

# WASSERSTOFFREGION MARBURG-BIEDENKOPF



HyStarter-Konzept

**Landkreis Marburg-Biedenkopf**

LANDKREIS



 **MARBURG  
BIEDENKOPF**

**MARBURG**   
UNIVERSITÄTSSTADT

**STADTWERKE  MARBURG**



Beauftragt durch:



Vergabe und Projektbegleitung durch:



# Impressum

## Herausgeber

LANDKREIS



 **MARBURG  
BIEDENKOPF**

Landkreis Marburg-Biedenkopf

Herrmann-Jacobsohn-Weg 1

35039 Marburg

**MARBURG**  
UNIVERSITÄTSSTADT 

Universitätsstadt Marburg

Am Markt 1

35037 Marburg

**STADTWERKE  MARBURG**

Stadtwere Marburg GmbH

Am Krekel 55

35039 Marburg

## Projektleitung

Landkreis Marburg-Biedenkopf

Fachdienst Klimaschutz und Erneuerbare Energien

Stefan Franke ([frankes@marburg-biedenkopf.de](mailto:frankes@marburg-biedenkopf.de))

## Verantwortlich für den Inhalt

**SPILETT**   
new technologies

Spilett new technologies GmbH

Schöneberger Str. 18, 10963 Berlin

<https://www.spilett.de>

## Autoren

Martin Hellwig und Henner Weithöner (Spilett new technologies GmbH)

*Unter Mitarbeit von:*

Dr. Frank Koch und Frederik Budschun (EE ENERGY ENGINEERS GmbH)

Ciara Dunks und Tim Röpcke (Reiner Lemoine Institut)

Nikolas Beneke, Dr. Hanno Butsch, Shaun Pick, Fabian Rottmann und David Siegler (Becker Büttner Held Consulting AG)

## **Titelbild**

© BMVI / grafische Gestaltung David Borgwardt (Spilett new technologies GmbH)

## **Layout**

Stadtwerke Marburg GmbH, Am Krekel 55, 35039 Marburg

## **Druck**

Stadtwerke Marburg GmbH, Am Krekel 55, 35039 Marburg

Stand: September 2021

Die Strategiedialoge zu HyStarter wurden beauftragt im Rahmen des HyLand-Programms durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), koordiniert durch die NOW GmbH



Beauftragt durch:



Bundesministerium  
für Verkehr und  
digitale Infrastruktur

Vergabe und Projektbegleitung durch:



# 1. Grußworte

## 1.1. Grußwort der Landrätin

Sehr geehrte Damen und Herren,

als eine von nur neun Regionen in ganz Deutschland und als einzige Region in Hessen wurde der Landkreis Marburg-Biedenkopf mit der Universitätsstadt Marburg und den Stadtwerken Marburg vom Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur als HyStarter-Wasserstoffmodellregion ausgewählt. Gemeinsam mit diesen Partnern und einem Netzwerk, von über 60 Akteur\*innen, wie Hochschulen, öffentlichen Institutionen und einer Vielzahl heimischer Firmen wurde das Projekt gestartet. Ziel war es, konkrete Ideen für die klimafreundliche Wasserstoffproduktion zu entwickeln, diesen Energieträger in vielfältiger Art zu nutzen und die Technologie aus unserer Region heraus weiterzuentwickeln.

Wir sind überzeugt, dass Wasserstoff ein wesentlicher Baustein für die Energiewende ist, den Klimaschutz voran bringt und dass er die vielfältigen Klimaschutzaktivitäten des Landkreises sinnvoll ergänzt. Wasserstoff lässt sich gut speichern, transportieren, ist in der Anwendung CO<sub>2</sub>-frei und eignet sich beispielsweise ideal für die Industrie und den Mobilitätssektor.

Wasserstoff hat auch das Potential einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der regionalen Wertschöpfung zu leisten, indem regional hergestellter Wasserstoff auch direkt wieder in der heimischen Industrie eingesetzt wird. So trägt er maßgeblich dazu bei, den Anteil importierter fossiler Energieträger zu reduzieren. Und das im Idealfall klimaneutral, auf Grundlage einer „grünen“ Wasserstoffwirtschaft, die mithilfe von regionalem Strom aus Erneuerbaren Energien und mittels alternativer Verfahren, Wasserstoff erzeugt.

Das Potential von Wasserstoff ist enorm. Im Rahmen des HyStarter Projekts machen wir dieses Potential sichtbar und schaffen damit die Grundlage, um unseren Landkreis für diese Zukunftstechnologie weiter zu entwickeln. Die Wasserstofftechnologie leistet außerdem einen Beitrag zum Transformationsprozess unserer Autozulieferindustrie. Daneben integrieren wir das Thema Wasserstoff in die Bereiche Bildung und Wissenschaft. Beispielhaft stehen dafür ein Wasserstoffworkshop für Schüler\*innen im Chemikum Marburg und ein Pixi Wissen Heft über Wasserstoff.

Aufbauend auf der Initiative von HyStarter wird der Landkreis auch nach Abschluss des Projektes eine regionale heimische Wasserstoffwirtschaft als Impulsgeber, Moderator und Partner aufbauen und weiter voran bringen. Darin sehen wir sinnvolle Beiträge zum Gelingen einer nachhaltigen Energiewende und zur Zukunftsfähigkeit unserer Region.

Ihre

Kirsten Fründt

Landrätin

## 1.2. Grußwort des Oberbürgermeisters

Die Geschehnisse der vergangenen Wochen haben uns deutlich vor Augen geführt, dass die Klimakrise schon jetzt dramatische Folgen zeigt. Klar ist: es gibt keine Alternative zu einem vollständigen Umstieg auf regenerative, klimaneutrale Energie.

Deshalb haben wir darauf gedrängt, dass Marburg-Biedenkopf Wasserstoffregion wird. Sie ist eine von neun Regionen in Deutschland und die erste Region in Hessen. Damit erreichen wir einen wichtigen Schritt auf dem Weg zur Klimaneutralität 2030.

Die Stadt Marburg betreibt seit vielen Jahren eine Kompostierungsanlage in Marburg Cyriaxweimar, mit der hervorragender, biolandfähiger Kompost hergestellt wird.

Seit 2010 ist dort eine Biogasanlage vorgeschaltet, um Methangas zu gewinnen. Somit kann regenerativer Strom, z.B. aus Windkraftwerken, die aus der EEG- Richtlinie herausgefallen sind, verwendet werden, um daraus mittels eines Elektrolyseurs Wasserstoff direkt an der Biogasanlage zu produzieren.

Der auf diesem Weg entstandene Wasserstoff kann in die Gasproduktion eingespeist werden, das wiederum ermöglicht z.B. den Betrieb eines Blockkraftwerks.

Damit erreichen wir letztendlich eine höhere Effizienz und wir gewinnen zusätzliche klimaneutrale Energie auf dem Weg zu einer klimaneutralen Stadt.

Mit dem Abschluss des HyStarter Projekts ist eine starke Grundlage geschaffen, um neue Projekte in Angriff zu nehmen und weiter am Aufbau einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft zu arbeiten.

Klimaneutralität ist nicht ein mögliches Vorhaben, sondern unverzichtbare Aufgabe. Mit diesem Projekt haben wir einen wichtigen, modellhaften, aber auch nur ersten Schritt auf dem Weg zur Klimaneutralität geschafft. Mit zahlreichen weiteren Projekten gehen wir den Weg, Wasserstoff als wichtigen Energieträger in der Region auszubauen und einzusetzen, entschlossen weiter auf dem Weg zu einem klimaneutralen Marburg 2030.

Dr. Thomas Spies  
Oberbürgermeister

### 1.3. Grußwort der Stadtwerke Marburg

Gerade der letzte Sommer hat uns den Klimawandel wieder sehr deutlich vor Augen geführt, wir haben Trockenperioden, heftige Überschwemmungen und in vielen Ländern extreme Hitze mit Waldbränden.

Die Energiewende muss vorangetrieben und der CO<sub>2</sub>-Ausstoß begrenzt werden.

Wir werden mit der Energiewende, vor dem Hintergrund des Atomausstiegs, des Kohleausstiegs und des langsamen Ausbaus der Erneuerbaren, nicht in einer All-electric-World erfolgreich sein.

Hier kann die Wasserstoffwirtschaft eine Lösung sein. Der Weg dorthin ist allerdings schwierig. Anwendungsmöglichkeiten für Wasserstoff gibt es aber schon im Hier und Jetzt.

Momentan ist Wasserstoff aber noch nicht flächendeckend verfügbar und es wird noch viele Jahre dauern, bis wir in Deutschland ein annähernd vergleichbares Wasserstoffnetz haben, wie es heute ein Erdgasnetz gibt.

Die Erzeugung von umweltfreundlichem grünem Wasserstoff, der mithilfe erneuerbarer Energien hergestellt wird, ist derzeit nicht im großen Maßstab möglich und der Aufbau einer notwendigen Infrastruktur braucht Zeit.

Viele der heutigen Erdgasanwendungen wären mit überschaubaren Anpassungen für den Biogas- oder Wasserstoffeinsatz anpassbar.

Deshalb ist Wasserstoff auch für die Stadtwerke Marburg ein Zukunftsthema.

Das Projekt hat ein gutes Netzwerk zum Einsatz von Wasserstoff für Behörden, Unternehmen und Interessierte geschaffen. Ich hoffe, dass viele der angedachten Projekte konzipiert und umgesetzt werden.

