Elektrolyseurs bedarf einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung und unterliegt im Einzelfall möglicherweise noch weiteren Anforderungen; daher sollte ein erfahrener Partner bei der Planung eingebunden werden.



Mit 1 kg Wasserstoff kann ein Brennstoffzellenauto ungefähr 100 km zurücklegen. Mithilfe der erzeugten Wasserstoffmengen könnten betankte Brennstoffzellenautos also ca. 283.000 km fahren. Schaut man auf Landmaschinen, die mit Wasserstoff betrieben werden, gibt es nur wenige Prototypen und noch weniger handfeste Zahlen. Der NH2-Traktor von New Holland soll aber ein Tank-Fassungsvermögen von 8,2 kg Wasserstoff und ein Leistungsvermögen von 100 kW aufweisen. Unser betrachteter Beispielbetrieb könnte demnach pro Jahr ca. 345 Tankvorgänge eines solchen Traktors stemmen. Die Betriebsdauer dieses H2-Schleppers liegt bei 3 Stunden, danach muss neu getankt werden. Es wird allerdings nicht erläutert, welche Arbeiten in diesen 3 Stunden mit dem Schlepper verrichtet werden können. Neben der persönlichen Nutzung könnte der Wasserstoff auch über eine eigene H2-Tankstelle oder die eines Partners verkauft werden. Der Preis für den Endkunden beträgt hier ca. 9,50€ pro kg Wasserstoff. Für den gesamt erzeugten Wasserstoff (2.830 kg) wäre der Preis also bei 26.885€. Dies ist allerdings eine sehr rudimentäre Rechnung, die z.B. Lieferketten außen vor lässt. Auch die Rückverstromung des hergestellten Wasserstoffs ist möglich. Laut der Bundesnetzagentur lässt sich daraus durch niedrigere Wirkungsgrade allerdings nur 42% Strom zurückgewinnen. Dies wäre für das betrachtete Beispiel ein nutzbarer Strom von ca. 1.189 kWh pro Jahr. Auch

wenn dies einen erheblichen Energieverlust darstellt, könnte es für einzelne Höfe mit schwankender Energieerzeugung und -nutzung von Vorteil sein, einen solchen Speicher zu nutzen.

Um einen Ansatz zur Kreislaufwirtschaft einzubringen, gibt es die Idee in Zukunft auch Milchsammelfahrzeuge mit Wasserstoff anzutreiben. Solche Fahrzeuge holen die Rohmilch in regelmäßigen Abständen von den Betrieben ab und bringen sie zur Molkerei. Friesland Campina nahm 2021 bereits den ersten wasserstoffbetriebenen 50-Tonnen-Milchsammelwagen in Betrieb. Zukünftig könnten weitere H<sub>2</sub>-betriebene Milchsammelfahrzeuge mit dem von Milchviehbetrieben erzeugten Wasserstoff betankt werden, um so energetische Ströme besser zu nutzen.

Zur Wirtschaftlichkeit lässt aufgrund diverser Einflussfaktoren im Moment nur wenig sagen. Die maßgeblichen Kosten hängen davon ab, ob der selbst genutzt oder verkauft wird (und wenn ja, zu welchem Preis) und wie hoch die Investitions- und Laufkosten sind. Allerdings weist die „Studie zum Nutzen kleiner, dezentraler Elektrolyseure“ vom Reiner Lemoine Institut (2022) darauf hin, dass sich die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit dezentraler Elektrolyseure erheblich erhöht, wenn auch die Nebenprodukte Sauerstoff und Wärme genutzt werden. Hierfür bieten sich in der Landwirtschaft mehrere Prozesse an (z.B. Gewächshäuser, Hackschnitzeltrocknung). Zudem sind langfristige Liefer- und Abnahmeverträge von Vorteil, um die Wirtschaftlichkeit zu berechnen.

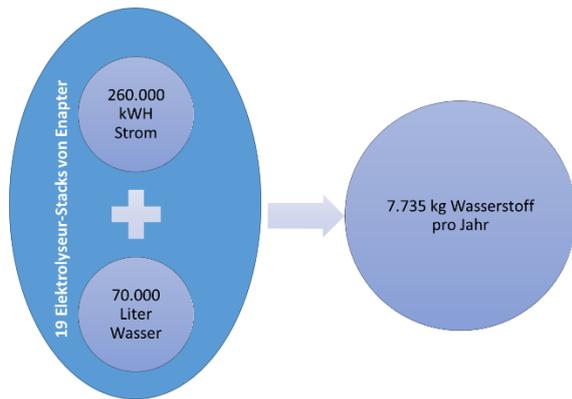
Für das hier beschriebene Beispiel sind noch keine anderweitigen Stromquellen wie Biogasanlagen, Windkraftanlagen oder das Stromnetz einbezogen. Die Zahlen der Wasserstoff-Erzeugung könnten bei

Hinzunahme dieser Quellen also von der Menge noch nach oben skaliert werden.

## 2. Landwirt als Energiewirt

Als möglichen zusätzliche Energieerzeugungsquellen kommen perspektivisch vor allem Biogasanlagen und Freiflächen-PV Anlagen (Agri-PV) in Frage. Das Thema Agri-PV nimmt zwar eine immer größere Rolle ein, allerdings gibt es noch nicht genug Daten für beispielhafte Rechnungen. Daher wird hier nur eine Biogasanlage in die weitere Betrachtung einbezogen. Nehmen wir nun an, dass der oben beschriebene Milchviehbetrieb neben der PV-Anlage des Stalldachs auch eine Biogasanlage betreiben würde, wird die Rechnung wie folgt angepasst:

Laut einem Bericht von EPS BHKW GmbH (2023) kann ein Betrieb mit 350 Milchkühen pro Jahr rund 605.000 kWh Strom aus einer Gülle-Biogasanlage gewinnen. Für unser Beispiel eines Betriebs mit 150 Milchkühen würde dies ein ungefähres Potential von 260.000 kWh pro Jahr durch eine Gülle-Biogasanlage bedeuten. Da für die Erzeugung von 1 kg Wasserstoff laut GASAG (2022) 53 kWh Strom notwendig sind, könnte durch diese Energie ca. 4.905 kg Wasserstoff hergestellt und genutzt/verkauft werden. Zusammen mit einer Stalldach-PV-Anlage könnten also 7.735 kg Wasserstoff erzeugt werden. Um diese Dimensionen der Wasserstoffherzeugung mit dem modularen Elektrolyseur EL 4.0 von Enapter stemmen zu können, müssten 19 Stacks kombiniert werden und es wären ca. 70.000 Liter Wasser pro Jahr nötig.



Wenn der erzeugte Wasserstoff verkauft wird, könnte ein Umsatz von ungefähr 73.480 € pro Jahr erreicht werden. Bei eigener Nutzung könnte beispielsweise der

NH2-Traktor von New Holland ungefähr 943 mal vollgetankt werden. Über eine mögliche Rückverstromung könnten etwa 3.250 kWh pro Jahr gespeichert werden. Dieses Beispiel zeigt also deutlich auf, dass das Potential der Wasserstoffherzeugung mit zusätzlichen Energiequellen deutlich gesteigert werden kann. Zukünftig sollten Forschungsprojekte auch die Potentiale von Agri-PV oder dezentralen Windanlagen auf landwirtschaftlichen Höfen einbeziehen.

## IV. Literaturverzeichnis

ADAC (2021): Wasserstoffautos: Technik, Modelle, Tests, Tankstellen. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/wasserstoffauto-so-funktioniert-es/>, zuletzt aktualisiert am 09.09.2021, zuletzt geprüft am 21.09.2021.

AMBARtec AG (2021): HyCS Technologie. Online verfügbar unter <https://www.ambartec.de/technologie/>

Apostolou, D.; Xydis, G. (2019): A literature review on hydrogen refuelling stations and infrastructure. Current status and future prospects. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 113, 109292., S. 1–14. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109292>.