Dr. Bernhard Müller

Geschäftsführer

# Inhaltsverzeichnis

Impressum.....	2
1. Grußworte.....	4
1.1. Grußwort der Landrätin .....	4
1.2. Grußwort des Oberbürgermeisters.....	5
1.3. Grußwort der Stadtwerke Marburg .....	6
Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis.....	9
Abkürzungsverzeichnis.....	10
2. Zusammenfassung.....	11
3. Bewerbung im HyLand-Wettbewerb.....	13
3.1. Die Region Marburg-Biedenkopf: Eine von neun HyStarter-Regionen in Deutschland .....	13
3.2. Steckbrief des Landkreis Marburg-Biedenkopf.....	14
3.3. Steckbrief der Universitätsstadt Marburg.....	15
3.4. Motivation und Ziel der Teilnahme am HyStarter-Wettbewerb.....	16
4. Botschaft an die Politik – Forderungen aus der Region .....	17
5. Strategiedialoge in der Region .....	18
6. Die Akteure im HyStarter Projekt.....	21
7. Die Ausgangslage in der Region .....	22
8. Potenziale, Simulation und Optimierung .....	23
8.1. Potenziale in der Region.....	23
8.2. Simulation des Technologiekonzeptes der Region Marburg-Biedenkopf.....	32
9. Marktmodelle für Wasserstoff in der Region.....	41
10. Die Vision einer regionalen Wasserstoffwirtschaft im Landkreis Marburg-Biedenkopf im Jahr 2030 und 2050.....	43
11. Der Handlungsansatz für die Region Marburg-Biedenkopf – Den Boden bereiten .....	45
12. Übersicht der Themenfelder im Landkreis Marburg-Biedenkopf.....	47
12.1. Möglichkeiten der Wasserstoffproduktion .....	47
12.2. Wasserstofftransport .....	48
12.3. Wasserstoff aus Biogasanlagen.....	48
12.4. Wasserstoff in der Mobilität .....	49
12.5. Wasserstoff in der stationären Anwendung .....	50
12.6. Bildung und Qualifizierung zum Thema Wasserstoff .....	50
13. Umsetzung des Handlungsansatzes.....	51
14. Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation.....	52

14.1.	Bedarfsanalyse .....	52
14.2.	Aufbau und Ausbau des Wasserstoff-Netzwerks in der Region.....	52
14.3.	Gründung eines Kommunikationsteams Marburg-Biedenkopf .....	53
14.4.	Energie- und Mobilitätswende systemisch denken – auch in der Kommunikation.....	53
14.5.	„Digitale Heimat“ für HyStarter Marburg-Biedenkopf.....	53
14.6.	Vorstellung des Online-Portals „mein-marburg-biedenkopf.de“ .....	53
14.7.	Presse-Hintergrundgespräche .....	53
14.8.	Expert*innenrunden zur regionalen Wasserstoffwirtschaft .....	53
14.9.	Entwicklung eines längeren Textes für die Medien .....	54
14.10.	Produktion eines Audio- bzw. Video-Podcasts.....	54
14.11.	Ankündigung und Bewerbung zweier HyStarter Bürger*innen-Sprechstunden.....	54
14.12.	Erarbeitung eines Argumentepapiers / FAQ zum Thema „Wasserstoff“ .....	54
Anhang: Das kleine 1x1 des Wasserstoffes/FAQ.....		56

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Das Phasenmodell	9
Abb. 2: Die neun HyStarter-Regionen im HyLand-Wettbewerb 20219	11
Abb. 3: Der Kreis Marburg-Biedenkopf	12
Abb. 4: Die Universitätsstadt Marburg	13
Abb. 5: Aufteilung der Region Marburg-Biedenkopf	21
Abb. 6: Wasserstofferzeugungspotenziale im Lk Marburg-Biedenkopf 2030	22
Abb. 7: Wasserstofferzeugungspotenziale in Abhängigkeit der WEA-Restlaufzeiten	23
Abb. 8: Wasserstoffnachfragepotenzialer im Sektor „Verkehr“	25
Abb. 9: Wasserstoffpotenzial Nordwesthessen Netz	26
Abb. 10: Wasserstoffbedarf in der Wärme	26
Abb. 11: Gegenüberstellung der Wasserstofferzeugungs- und -nachfragepotenziale	27
Abb. 12: Wasserstofftransportkosten in Abhängigkeit des Durchsatzes und Distanz	28
Abb. 13: Modell des Energiesystems zur Wasserstofferzeugung aus Biogas	31
Abb. 14: Betrachtete Biogasanlagen im Landkreis Marburg-Biedenkopf	32
Abb. 15: Modell des Technologiekonzeptes für Bioenergiedörfer	34
Abb. 16: Vergleich der Einnahmen aus der EEG-Vergütung und des Wasserstoffverkaufs	35
Abb. 17: Vergleich der Einnahmen aus der EEG-Vergütung und des Wasserstoffverkaufs	35
Abb. 18: Vergleich der Einnahmen aus der EEG-Vergütung und des Wasserstoffverkaufs	36
Abb. 19: Schematische Darstellung des Technologiekonzeptes mit Wasserstofftankstelle	36
Abb. 20: Kostenzusammensetzung Gesamtanlage nach Einzelkomponenten	37
Abb. 21: Marktmodell „Basic“	39
Abb. 22: Marktmodell „Sorglos“	39
Abb. 23: Illustrierte Darstellung der Vision	41
Abb. 24: Das Phasenmodell des Handlungsansatzes	42

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Anzahl von Wasserstofftankstellen in Abhängigkeit von Szenarien	29
Tab. 2: Parameter für die Ermittlung der Wasserstofferzeugungspotenziale	29
Tab. 3: Quoten von Brennstoffzellenfahrzeugen an emissionsarmen Fahrzeugen	30
Tab. 4: Produktionskapazitäten (Biogas) der betrachteten Anlagen	32
Tab. 5: Simulationsergebnisse der Biogasanlagen	33
Tab. 6: Kostenbetrachtung Wasserstoffproduktion mit Tankstelle für Mobilität	37

## Abkürzungsverzeichnis

BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz)
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BZ	Brennstoffzelle
CAPEX	eng. capital expenditure = Investitionskosten
CVD	Clean Vehicle Directive, EU-Richtlinie über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
dena	Deutsche Energieagentur
DVGW e.V.	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
EEG	Gesetz zum Ausbau erneuerbarer Energien – EEG 2021
EU	Europäische Union
GIZ	Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
HRS	Hydrogen Refuelling Station
kWp	Kilowatt peak
LEA Hessen	LandesEnergieAgentur Hessen
Lkw	Lastkraftwagen
LNW	leichte Nutzfahrzeuge
MHKW	Müllheizkraftwerk
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
NOW GmbH	Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie
OPEX	eng. operational expenditure = Betriebskosten
Pkw	Personenkraftwagen
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PV	Photovoltaik
RMV	Rhein-Main-Verkehrsverbund
SaubFahrzeugBschG	Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge
SNW	schwere Nutzfahrzeuge
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
t	Tonne
WEA	Windenergieanlage

## 2. Zusammenfassung

In Verbindung mit den in der Region Marburg-Biedenkopf bereits vorhandenen Aktivitäten im Bereich Klimaschutz und der Nutzung erneuerbarer Energien wurden mit den Akteuren der Region im HyStarter-Projekt der Wasserstoff als Energieträger und die Brennstoffzellentechnologie in den Fokus gerückt. Aus den sechs Strategiedialogen, den Workshops und den vielen bi- und multilateralen Gesprächen innerhalb und außerhalb des Akteurskreises haben sich die folgenden Themenbereiche herauskristallisiert:

- Wasserstoff im Energiesystem: Hier wurden Grundlagen für ein Konzept zur Substitution fossiler Energieträger, für die Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen und Klärschlämmen sowie für die Nachnutzung von Post-EEG<sup>1</sup>-Biogasanlagen<sup>2</sup> entwickelt.
- Wasserstoff im Schwerlastverkehr: Durch die Clean Vehicle Directive<sup>3</sup> und das SaubFahrzeugBeschG<sup>4</sup> müssen bestimmte Quoten an emissionsarmen und -freien Fahrzeugen im ÖPNV<sup>5</sup> erfüllt werden. In diesem Bereich wurde die Basis für den Bau einer Wasserstofftankstelle und für die Prüfung des Betriebes von Brennstoffzellenfahrzeugen bei den Verkehrs- und Entsorgungsunternehmen gelegt.
- Wasserstoff-Komponenten aus der Region: Hier sehen die Akteure gute Entwicklungschancen für die in der Region ansässigen Unternehmen, insbesondere für die der Automobilzuliefererindustrie.
- Wasserstoff in Bildung und Wissenschaft: Im Markenkern der Region steht die Entwicklung einer Bildungsmatrix mit aufeinander aufbauenden Modulen für die unterschiedlichen Zielgruppen. Dies soll in Zusammenarbeit mit dem Chemikum, der Universität Marburg und der Technischen Hochschule Mittelhessen sowie weiteren Bildungsträgern geschehen.

Für die Bearbeitung der Aufgaben innerhalb der vier Bereiche, die thematisch untereinander vernetzt sind, lässt sich eine Reihenfolge anhand des erarbeiteten Phasenmodells ablesen:

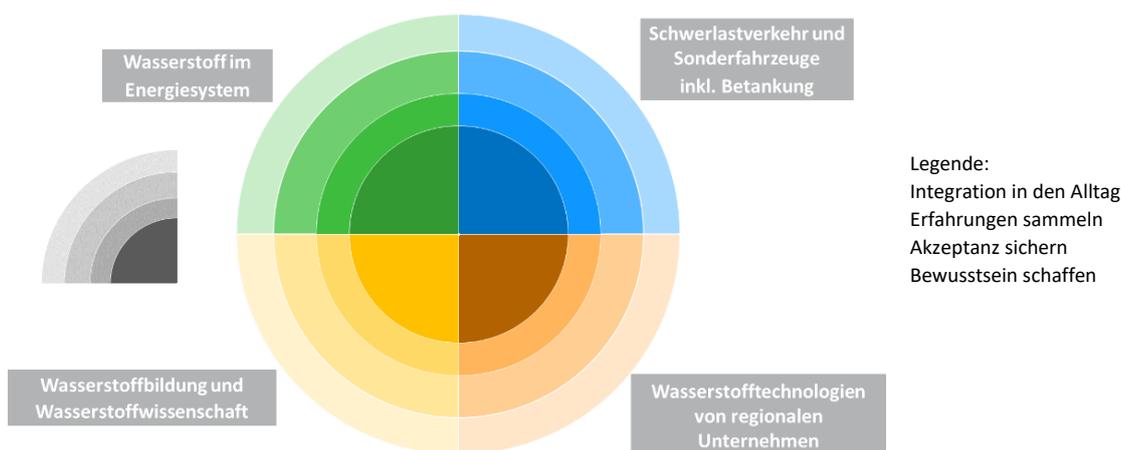


Abbildung 1: Das Phasenmodell

<sup>1</sup> Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energie (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG 2021), zuletzt geändert am 16.07.2021

<sup>2</sup> Biogasanlagen, deren Vergütungsanspruch nach 20 Jahren ausgelaufen ist

<sup>3</sup> CVD Clean Vehicles Directive, EU-Richtlinie über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge

<sup>4</sup> Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge (Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungsgesetz – SaubFahrzeugBeschG) vom 15.06.2021

<sup>5</sup> Öffentlicher Personennahverkehr

- Im „inneren Kern“ der Phase 1 wird ein Bewusstsein für das Thema „Energie- und Verkehrswende“ in der Region geschaffen.
- Die zweite Phase, der erste Ring, ist geprägt von der Wissensvermittlung und Information, um die Akzeptanz bei den Menschen in der Region zu sichern.
- Der Betrieb von Demonstrationsanlagen liefert in der dritten Phase wertvolle Daten und Erfahrungen.
- In der vierten Phase ist die neue Technologie im Alltag der Menschen angekommen und wird akzeptiert.

Neben der Erarbeitung der vier Themenbereiche und des Phasenmodells wurden die Potenziale der Region zur Erzeugung von grünem Wasserstoff<sup>6</sup> bestimmt. Aus der Analyse des Bestandes der nach EEG geförderten Anlagen (Wind, PV und Biomasse) ergibt sich eine theoretische Gesamtmenge von 1.755 Tonnen Wasserstoff pro Jahr aus der Elektrolyse und der Pyrolyse/Hydrolyse<sup>7</sup>. Die Wasserstoffbedarfe für die Region wurden über die Nachfragen des Szenarios „Regulatorik“ und des Szenarios „Klimaschutz“ berechnet<sup>8</sup>.

Außerdem wurden als zusätzliches Potenzial acht Biogasanlagen vertieft betrachtet, die derzeit zur Energieversorgung der Bioenergiedörfer zur Verfügung stehen. Hier könnten durch Dampfreformierung des Biogases über 3.200 Tonnen blauer Wasserstoff<sup>9</sup> produziert werden. Mit dieser Menge könnten zum Beispiel rund 500 Brennstoffzellenbusse mit einer Tagesfahrleistung von jeweils 250 km versorgt werden.

Zum Abschluss der Analysen wurden zwei Marktmodelle zum Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft in der Region beschrieben:

- Das Marktmodell „Basic“ beruht auf Mengen-Matching, ist einfach zu implementieren und reizt einen gewissen Wettbewerb in der Region an. Dadurch sinken die Wasserstoffpreise. Allerdings können Versorgungsmengen und Versorgungssicherheiten nicht garantiert werden, da die energetischen Flüsse mit den finanziellen Flüssen gekoppelt sind.
- Im Marktmodell „Sorglos“ werden diese Flüsse entkoppelt. Über Verträge garantieren die Marktteilnehmer vorher vereinbarte Mengen zu vereinbarten Preisen. Die dadurch entstandene Investitionssicherheit sorgt für sinkende Risiken und geringe Einstiegsbarrieren für weitere Akteure.

---

<sup>6</sup> Siehe Anhang

<sup>7</sup> Siehe Anhang

<sup>8</sup> Siehe Annahmen Tab. 2

<sup>9</sup> Siehe Anhang

### 3. Bewerbung im HyLand-Wettbewerb

Im September 2019 wurden der Landkreis Marburg-Biedenkopf, die Universitätsstadt Marburg und die Stadtwerke Marburg als Region Marburg-Biedenkopf im Rahmen der ersten Runde des BMVI<sup>10</sup>-Wettbewerbs HyLand als einzige hessische von bundesweit neun HyStarter-Regionen ausgewählt.

#### 3.1. Die Region Marburg-Biedenkopf: Eine von neun HyStarter-Regionen in Deutschland

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) unterstützt mit dem HyLand-Wettbewerb Regionen in Deutschland bei der Initiierung und Realisierung einer regionalen Wasserstoffwirtschaft. Die HyStarter-Regionen erhalten dabei eine fachliche und strategische Begleitung beim Aufbau eines regionalen Akteursnetzwerks und bei der Entwicklung eines Handlungskonzeptes. Mit der fachlichen und strategischen Begleitung der HyStarter-Dialoge wurde ein Projektkonsortium bestehend aus Spilett new technologies GmbH (Projektleitung), Nuts One GmbH, BBH Consulting AG, EE ENERGY ENGINEERS GmbH und Reiner Lemoine Institut beauftragt. Das Ergebnis dieses durch HyStarter angestoßenen Prozesses ist die vorliegende Konzeptstudie.



Abbildung 2: Die neun HyStarter-Regionen im HyLand-Wettbewerb 2019. © NOW GmbH

Weitere Informationen zu HyStarter und dem HyLand-Programm finden Sie unter:

- <https://www.hy-starter.de>
- <https://www.now-gmbh.de/sectoren-themen/sectorenkopplung>
- <https://www.ptj.de/projektfoerderung/nip/hyland>

<sup>10</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

### 3.2. Steckbrief des Landkreis Marburg-Biedenkopf

Der Landkreis Marburg-Biedenkopf liegt im Nordwesten des Regierungsbezirks Gießen in Mittelhessen und wird geprägt durch eine Mittelgebirgslandschaft mit weitläufigen Wäldern und der Lahn, die den Kreis von Westen nach Südosten durchzieht. Zentrum des Landkreises ist die Universitätsstadt Marburg. Weitere wichtige Städte sind die Mittelzentren Biedenkopf und Gladenbach sowie Kirchhain und Stadtallendorf.



Abbildung 3: Der Kreis Marburg-Biedenkopf

Quelle: Geoportal Landkreis Marburg-Biedenkopf

#### Bevölkerungsstruktur:

Einwohner*innen	245.903
Einwohner*innen pro km <sup>2</sup>	195

#### Flächen:

Siedlungs- und Verkehrsflächen	179,96 km <sup>2</sup>
Landwirtschaftliche Nutzfläche	554,89 km <sup>2</sup>
Waldfläche	515,82 km <sup>2</sup>
Gewässer	11,89 km <sup>2</sup>
Fläche insgesamt	1.262,55 km <sup>2</sup>

### 3.3. Steckbrief der Universitätsstadt Marburg

Marburg ist die Kreisstadt des Landkreises Marburg-Biedenkopf und liegt an der Lahn. Die Universitätsstadt Marburg ist mit 76.401 Einwohner\*innen die achtgrößte Stadt Hessens. Das Stadtgebiet erstreckt sich beiderseits der Lahn westlich ins Gladenbacher Bergland und östlich über die Lahnberge bis an den Rand des Amöneburger Beckens.



Abbildung 4: Die Universitätsstadt Marburg

Quelle: Geoportal Landkreis Marburg-Biedenkopf

#### Bevölkerungsstruktur:

Einwohner*innen	76.071
Einwohner*innen pro km <sup>2</sup>	614

#### Flächen:

Siedlungs- und Verkehrsflächen	29,29 km <sup>2</sup>
Landwirtschaftliche Nutzfläche	41,56 km <sup>2</sup>
Waldfläche	51,68 km <sup>2</sup>
Gewässer	1,39 km <sup>2</sup>
Fläche insgesamt	123,92 km <sup>2</sup>

### 3.4. Motivation und Ziel der Teilnahme am HyStarter-Wettbewerb

Die Region Marburg-Biedenkopf beschäftigt sich seit rund 15 Jahren mit dem Thema „Erneuerbare Energien“, ausgehend von der regionalen Landwirtschaft, verankert im Masterplan „Klimaschutz“ mit insgesamt acht Aktionsfeldern und aktuellen Klimaschutzprogrammen des Landkreises und der Universitätsstadt Marburg. Dabei wird insbesondere auf den Vernetzungsgedanken und die Platzierung des Klimaschutzes als Querschnittsthema fokussiert. Somit kann das Projekt auf die gute und intensive Zusammenarbeit zwischen dem Landkreis Marburg-Biedenkopf, der Universitätsstadt Marburg, den Stadtwerken Marburg sowie weiteren überregionalen Kooperationen aufbauen.

Der Landkreis Marburg-Biedenkopf ist stark geprägt von landwirtschaftlichen Flächen (40%) und Waldflächen (40%). Viele Landwirte betreiben Biogasanlagen und sind sehr an deren Weiternutzung nach dem EEG-Zeitraum interessiert. Im Osten des Landkreises versorgen Anlagen zur Nutzung von Biogas, Solarthermie und Holzhackschnitzel 13 Bioenergiedörfer mit Energie. Innerhalb des HyStarter-Projektes soll über eine Umwandlung des überschüssigen Biogases in Wasserstoff für die Nutzung im Schwerlastverkehr (z.B. im Güterverkehr und im ÖPNV) nachgedacht werden. Weitere Wasserstoffherzeugungsoptionen ergeben sich in der Region für Gülle und Klärschlamm. Der Hintergrund: Die Abwasserverband Marburg betreibt das größte Klärwerk des Kreises und muss seine Klärschlämme derzeit nach Frankfurt/Main entsorgen. Eine energetische Nutzung vor Ort und Umwandlung in Wasserstoff wäre eine umweltfreundliche und nachhaltige Lösung.

Daneben zeichnet sich die Region durch eine hohe Industriedichte mit einer großen Anzahl an Unternehmen aus der Automobilzulieferbranche aus. Viele dieser Firmen befinden sich in einem Technologie- und Produkttransformationsprozess, in dem sich die Nutzung der neuen Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik unter Umständen positiv auswirken kann. Zudem kann die enge Verbundenheit mit dem Ballungsraum Rhein-Main insbesondere in den Bereichen Mobilität und Energie im Stadt-Umlandsystem große Entwicklungspotenziale eröffnen.

In allen aufgeführten Bereichen soll ein Schwerpunkt im HyStarter-Projekt in der Vernetzung und der Entwicklung weiterer Kooperationsoptionen zwischen den regionalen Akteuren liegen. Bestehende Kooperationen sollen gestärkt und neue aufgebaut werden. Hierdurch sollen Synergien genutzt und gemeinsam an Lösungen gearbeitet werden. Die Sicht aus den verschiedenen Blickwinkeln der unterschiedlichen Akteure auf die anstehenden Herausforderungen des Transformationsprozesses ist von großer Bedeutung für zukunftsfeste und nachhaltige Ergebnisse.

Ein weiterer Fokus des Projektes wird auf Bildung und Wissenstransfer liegen. Die bereits heute enge Zusammenarbeit mit der Universität Marburg, dem Chemikum und der Technischen Hochschule Mittelhessen bilden hierfür eine gute Grundlage. Diese soll mit neuen Methoden der Wissensbildung und der Wissensvermittlung für die unterschiedlichen Zielgruppen Schüler\*innen, Student\*innen und Auszubildende sowie für die interessierte Öffentlichkeit in den Themenbereichen „Wasserstoff“ und „Brennstoffzellentechnik“ unterstützt und erweitert werden.

## 4. Botschaft an die Politik – Forderungen aus der Region

Während der Bearbeitung der einzelnen Themenfelder dieses Konzeptes ist aufgefallen, dass viele der nationalen und europäischen Maßnahmen zur Förderung einer Wasserstoffwirtschaft bzw. von Wasserstofftechnologien wenig für eine regionale Anwendung geeignet sind. Zudem sind die bürokratischen Hürden zum Teil so hoch, dass insbesondere kleine Kommunen selten zu einer Antragstellung animiert werden. Aus dieser Erkenntnis heraus haben sich folgende Forderungen an die Förderpolitik des Bundes und der Länder ergeben:

- Die nationalen und länderspezifischen Fördermaßnahmen müssen sich an regionale Gegebenheiten und Besonderheiten orientieren.
- Die Komplexität der Beantragung von Fördermitteln muss deutlich verringert und anwendungsfreundlicher gestaltet werden.
- Aus Biogas erzeugter Wasserstoff muss als "grüner" Wasserstoff anerkannt und fördertechnisch entsprechend behandelt werden.
- In Anlehnung an das von BMWi<sup>11</sup> und GIZ<sup>12</sup> initiierte Förderprogramm "H2Global"<sup>13</sup> muss ein "H2Region" entwickelt werden, das die regionalen Bedingungen zum Aufbau eines Wasserstoffmarktes vor Ort berücksichtigt und den örtlichen Akteuren finanzielle Spielräume einräumt.

Mit der Unterstützung derart gestalteter Förderungen kann gewährleistet werden, dass die in diesem Konzept vorgestellten und beschriebenen Ideen zum Aufbau einer regionalen Wasserstoffwirtschaft realisiert werden können.