Bauhof-Online (2009): New Holland präsentiert Wasserstoff-Traktor. <https://www.bauhof-online.de/d/new-holland-praesentiert-wasserstoff-traktor/>

Behrens, R. (2021): Treibstoffe - Die Wasserspalter setzen auf grüne Energieträger. Tagesspiegel: <https://adlershof.tagesspiegel.de/die-wasserspalter-setzen-auf-gruene-energetraeger-38870>

BDEW (2022): Wasserstoff als Allround-Talent: Wo wird er eingesetzt?, Online verfügbar unter: <https://www.bdew.de/energie/wasserstoff/wasserstoff-als-allround-talent-wo-wird-er-eingesetzt/>

BMBF (2021): Nationale Wasserstoffstrategie. Online verfügbar unter [https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie\\_node.html](https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie_node.html), zuletzt geprüft am 08.09.2021.

BMWi (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie; [https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie\\_node.html](https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie_node.html)

BMWi (2021): Wasserstoff: Schlüsselement für die Energiewende. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html>, zuletzt geprüft am 08.09.2021.

Brinner, A. (2013): Electrolyse – Basics III. Funktionsprinzip der Elektrolyse. Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2021a): Flexible Herstellung: Wie wird Wasserstoff erzeugt? Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/energie/wasserstoff/flexible-herstellung-was-ist-wasserstoff-und-wie-wird-er-erzeugt/>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2021b): Wasserstoff in der Praxis - Anwendungen in der Energiewirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/energie/wasserstoff/wasserstoff-der-anwendung/>, zuletzt aktualisiert am 17.03.2021, zuletzt geprüft am 08.09.2021.

Carrette, L., Friedrich, K. A., Stimming, U. (2001): Fuel Cells – Fundamentals and Applications, Fuel Cells, 1(1)5-39

CEC Haren (2021): Grüner Wasserstoff für die Landwirtschaft. <https://cec-haren.de/gruener-wasserstoff-fuer-die-landwirtschaft/>

DLR (2020): Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende, Link: <https://www.dlr.de/content/de/downloads/publikationen/broschueren/2020/wasserstoffstudie-teil-1.pdf>

Eberle, U.; Felderhoff, M.; Schüth, F. (2009): Chemische und physikalische Lösungen für die Speicherung von Wasserstoff. In: *Angewandte Chemie* 121 (36), S. 6732–6757.

EMCEL GmbH (2019): Welche Möglichkeiten der Wasserstoffspeicherung gibt es? Online verfügbar unter <https://emcel.com/de/wasserstoffspeicherung/>, zuletzt aktualisiert am 16.12.2019, zuletzt geprüft am 30.09.2021.

EnergieSynergie GmbH (2023): PtG Simulationstool - zur ökologischen, wirtschaftlichen und energetischen Analyse zur Erzeugung von Wasserstoff. <https://www.energiesynergie.de/leistungen/>

ENBW (2021): Grün, blau, türkis... das bedeuten die Wasserstoff-Farben. [https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/wasserstoff-farben.html?gclid=Cj0KCQiAiJSeBhCCARIsAHnAzT9QuQVQOa08hjy6bBV1zNHLVY5ya3e0JwMoAXmPNox8yBlBwjyx-YUaAiMVEALw\\_wcB](https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/wasserstoff-farben.html?gclid=Cj0KCQiAiJSeBhCCARIsAHnAzT9QuQVQOa08hjy6bBV1zNHLVY5ya3e0JwMoAXmPNox8yBlBwjyx-YUaAiMVEALw_wcB)

EWE (2021): Wasserstoff – Langzeitspeicher für erneuerbare Energien. Online verfügbar unter <https://www.ewe.com/de/zukunft-gestalten/wasserstoff>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.

Fonseca, J. D.; Camargo, M.; Commenge, J. M.; Falk, L.; Gil, I. D. (2019): Trends in design of distributed energy systems using hydrogen as energy vector: A systematic literature review. In: *International journal of hydrogen energy* 44 (19), S. 9486–9504.

Forschungszentrum Jülich (2021): Wasserstoff-Forschung. Online verfügbar unter [https://www.fz-juelich.de/portal/DE/Forschung/EnergieUmwelt/wasserstoff/\\_node.html](https://www.fz-juelich.de/portal/DE/Forschung/EnergieUmwelt/wasserstoff/_node.html), zuletzt geprüft am 08.09.2021.