---

<sup>11</sup> Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

<sup>12</sup> Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit

<sup>13</sup> Siehe [www.H2Global.de](http://www.H2Global.de)

## 5. Strategiedialoge in der Region

Im Rahmen der HyStarter-Projektphase wurden zwischen Oktober 2020 und Juli 2021 sechs Strategiedialoge mit den regionalen Akteuren durchgeführt. Aufgrund der Schutzmaßnahmen zur Eindämmung der SARS COVID-19 Pandemie konnte nur der erste Dialog als Präsenz-Veranstaltung vor Ort mit Hygienekonzept durchgeführt werden. Alle weiteren Strategiedialoge mussten in den digitalen Raum verlegt werden und wurden als Web-Dialoge durchgeführt. Neben den Dialogen wurden zur Information der interessierten Öffentlichkeit am 09. und 10. September 2021 jeweils von 18.00 Uhr bis 19.00 Uhr zwei Bürger\*innensprechstunden abgehalten. Auch diese mussten aufgrund des örtlichen Infektionsgeschehens online abgehalten werden.

Die Präsentationsfolien der Inputvorträge können auf Nachfrage zur Verfügung gestellt werden.

### 1. Strategiedialog am 1. Oktober 2020

Der erste Strategiedialog in der Region Marburg-Biedenkopf fand am 1. Oktober 2020 als vor-Ort Termin im Kreissitzungssaal des Kreishauses Marburg-Biedenkopf statt. Unter Einhaltung der geltenden Hygienemaßnahmen konnten über 50 Akteur\*innen aus dem Landkreis-Marburg und den umliegenden Regionen begrüßt werden. Zum Auftakt der Veranstaltung wurden die Teilnehmer\*innen durch Klaus Weber, Mitglied des Kreisausschusses Marburg-Biedenkopf, Dr. Thomas Spies, Oberbürgermeister der Universitätsstadt Marburg und Dr. Bernhard Müller, Geschäftsführer der Stadtwerke Marburg, begrüßt.

Übersicht der Inhalte des 1. Strategiedialogs:

- Impulsvortrag: Allgemeine Einführung in das Thema Wasserstoff (Prof. Olaf Berger, Technische Hochschule Mittelhessen - Gießen);
- Projektvorstellung HyStarter (Nadine Hölzinger, Spilett new technologies, Berlin);
- Vorstellung der HyStarter-Bewerbung Landkreis Marburg-Biedenkopf (Stefan Franke, Landkreis Marburg-Biedenkopf & Fabian Kauffmann, Stadtwerke Marburg);
- Vorstellung und Diskussion der vier Themenfelder: Wasserstoff im Energiesystem, Wasserstoff im Schwerlastverkehr, Wasserstoff-Komponenten aus der Region, Wasserstoff in Bildung und Wissenschaft.

### 2. Strategiedialog am 3. Dezember 2020

Der 2. Strategiedialog in der Region Marburg-Biedenkopf im Dezember 2020 musste aufgrund der gelten Schutzmaßnahmen zur Eindämmung der SARS COVID-19 Pandemie digital stattfinden.

Übersicht der Inhalte des 2. Strategiedialogs:

- Impulsvortrag 1: Übersicht der Wasserstoffaktivitäten des Bundes und der NOW<sup>14</sup> im Rahmen des HyLand-Programmes (Tilman Wilhelm, NOW);
- Impulsvortrag 2: Übersicht der Wasserstoffaktivitäten der LandesEnergieAgentur Hessen und des Landes Hessen (Caroline Schäfer, LEA Hessen<sup>15</sup>);
- Impulsvortrag 3: Vorstellung der Projektpartner Becker-Büttner-Held Consulting, Energy Engineers und Reiner Lemoine Institut im HyStarter-Projekt;
- Vorstellung und Diskussion des vorläufigen Handlungsansatzes für die Region Marburg-Biedenkopf;

---

<sup>14</sup> NOW GmbH, Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

<sup>15</sup> LandesEnergieAgentur Hessen

- Arbeit in Kleingruppen zu den Themenfeldern: Wasserstoff-Bereitstellung, Wasserstoff-Nachfrage sowie Bildung und Qualifizierung im Bereich Wasserstoff.

### **3. Strategiedialog am 3. Februar 2021**

Auch der 3. Strategiedialog in der Region Marburg-Biedenkopf im Februar 2021 wurde aufgrund der gelten Corona-Schutzmaßnahmen als digitale Veranstaltung durchgeführt.

Übersicht der Inhalte des 3. Strategiedialoges:

- Impulsvortrag 1: Übersicht der Aktivitäten der Messer Industriegase GmbH im Bereich Wasserstoff (Dr. Christoph Erdmann, Messer Industriegase GmbH);
- Impulsvortrag 2: Projektidee der Marburger Entsorgungs-Gesellschaft zur Nutzung von existierenden Biogasanlagen zur Wasserstoffproduktion (Jürgen Wiegand, Marburger Entsorgungs-GmbH);
- Vorstellung und Diskussion des vorläufigen Technologiekonzeptes für die Region Marburg-Biedenkopf (Dr. Frank Koch, EE ENERGY ENGINEERS).

### **4. Strategiedialog am 20. April 2021**

Der 4. Strategiedialog in der Region Marburg-Biedenkopf im April 2021 fand, wie die beiden vorherigen, aufgrund der gelten Corona-Schutzmaßnahmen ebenfalls als digitale Veranstaltung statt.

Übersicht der Inhalte des 4. Strategiedialoges:

- Impulsvortrag 1: Vorstellung des Innovationsprogramms Wasserstoff des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e.V. im Bereich Wasserstoff (Dr. Michael Walter, DVGW e.V.);
- Impulsvortrag 2: Vorstellung der Technologielösungen der sera Hydrogen im Bereich Wasserstofftankstelle (Tim Lorenz, sera Hydrogen GmbH);
- Vorstellung und Diskussion der Potenzialanalyse für die Region Marburg-Biedenkopf (Nikolas Beneke, Becker Büttner Held Consulting BBHC);
- Vorstellung verschiedener regionaler Projektideen.

### **5. Strategiedialog am 2. Juni 2021**

Auch der 5. Strategiedialog in der Region Marburg-Biedenkopf im Juni 2021 wurde aufgrund der Corona-Schutzmaßnahmen als digitale Veranstaltung durchgeführt.

Übersicht der Inhalte des 5. Strategiedialoges:

- Impulsvortrag 1: Vorstellung der Wasserstoffproduktion durch Hydrolyse im BlueFLUX-Verfahren (Dr. Ulrich Mach, BlueFLUX Energy);
- Impulsvortrag 2: Möglichkeiten der Wasserstoffproduktion aus Biogas (Dr. Andy Gradel, BtX Energy);
- Impulsvortrag 3: Position des Deutschen Gewerkschaftsbundes im Bereich Wasserstoff und Arbeitsplatztransformation (Patrizia Kraft, DGB);
- Vorstellung und Diskussion der Simulation für die Region Marburg-Biedenkopf (Tim Röpcke, Reiner Lemoine Institut);
- Vorstellung des regionalen Arbeitskreises "H2-Tankstelle für Marburg-Biedenkopf".

## **6. Strategiedialog am 8. Juli 2021**

Wie die vorausgegangenen Dialoge wurde auch der sechste Strategiedialog im Juli 2021 aufgrund der Corona-Schutzmaßnahmen als digitale Veranstaltung durchgeführt.

Übersicht der Inhalte des 6. Strategiedialoges:

- Impulsvortrag 1: Vorstellung des Unternehmens ITM Power und seiner Produkte zur Herstellung von Wasserstoff per Wasserelektrolyse (Calum McConnell, ITM Powers GmbH);
- Impulsvortrag 2: Vorstellung der Strategie des VKU zur Transformation der Gasinfrastruktur (Rainer Stock, Verband der kommunalen Unternehmen VKU);
- Impulsvortrag 3: Vorstellung der Arbeit des ZDH zum Thema "Wasserstoff" (Michel Durieux, Zentralverband des Deutschen Handwerks ZDH);
- Vorstellung des Updates zur Simulation und Diskussion der Ergebnisse sowie der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für die Region Marburg-Biedenkopf (Tim Röpcke, Reiner Lemoine Institut);
- Vorstellung eines Geschäftsfeldentwicklungsmodells für die Region (Nikolas Beneke, Becker Büttner Held Consulting BBHC)

## **Abschlussveranstaltung am 5. Oktober 2021**

Die Abschlussveranstaltung wurde am 05. Oktober 2021 unter Einhaltung des örtlichen Hygienekonzeptes im Saal des Cineplex-Kinos durchgeführt. Dabei hat das Projektteam dieses Konzept detailliert vorgestellt und stand für Fragen zur Verfügung.

## 6. Die Akteure im HyStarter Projekt

Die Veranstaltungen im HyStarter-Projekt haben eine Vielzahl unterschiedlicher Akteure aus dem Landkreis, der Stadt und den benachbarten Regionen zusammengebracht. Sie alle verbindet das Interesse an Wasserstoff und der Wunsch, die erwarteten Potenziale der Wasserstoff-Produktion und -anwendung für sich und die Region zu erschließen, um damit Teil einer dekarbonisierten Energiezukunft zu werden.

Folgende Unternehmen und Akteure waren als Teilnehmer\*innen des HyStarter-Kernteams in den Prozess eingebunden und haben ihre Zeit, Expertise und ihre Netzwerke eingebracht, um das vorliegende Handlungskonzept mit zu entwickeln, zu diskutieren und zu detaillieren (in alphabetischer Reihenfolge):

- **Bundesverband Windenergie** (<https://www.wind-energie.de/>)
- **Chemikum Marburg e.V.** (<http://www.chemikum-marburg.de/>)
- **Elkamet Kunststofftechnik GmbH** (<https://www.elkamet.com/de/>)
- **Fraunhofer IEE** (<https://www.iee.fraunhofer.de/>)
- **Gemeinde Dauphetal** (<https://www.dautphetal.de/>)
- **IHK Kassel-Marburg** (<https://www.ihk-kassel.de/>)
- **Kautetzky Internationale Spedition GmbH & Co. KG** (<https://www.kautetzky.de/>)
- **Knies + Lagotka GmbH & Co. Mineralölvertriebs KG** (<https://www.knies-lagotka.de/>)
- **Kreishandwerkerschaft Marburg** (<https://www.handwerk-marburg.de/>)
- **Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen** (<https://llh.hessen.de/>)
- **Landkreis Marburg-Biedenkopf** (<https://www.marburg-biedenkopf.de/>)
- **LEA – LandesEnergieAgentur Hessen** (<https://www.lea-hessen.de/>)
- **Marburger Entsorgungs-GmbH** (<https://www.meg-marburg.de/>)
- **Messer Industriegase GmbH** (<https://www.messer.de/>)
- **Pharmaserv GmbH** (<https://www.pharmaserv.de/>)
- **RITTAL GmbH & Co. KG** (<https://www.rittal.com/>)
- **RMV – Rhein-Main-Verkehrsverbund** (<https://www.arl-lw.niedersachsen.de/>)
- **Stadtwerke Marburg GmbH** (<https://www.stadtwerke-marburg.de/>)
- **THM – Technische Hochschule Mittelhessen** (<https://www.thm.de/site/>)
- **Universitätsklinikum Marburg-Gießen** (<https://www.ukgm.de/home.html>)
- **Universitätsstadt Marburg** (<https://www.marburg.de/>)
- **Viessmann Climate Solutions SE** (<https://www.viessmann.de/>)

Darüber hinaus haben rund 20 weitere Unternehmen und Personen aus der Region den Prozess begleitet und Zwischenergebnisse diskutiert.

Fachlich und organisatorisch wurden die Akteure in der Region Marburg-Biedenkopf hierbei durch die Spilett new technologies GmbH und das Projektteam von HyStarter begleitet.

## 7. Die Ausgangslage in der Region

Mit dem "Masterplan 100 % Klimaschutz" hat sich der Landkreis Marburg-Biedenkopf das Ziel gesetzt, bis 2040 unabhängig von konventionellen Brennstoffen zu werden. Zusätzlich sollen bis zum Jahr 2050 90 bis 95 % der Treibhausgase und 50 % der Energie eingespart werden. Das dem Masterplan zu Grunde liegende Klimaschutzkonzept zeigt Wege auf, wie dieses Ziel in den Bereichen Strom, Wärme, Verkehr sowie Land- und Forstwirtschaft erreicht werden kann, insbesondere durch:

- die Ausschöpfung der Potenziale zur Steigerung von Energieeffizienz und Energieeinsparung,
- die Förderung eines nachhaltigen Lebensstils bei Nutzer\*innen und Konsument\*innen sowie eines nachhaltigen Wirtschaftens in lokalen Unternehmen im Rahmen von entwickelten Suffizienz- und Konsistenzstrategien,
- die Nutzung erneuerbarer Energien und Kraft-Wärme-Kopplung, insbesondere aus regionalen Quellen sowie
- den Aufbau von nachhaltigen regionalen Stoffkreisläufen.<sup>16</sup>

Ergänzend dazu hat der LK MB mit dem Klimaschutzaktionsprogramm einen Maßnahmenkatalog zum Start auf den Weg zu einer klimaneutralen Kreisverwaltung erarbeitet und die Umsetzung schon im Jahr 2019 gestartet.

Die Universitätsstadt Marburg hat 2019 den Klimanotstand ausgerufen und verfolgt mit ihrem "Klima-Aktionsplan 2030" das Ziel, bis 2030 Klimaneutralität zu erreichen. Dieser Aktionsplan beruht auf den Maßnahmen des "Integrierten Klimaschutzkonzeptes", u.a. in den Bereichen Verwaltung, Verkehr, Gebäude, Bildung und Öffentlichkeitsarbeit. Bei der Umsetzung spielen die folgenden Strategien eine besondere Rolle:

- Suffizienz: Es werden weniger Ressourcen (Energie) verbraucht;
- Effizienz: Die zur Verfügung stehenden Ressourcen (Energie) werden effizienter eingesetzt;
- Konsistenz: Der Ersatz von umweltschädlichen Technologien/Ressourcen durch umweltfreundliche Technologien/Ressourcen<sup>17</sup>.

Die bestehende Informationsstruktur in der Region, unter anderem geprägt von den Fachnetzwerken der Stadtwerke, dem Wirtschaftsnetzwerk, dem Klimaschutzbeirat und dem Netzwerk der hessischen Klimakommunen bietet eine sehr gute Grundlage für eine breite Informationskampagne zum Wissenserwerb und zur Wissensvermittlung in den Bereichen Klima und Klimaschutz und der Nutzung von Synergien für eine zeitnahe und nachhaltige Implementierung von klimafreundlichen Technologien in der Region.

Damit stehen die Aktivitäten in dem HyStarter-Projekt zur Erzeugung und Nutzung von grünem Wasserstoff in einer Linie mit den bisherigen Initiativen der Klimaschutzpläne des Landkreises und der Stadt Marburg. Als "Bioenergieregion" besitzt Marburg-Biedenkopf eine hervorragende Grundlage für die Umsetzung der ambitionierten Ziele in der Vision dieses Konzeptes.

---

<sup>16</sup> Siehe „Masterplan 100 % Klimaschutz“ unter <https://klimaschutz.marburg-biedenkopf.de/privatperson/klimastrategie-2050/strategie/masterplan/>

<sup>17</sup> Siehe „Klimaschutzkonzept Universitätsstadt Marburg“ unter <https://www.marburg.de/portal/seiten/klimaschutzkonzept-900000629-23001.html>

## 8. Potenziale, Simulation und Optimierung

### 8.1. Potenziale in der Region

Die für den Landkreis Marburg-Biedenkopf durchgeführte Potenzialanalyse untersucht die maximal-realistischen Wasserstofferzeugungspotenziale und in zwei Szenarien mögliche Wasserstoffnachfragepotenziale im Landkreis Marburg-Biedenkopf. Sie soll als Orientierung dienen, in welchen Größenordnungen sich die Erzeugungs- und Nachfragepotenziale bis 2030 bewegen und kann als Basis für weitere strategische Überlegungen der Region in Bezug auf Wasserstoff fungieren.<sup>18</sup> Die Analyse stellt jedoch keine Ansprüche an technische oder wirtschaftliche Machbarkeiten.

#### **Wasserstofferzeugung**

Die Ermittlung der Wasserstofferzeugungspotenziale in Marburg-Biedenkopf erfolgt für die drei Regionen Stadtgebiet Marburg, den westlichen Teil sowie den östlichen Teil des Landkreises (vgl. Abb. 5). Die Potenziale werden für die Erzeugungspfade ermittelt, über die "grüner"<sup>19</sup> Wasserstoff hergestellt wird.



Abbildung 5: Aufteilung der Region Marburg-Biedenkopf für die Ermittlung der Wasserstofferzeugungspotenziale

Die höchsten Wasserstofferzeugungspotenziale entfallen mit 824 Tonnen Wasserstoff im Jahr 2030 auf den östlichen Landkreis, gefolgt vom westlichen Landkreis mit 448 t<sub>H<sub>2</sub></sub>/a (vgl. Abb. 6). Das Stadtgebiet Marburg weist erwartungsgemäß nur geringe Erzeugungspotenziale in Höhe von 72 t<sub>H<sub>2</sub></sub>/a auf. Durch die dichte Bebauung sind die Flächen für die Installation von EE- bzw. Wasserstofferzeugungs-Anlagen begrenzt. Hier ist Marburg kein Einzelfall, vielmehr handelt es sich um ein Charakteristikum nahezu aller Städte. Insgesamt beläuft sich das Erzeugungspotenzial im Landkreis Marburg-Biedenkopf auf 1.755 t<sub>H<sub>2</sub></sub>/a. In die Gesamtmenge der Region fließen auch die Potenziale aus

<sup>18</sup> Die Ergebnisse der Potenzialanalyse unterliegen verschiedensten Annahmen, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Viele Ergebnisse sind sehr sensitiv in Bezug auf die getroffenen Annahmen. Sie sind somit ein bester Schätzer, jedoch keine feste Prognose der Zukunft.

<sup>19</sup> Eine eindeutige, durch Gesetzesgeber festgelegte Definition liegt zurzeit weder auf EU-Ebene noch in Deutschland vor. In diesen Ausführungen wird grüner Wasserstoff wie folgt definiert: Wasserstoff, der über erneuerbare Energien hergestellt wird (erneuerbarer Strom, Biomasse).

MHKW<sup>20</sup>-Strom und der Pyrolyse/Hydrolyse mit Klärschlämmen ein, die keiner der drei Regionen zugeordnet werden können<sup>21</sup>.

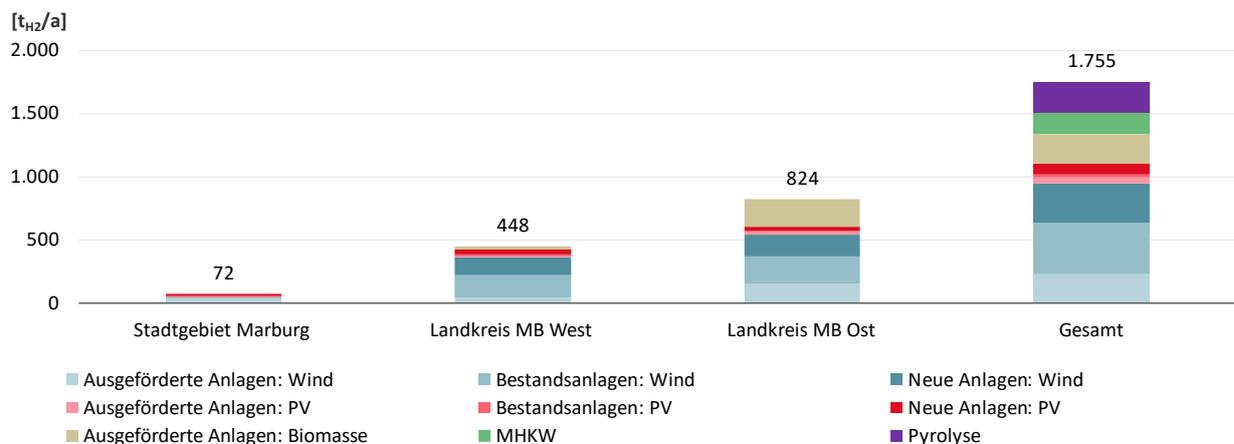


Abbildung 6: Wasserstoffherzeugungspotenziale im Landkreis Marburg-Biedenkopf für das Jahr 2030

Die größten Erzeugungspotenziale der Region ergeben sich aus erneuerbar erzeugtem Strom, der über Wasserelektrolyse zu Wasserstoff umgewandelt werden kann. Die Analyse zeigt, dass insbesondere Strom aus Windkraftanlagen außerhalb des Marburger Stadtgebietes zu einer regionalen Wasserstoffproduktion genutzt werden kann. Bestehende<sup>22</sup> und neu zu errichtende<sup>23</sup> Anlagen bergen die größten Potenziale. Ausgeförderte Anlagen, für die bis 2030 der Vergütungsanspruch nach dem EEG endet, haben aufgrund ihrer begrenzten und unsicheren Restlaufzeit ein etwas geringeres Potenzial. Variiert die Restlaufzeit der ausgeförderten Windkraftanlagen beispielsweise zwischen drei und zehn Jahren, so resultiert das in Erzeugungspotenzialen ausgeförderter Windkraft-Anlagen von 47 bis 233 t<sub>H2</sub> im Jahr 2030 (vgl. Abb. 7). Dabei bietet speziell der Weiterbetrieb ausgeförderter Anlagen, die ansonsten teilweise zurückgebaut werden, den Vorteil des "Beitrags zur Energiewende" des produzierten Stroms. Kann dieser Strom für die Wasserstoffherstellung genutzt werden, muss anderen Anwendungsbereichen kein Strom entzogen werden. Erste Weichen für eine Weiterbetriebsperspektive ergeben sich für Betreiber ausgeförderter Windkraftanlagen über die Novelle des EEG 2021, in der die Netzdurchleitung von Strom unter Berücksichtigung verschiedener Bedingungen von der EEG-Umlage für die Erzeugung von "grünem" Wasserstoff befreit werden kann<sup>24</sup>.