Ghaib, K. (2017): Das Power-to-Methane-Konzept – Von den Grundlagen zum gesamten System. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Graforce GmbH (2020). Methan-Plasmalyse. <https://www.graforce.com/technologien/methan-plasmalyse>

Helms, H.; Heidt, C. (2014): Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungsoptionen für den Bestand. In: *Institut für Energie- und Umweltforschung. Im Auftrag des Umweltbundesamtes*. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_24\\_2014\\_erarbeitung\\_eines\\_konzepts\\_zur\\_minderung\\_der\\_umweltbelastung\\_aus\\_nrmm.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_24_2014_erarbeitung_eines_konzepts_zur_minderung_der_umweltbelastung_aus_nrmm.pdf).

Hill, T.; Westbrook, R. (1997). SWOT analysis: it's time for a product recall. *Long range planning*, 30(1), 46-52, London.

Klell, Manfred; Eichseder, Helmut; Trattner, Alexander (2018): Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (ATZ/MTZ-Fachbuch).

- Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie GmbH (2017): Nullemissionsnutzfahrzeuge - Vom ökologischen Hoffnungsträger zur ökonomischen Alternative. Online verfügbar unter <https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/NFZ-Studie.pdf>, zuletzt geprüft am 24.09.2021.
- McDowall, W.; Eames, M. (2006): Forecasts, scenarios, visions, backcasts and roadmaps to the hydrogen economy: A review of the hydrogen futures literature. In: *Energy policy* 34 (11), 1236-1250.
- Metropolregion Nordwest (2021): Wasserstoffstrategie der Metropolregion Nordwest, Link: <https://www.metropolregion-nordwest.de/portal/seiten/wasserstoffregion-nordwest-900000215-10018.html>
- Motorsport Total (2021): Deutz Wasserstoffmotor ab 2024 in Serie. <https://www.motorsport-total.com/auto/news/deutz-wasserstoff-motor-ab-2024-in-serie-21082802>
- Pichlmaier, S.; Hübner, T.; Kigle, S. (2019): Elektrolyse – Die Schlüsseltechnologie für Power-to-X. Link: <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/elektrolyse-die-schluesselftechnologie-fuer-power-to-x/>
- Pickering, C.; Grignon, J.; Steven, R. et al. (2015): “Publishing not perishing: How research students transition from novice to knowledgeable using systematic quantitative literature reviews,” *Studies in Higher Education*, 40 (10), pp. 1756–1769.
- Pickton, David/ Wright, Sheila (1998): What’s swot in strategic analysis?, in: *strategic change*, Jg.7, S. 101-109
- PTJ (2023): Aufruf zur Antragseinreichung zur Förderung von Elektrolyseanlagen zur Wasserstoffherstellung. [https://www.ptj.de/projektfoerderung/nip/elektrolyseure\\_2020](https://www.ptj.de/projektfoerderung/nip/elektrolyseure_2020)
- Radtke, J. (2021): Die Verkehrswende: Elektromobilität, Wasserstoff und Radverkehr als Fortschritt? In: *Die Nachhaltigkeitstransformation in Deutschland*, S. 23–27.
- Schmidt, T. (2020): Wasserstofftechnik. Grundlagen, Systeme, Anwendung, Wirtschaft. München: Hanser (Hanser eLibrary). Online verfügbar unter <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446465992>.
- Schwaderlapp, M. (2017): Dekarbonisierung in der Landwirtschaft. In: *ATZoffhighway* 10 (4), S. 90.
- Schweizer Bauer (2020): Autonomer Hightech-Traktor aus China. <https://www.schweizerbauer.ch/landtechnik/neuheiten/autonomer-hightech-traktor-aus-china/>
- Smolinka, T.; Günther, M.; Garcke, J. (2010): „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien“. Fraunhofer ISE
- Xinyu Liu et al, Direct injection of hydrogen main fuel and diesel pilot fuel in a retrofitted single-cylinder compression ignition engine, *International Journal of Hydrogen Energy* (2022). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.149