Die Potenziale von PV-Anlagen sind in allen drei analysierten Regionen überschaubar. Das hängt mit den geringen Volllaststunden bzw. der geringen Auslastung der Elektrolyseure sowie der Verteilung der Größenklassen in der Region zusammen. So fallen zwar bis 2030 über 25 MW<sup>25</sup> an PV-Anlagenleistung aus der EEG-Vergütung, davon entfallen aber lediglich etwas mehr als 3 MW auf PV-Anlagen mit einer Leistung von mehr als 100 kW<sub>p</sub>. Für eine Wasserstoffherzeugung in wirtschaftlichen Maßstäben wäre daher die Bündelung oder die Einrichtung von Bilanzräumen für den Strom aus vielen kleineren PV-Anlagen denkbar.

<sup>20</sup> Müllheizkraftwerk

<sup>21</sup> Die in der Region anfallenden Stoffströme für die Umsetzung in MHKW (biogener Abfall) und Pyrolyse (Klärschlamm) liegen nur für den gesamten Landkreis Marburg-Biedenkopf

<sup>22</sup> Anlagen, die nach dem 01.01.2010 errichtet worden sind.

<sup>23</sup> Anlagen, die aufgrund der deutschen Ausbauziele anteilig im Landkreis Marburg-Biedenkopf bis 2030 errichtet werden.

<sup>24</sup> Siehe auch: § 69b und § 93, EEG 2021

<sup>25</sup> Megawatt

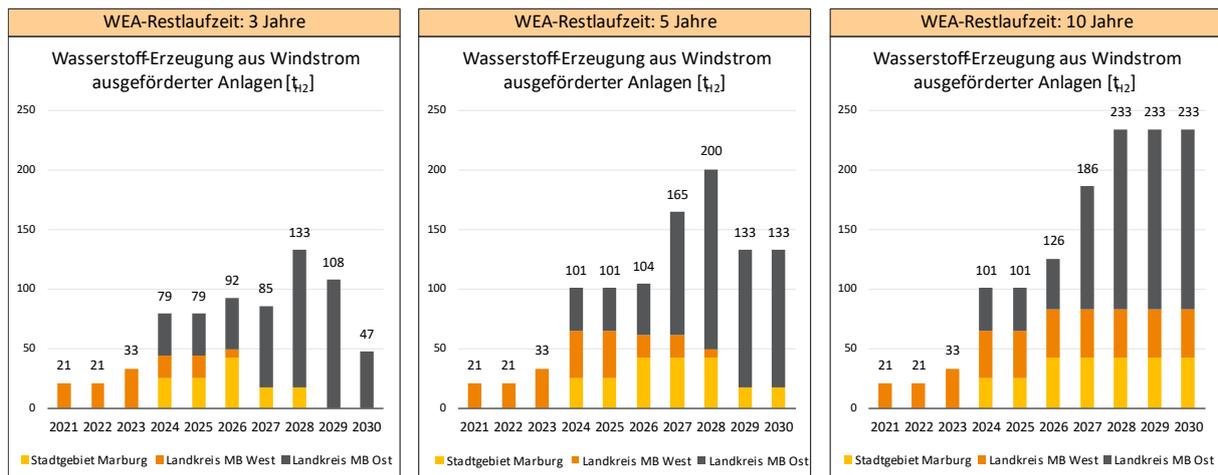


Abbildung 7: Wasserstofferzeugungspotenziale ausgeförderter Windkraft-Anlagen in Abhängigkeit von der Restlaufzeit der WEA-Anlagen 2021 bis 2030

Auch über die Stromerzeugung des Müllheizkraftwerkes Kassel ergeben sich relevante Wasserstofferzeugungspotenziale. Zwar steht das Kraftwerk nicht im Landkreis Marburg-Biedenkopf, allerdings werden jedes Jahr ca. 34.500 Tonnen Abfall (2020) aus dem Landkreis nach Kassel geliefert. Von den daraus erzeugten 17.940 MWh Strom wird die Hälfte für die Ermittlung von Wasserstoffmengen herangezogen. Dieser Anteil fußt auf der Annahme, dass 50 % des eingesetzten Abfalls biogenen Ursprungs ist. Über die Elektrolyse könnten so aus dem im MHKW Kassel erzeugten Strom ca. 170 Tonnen Wasserstoff pro Jahr erzeugt werden.

Neben den aufgeführten Pfaden für eine Wasserelektrolyse bietet die Dampfreformierung von Biogas hohe Potenziale in Marburg-Biedenkopf. Das Potenzial ausgeförderter Biogasanlagen beträgt 235 Tonnen Wasserstoff im Jahr 2030. Hier liegt die Annahme zugrunde, dass die Betreiber ausgeförderter Anlagen aus wirtschaftlichen Gründen nur selten die Anschlussförderung in Anspruch nehmen. Der Einsatz von Bestands- oder Neuanlagen für die Wasserstofferzeugung erscheint dagegen kurz- bis mittelfristig unwahrscheinlich, da die Betreiber über Ausschreibungen hohe Vergütungssätze für die Stromeinspeisung erzielen können.<sup>26</sup> Die Wasserstofferzeugung müsste folglich mit dem alternativ erzielbaren Strompreis konkurrieren, wodurch der Wasserstoff für Abnehmer zu teuer würde.

Pyrolyse- bzw. Thermolyse-/Hydrolyse-Technologien haben zwar noch nicht die Technologiereife wie Elektrolyse oder Dampfreformierung, ermöglichen jedoch die Entsorgung biogener und nicht-biogener Abfälle ohne die Freisetzung von gasförmigem CO<sub>2</sub><sup>27</sup> bei gleichzeitiger Herstellung von Wasserstoff. In Marburg-Biedenkopf gibt es Überlegungen, jährlich ankommende Klärschlamm-Mengen über Thermolyse/Pyrolyse-Verfahren für die Erzeugung von Wasserstoff zu nutzen. Im Rahmen der Potenzialanalyse wird abgeschätzt, wie hoch das Wasserstoffpotenzial ist. Im Jahr 2019 sind 6.041 Tonnen Klärschlamm angefallen, die zum Teil verbrannt und zum anderen Teil der regionalen Landwirtschaft als Dünger zur Verfügung gestellt wurden. Da Klärschlamm als Vielstoffgemisch sehr inhomogen und mit stark schwankenden Anteilen zusammengesetzt ist, wird eine vom Umweltbundesamt definierte Standardzusammensetzung zugrunde gelegt<sup>28</sup>. Laut Expertenbefragung können zudem nahezu 100 % des enthaltenen Wasserstoffes extrahiert werden. Dafür muss die Betriebstemperatur der Thermolyse/Pyrolyse allerdings jenseits der 900 Grad Celsius liegen. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren lassen sich aus dem vorhandenen Klärschlamm 242 tH<sub>2</sub>/a gewinnen.

<sup>26</sup> Durchschnittlicher, mengengewichteter Zuschlagswert Gebotstermin März 2021: 17.02 ct/kWh  
[https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/Ausschreibungen/Biomasse/BeendeteAusschreibungen/start.html;jsessionid=6E0E8F165BBC714932F3DBCE24A5C8AF](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Biomasse/BeendeteAusschreibungen/start.html;jsessionid=6E0E8F165BBC714932F3DBCE24A5C8AF)

<sup>27</sup> Kohlenstoffdioxid

<sup>28</sup>[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2018\\_10\\_08\\_uba\\_fb\\_klaerschlamm\\_bf\\_low.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2018_10_08_uba_fb_klaerschlamm_bf_low.pdf)

## **Wasserstoffbedarfe**

Für die Ermittlung der Wasserstoffbedarfe werden die zwei Szenarien "Regulatorik" und "Klimaziele" erstellt. Das Szenario "Regulatorik" orientiert sich an den bestehenden regulatorischen Vorgaben und leitet daraus die Wasserstoffbedarfe ab. Für das Szenario "Klimaziele" werden die Wasserstoffbedarfe für 2030 aus wissenschaftlichen Studien abgeleitet, die eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von mindestens 95 Prozent bis 2050 vorsehen<sup>29</sup>.

Für die Sektoren *Industrie* und *Energie* ist keine Potenzialanalyse durchgeführt worden, da hier eine "manuelle" Analyse einzelner Industrieunternehmen oder Kraftwerke durchgeführt werden müsste. Diese Arbeitsschritte könnten bspw. Bestandteil eines HyExperts-Projektes sein. Die Potenzialanalyse beschränkt sich daher auf die Analyse der Sektoren Verkehr und Wärme.

### *Wasserstoffbedarf im Sektor Verkehr*

Im Sektor Verkehr berücksichtigt das Szenario "Regulatorik" zwei Vorschriften: Die Clean Vehicles Directive und die EU-Flottenverordnung. Die CVD ist eine europäische Richtlinie, die Quotenvorgaben für die Beschaffung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen durch die öffentliche Hand macht. Mittlerweile ist sie in das Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz (SaubFahrzeugBeschG) und damit in deutsches Recht überführt worden, welches am 15.06.2021 in Kraft getreten ist. Die Quoten formulieren einen Mindestanteil an sauberen<sup>30</sup> und emissionsfreien<sup>31</sup> Fahrzeugen. Beispielsweise gilt für den Bereich der Busse für die Periode vom 02.08.2021 bis 31.12.2025 eine Mindestquote von 45 Prozent an sauberen Bussen – die Hälfte davon muss emissionsfrei sein. Für die Periode vom 01.01.2026 bis zum 31.12.2030 wird der Wert auf 65 Prozent angehoben. Auch in dieser Periode muss mindestens die Hälfte der Busse emissionsfrei sein. Folglich löst das SaubFahrzeugBeschG einen Handlungsdruck bei den Verkehrsunternehmen aus.

Über die sogenannte EU-Flottenverordnung werden die Automobilhersteller verpflichtet, den CO<sub>2</sub>-Emissionsdurchschnitt neuer Pkw sowie leichter und schwerer Nutzfahrzeuge zu verringern. Zudem müssen die Hersteller einen vorgegebenen Anteil emissionsfreier und emissionsarmer Fahrzeuge je Segment verkaufen. Folglich löst die Verordnung einen Handlungsdruck bei den Fahrzeugherstellern aus.

Aus beiden Verordnungen lassen sich keine direkten Vorgaben zur Beschaffung von Brennstoffzellenfahrzeugen ableiten. Es ist jedoch davon auszugehen, dass ein Anteil der emissionsfreien Fahrzeuge einen Brennstoffzellenantrieb haben wird. Da der Anteil der Brennstoffzellenfahrzeuge je nach Fahrzeugklasse unterschiedlich ausfallen wird, konnten die Akteur\*innen der Region für die Potenzialanalyse dies individuell determinieren.

Im Szenario "Klimaziele" werden die Bedarfe im Landkreis Marburg-Biedenkopf mittels des TM95-Szenarios<sup>32</sup> der dena-Leitstudie<sup>33</sup> als Referenz ermittelt. Über den Anteil des Landkreises an den deutschlandweiten Neuzulassungen<sup>34</sup> in den Jahren 2014 bis 2019 wird die Anzahl von Brennstoffzellenfahrzeugen im Landkreis Marburg-Biedenkopf im Jahr 2030 abgeleitet. Analog zum Szenario *Regulatorik* werden daraufhin die Fahrleistungen und somit der Wasserstoffbedarf der

---

<sup>29</sup> Studien mit dem Ziel Treibhausgasneutralität 2045 sind noch nicht verfügbar.

<sup>30</sup> Nutzung alternativer Kraftstoffe wie Strom, Wasserstoff, Biokraftstoffe, synthetische und paraffinhaltige Kraftstoffe oder Gas (CNG, LNG, LPG, Biomethan).

<sup>31</sup> Fahrzeuge mit reinen Elektroantrieben (z. B. batterieelektrische oder Brennstoffzellen-Antriebe).

<sup>32</sup> Das EL95-Szenario (Elektrifizierung) beschreibt ebenfalls einen Pfad, der zur Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 Prozent führt. Für die folgenden Analysen im Verkehrssektor wird lediglich das TM95-Szenario (Technologiemix) herangezogen.

<sup>33</sup> Siehe <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailsansicht/pub/dena-leitstudie-integrierte-energiewende-ergebnisbericht/>

<sup>34</sup> Basis sind Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes.

Brennstoffzellenfahrzeuge bestimmt. Die sich ergebenden Wasserstoffbedarfe sind in Abb. 8 dargestellt.

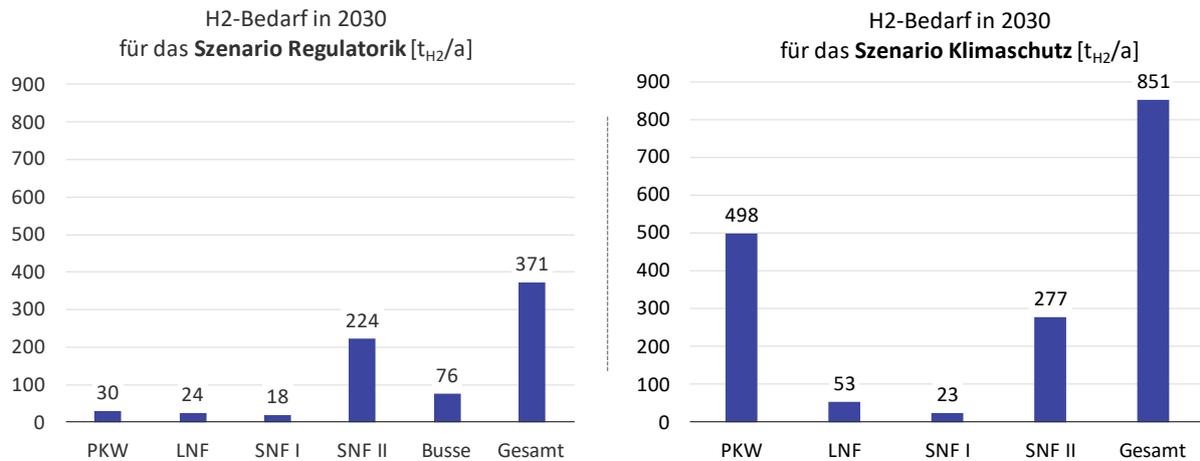


Abbildung 8: Wasserstoffnachfragepotenziale im Sektor Verkehr in den beiden Szenarien "Regulatorik" (links) und "Klimaschutz" (rechts).<sup>35,36,37</sup>

Die Ergebnisse zeigen, dass die Bedarfe im Szenario "Klimaschutz" die Bedarfe im Szenario "Regulatorik" um mehr als das Doppelte übersteigen (851 t<sub>H2</sub>/a gegenüber 371 t<sub>H2</sub>/a). Daraus ist abzuleiten, dass das bestehende regulatorische System nicht ausreichen wird, um die notwendigen Mengen zum Erreichen der Klimaziele anzureizen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die dena-Leitstudie optimistische Annahmen für die Zulassungen von Brennstoffzellen-Pkw im Jahr 2030 trifft. Die aktuellen Marktentwicklungen und Ankündigungen der Automobilhersteller lassen eher darauf schließen, dass die Brennstoffzelle mittelfristig vorrangig in den schweren Fahrzeugklassen (LNF, SNF, Busse) eingesetzt werden soll.

#### Exkurs: Schienenverkehr im Landkreis Marburg-Biedenkopf

Neben dem Straßenverkehr wird im Landkreis Marburg-Biedenkopf auch der potenzielle Wasserstoffbedarf im Schienenverkehr untersucht. In der Region Marburg-Biedenkopf liegt das sogenannte Nordwesthessen-Zugstreckennetz, das mit rund 546.000 Zugkilometern pro Jahr<sup>38</sup> frequentiert wird. Federführend in der Erbringung der SPNV<sup>39</sup>-Leistungen ist der Nordhessische Verkehrsverbund mit den Juniorpartnern RMV (Rhein-Main-Verkehrsverbund) und Zweckverband Nahverkehr Westfalen-Lippe. Gegenwärtig ist der Betrieb des Netzes bis Dezember 2032 vergeben und erfolgt mithilfe von Dieseltriebzügen. Da das Netz nicht elektrifiziert ist, eignet es sich laut vorsichtiger Experteneinschätzung aus der Region potenziell für den Einsatz von Brennstoffzellenzügen. Detailprüfungen des Netzes wurden an dieser Stelle nicht vorgenommen. Analog zur Untersuchung des Straßenverkehrs werden die beiden Szenarien "Regulatorik" und "Klimaschutz" angewendet. Derzeit gibt es jedoch keine regulatorischen Vorgaben, die SPNV-Betreibern eine Umstellung auf emissionsarme/-freie Antriebe vorschreibt. Im Szenario "Klimaschutz" wird die technologische Entwicklung anteilig an der Verkehrsleistung ermittelt. So beträgt in der dena-Leitstudie der Anteil von Brennstoffzellen-Zügen an der Verkehrsleistung im Jahr 2030 zwei Prozent, im Jahr 2050 vier Prozent<sup>40</sup>. Werden diese Szenarien auf das

<sup>35</sup> LNF = Leichte Nutzfahrzeuge (< 3,5 Tonnen zulässiges Gesamtgewicht (zGG))

<sup>36</sup> SNF = Schwere Nutzfahrzeuge [SNF I: 3,5 – 12 Tonnen zGG; SNF II: > 12 Tonnen zGG]

<sup>37</sup> Busse werden in der dena-Leitstudie nicht gesondert ausgewiesen. Legt man das Fahrzeuggewicht zugrunde, fallen sie in die Kategorie SNF II.

<sup>38</sup> Expertenangabe

<sup>39</sup> Schienenpersonennahverkehr

<sup>40</sup> Annahme: Die Verkehrsleistung bleibt über die Zeit unverändert.

Nordwesthessen-Netz übertragen, ergibt sich daraus ein Wasserstoffbedarf von 2,52 t<sub>H2</sub> im Jahr 2030 (vgl. Abbildung 9; rechts Ergänzung um den Ausblick bis 2050, da das Zugnetz erst 2032 für einen neuen Dienstleister ausgeschrieben wird)<sup>41</sup>.

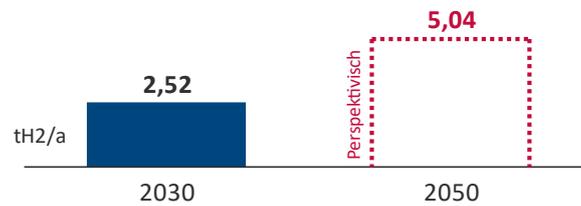


Abbildung 9 : Wasserstoffpotenzial Nordwesthessen-Netz im Szenario „Klimaschutz“

Bei Umstellung des gesamten Nordwesthessen-Netzes auf Züge mit Brennstoffzelle ergäbe sich ein Bedarf von 126 t<sub>H2</sub>/a.

#### Wasserstoffbedarf im Sektor Wärme

Aus der bestehenden Regulatorik heraus lassen sich zurzeit keine direkten Anreize erkennen, die eine Nutzung von Wasserstoff zur Wärmeversorgung indizieren würden. Folglich wird lediglich das Szenario „Klimaschutz“ erstellt. Analog zum Verkehrssektor wird ebenfalls die dena-Leitstudie (TM95-Szenario) für die Ableitung der Wasserstoffbedarfe herangezogen. Im Jahr 2030 sollen neun TWh<sub>H2</sub> der gesamten Gasnachfrage (812 TWh<sub>Gas</sub>) durch Wasserstoff-Beimischung bereitgestellt werden (Anteil ≈ 1,11 %). Der Gasbedarf sinkt laut der Studie verglichen mit dem Basisjahr 2015 um 0,73 %. Für den Landkreis Marburg-Biedenkopf resultiert dieser Rückgang in einer Gasnachfrage in Höhe von 2.274.557 MWh im Jahr 2030<sup>42</sup>. Der Wasserstoffbedarf beträgt demnach 756 t<sub>H2</sub> im Jahr 2030 (vgl. Abb. 10). Dieser Wert ist insofern bemerkenswert, da er die gesamten Bedarfe des Verkehrssektors im Szenario „Regulatorik“ übersteigt. Gleichzeitig macht der Wert deutlich, welchen großen Einfluss schon eine anteilig geringe Beimischung von Wasserstoff auf die Nachfrage haben kann.

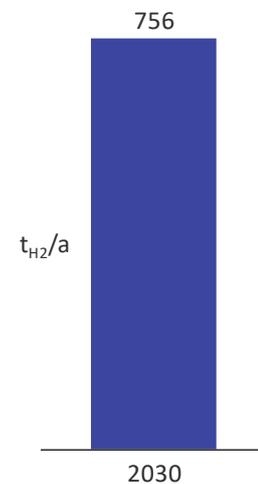


Abbildung 10: Wasserstoff-Bedarf n der Wärme im Landkreis Marburg-Biedenkopf im Jahr 2030

#### Abgleich Wasserstofferzeugung und -bedarfe

Der Abgleich der Wasserstofferzeugungs- und der -nachfragepotenziale zeigt, dass die Erzeugungspotenziale die Nachfrage in Marburg-Biedenkopf übersteigen. Im Szenario „Regulatorik“ übersteigen die Erzeugungspotenziale die Nachfragepotenziale um über 1.300 t<sub>H2</sub>. Dienen die deutschen Klimaschutzziele als Orientierung für die Entwicklung der Wasserstoffbedarfspotenziale, sinkt die Differenz auf ca. 150 t<sub>H2</sub>. Bei der Betrachtung der Differenzen sind die fehlenden Bedarfe aus den Sektoren Industrie und Energiewirtschaft zu berücksichtigen, die, je nach Industriestruktur, hoch ausfallen können. Die im vergangenen Jahr (2020) von der Bundesregierung veröffentlichte Nationale Wasserstoffstrategie erwartet für Deutschland eine inländische Produktion von ca. 15 % für den Wasserstoff, der im Jahr 2030 national nachgefragt wird (die übrigen 85 % sollen über Importe bereitgestellt werden). Übertragen auf Marburg-Biedenkopf bedeutet dies, dass drei (Szenario „Regulatorik“) bis 14 % (Szenario „Klimaschutz“) der ermittelten Erzeugungspotenziale der Region bis 2030 gehoben werden müssen.

<sup>41</sup> Referenz-Technologie: Alstom Coradia iLint [Verbrauch: ~ 0,23 kg<sub>H2</sub>/km]

<sup>42</sup> 2015: 2.291.364 MWh

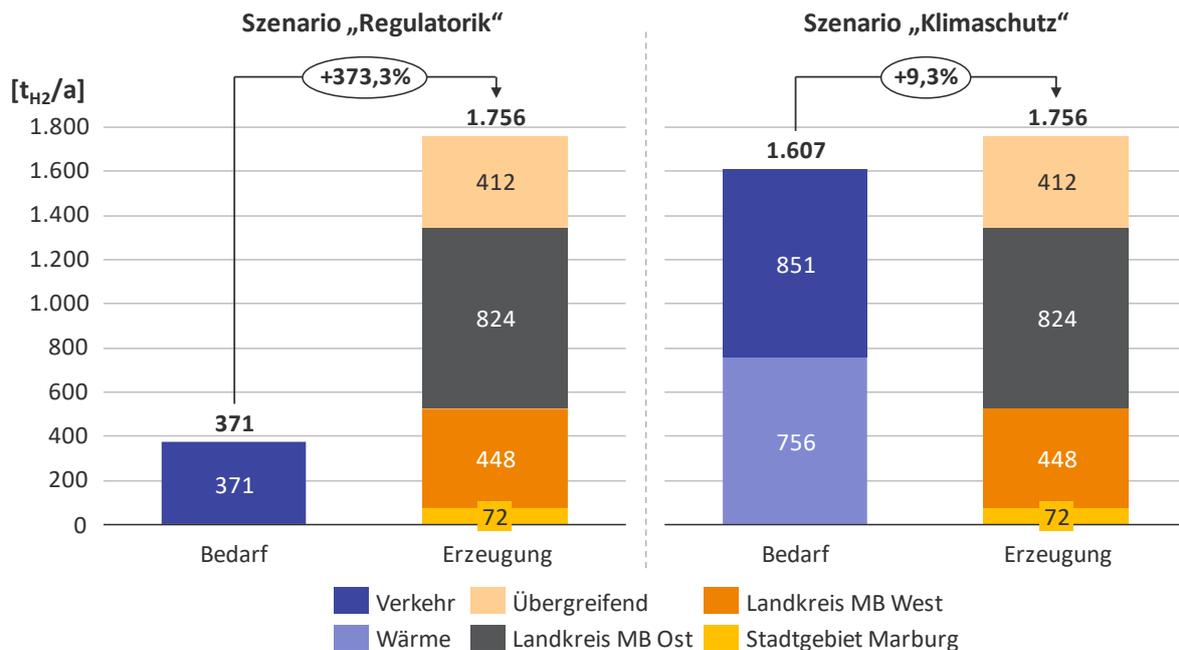


Abbildung 11: Gegenüberstellung der Wasserstoffherstellungs- und -nachfragepotenziale des Landkreises Marburg-Biedenkopf in den Szenarien „Regulatorik“ und „Klimaschutz“ im Jahr 2030

### Wasserstoffinfrastruktur

Um die Erzeugungs- und Nachfragepotenziale in Marburg-Biedenkopf miteinander zu verknüpfen, wird die Errichtung einer Wasserstoffinfrastruktur notwendig sein. Grundsätzlich gibt es zwei Varianten des physikalischen Wasserstofftransportes<sup>43</sup>. Er kann gasförmig und flüssig erfolgen. Bei Umgebungstemperatur und Normaldruck liegt Wasserstoff gasförmig vor und kann per Trailer oder Pipeline transportiert werden:

- Sogenannte Tube-Trailer transportieren circa 500 kg<sub>H2</sub> mit einem Druck von 200 bis 250 bar. In Container-Trailern hingegen wird Wasserstoff auf bis zu 500 bar verdichtet, sodass circa 1.000 kg<sub>H2</sub> mit einem Trailer transportiert werden können. Ein Trailer-Transport hat die Vorteile, dass er vergleichsweise wenig kapitalintensiv ist und schnell und flexibel aufgebaut werden kann.
- Daneben kann Wasserstoff analog zu Erdgas in Pipelines transportiert werden. Hierfür kann er einerseits in existierende Gasnetze beigemischt oder in reinen – neu zu errichtenden – Wasserstoffnetzen transportiert werden. Die Beimischung von Wasserstoff in bestehende Gasnetze ist aktuell in der Regel auf Werte kleiner zehn Volumenprozent beschränkt. Je nach örtlichen Gegebenheiten kann der Wert in Einzelfällen teilweise überschritten, teilweise jedoch auch nicht vollständig ausgeschöpft werden. Zum einen muss der Wobbe-Index<sup>44</sup>, die Methanzahl und die relative Dichte des Gasgemisches weiterhin in einem vom DVGW<sup>45</sup> vorgegebenen Bereich liegen. Zum anderen gibt es vereinzelt sensible Gasverbraucher, die eine geringere Toleranzgrenze für die Wasserstoffbeimischung aufweisen, wodurch die Wasserstoffbeimischung begrenzt wird.

<sup>43</sup> Wasserstoff kann auch in stofflicher Form (Methanol, Ammoniak oder aromatische Träger, die hydriert werden) gespeichert und transportiert werden. Dieser Weg befindet sich zum Teil allerdings noch im Forschungs- und Erprobungsstadium. Zudem gehen die stoffliche Speicherung und der Transport mit hohen Wandlungsverlusten einher, die die kurzen Distanzen und kleinen Mengen in regionalen Wasserstoffsystemen nicht rechtfertigen. Aus den genannten Gründen wird dieser Weg nicht berücksichtigt.

<sup>44</sup> Quotient aus dem Heizwert eines Gasgemisches und der Quadratwurzel der relativen Dichte. Der Index ist ein Kennwert für die Austauschbarkeit von Gasen hinsichtlich der Wärmebelastung der Gasgeräte.

<sup>45</sup> Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.

Um Wasserstoff zu verflüssigen, muss er auf mindestens  $-240^{\circ}$  Celsius heruntergekühlt werden. Die Verflüssigung bietet den Vorteil, dass die Speicherdichte im Vergleich zum komprimierten gasförmigen Wasserstoff steigt: Verflüssigter Wasserstoff bei 1 bar und  $-253^{\circ}$  Celsius hat eine circa dreimal höhere Energiedichte als gasförmiger Wasserstoff bei 350 bar und  $15^{\circ}$  Celsius. Die Kühlung des Wasserstoffes ist jedoch sehr energieaufwendig<sup>46</sup>. Für den Überseetransport per Schiff wird beispielsweise die Verflüssigung von Wasserstoff erprobt, da hohe Energiedichten ein wesentliches Wirtschaftlichkeitskriterium sind.

Wie in Abb. 12 dargestellt, sind die Wasserstofftransportkosten und der kostengünstigste Pfad insbesondere von den zu transportierenden Mengen und der Transportdistanz abhängig.

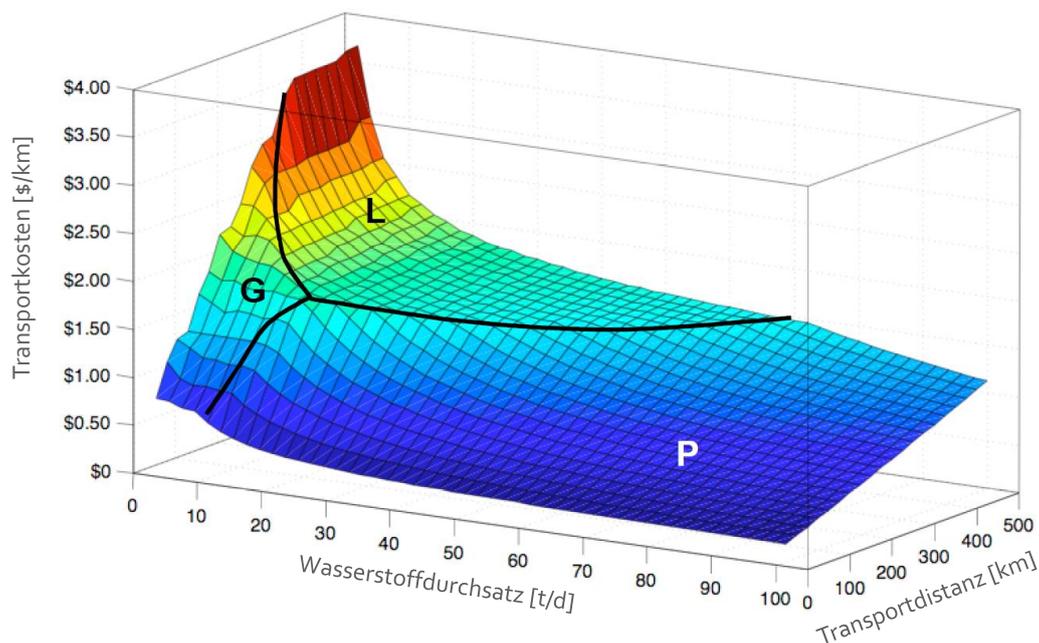


Abbildung 12: Wasserstofftransportkosten in Abhängigkeit von Durchsatz und Transportdistanz.<sup>47,48</sup>

Vor allem in der Aufbauphase einer Wasserstoffwirtschaft in der Region Marburg-Biedenkopf werden die Wasserstofftransportmengen zunächst eher gering und die Transportdistanzen im Regelfall kleiner 100 km sein. Folglich wird kurz- bis mittelfristig der gasförmige Wasserstofftransport per Trailer die wirtschaftlichste Option sein. Erst perspektivisch und bei hohen Mengen werden Pipelinesysteme in der Region wirtschaftlich konkurrenzfähig. Überregionale Transporte hingegen werden aufgrund höherer Transportdistanzen und Wasserstoffdurchsätze auch in der Aufbauphase zu Teilen verflüssigt oder gasförmig per Pipeline erfolgen. Beispielsweise planen die europäischen Fernleitungsnetzbetreiber ein sogenanntes "European Hydrogen Backbone", welches europaweit die großen Nachfragezentren verbinden soll.<sup>49</sup>

Im Sektor Verkehr werden öffentliche Wasserstofftankstellen und Wasserstofftankstellen auf nicht öffentlich zugänglichen Gebieten – z.B. Betriebshöfen – das Bindeglied zwischen Erzeugung und Verbrauch sein. Die Belieferung wird im Jahr 2030 aufgrund der noch überschaubaren Mengen voraussichtlich per Trailer erfolgen. In Abhängigkeit der Tankstellengrößen wird eine unterschiedliche

<sup>46</sup> Für die Verflüssigung von Wasserstoff sind circa 30 Prozent des Wasserstoffenergiegehaltes notwendig.

<sup>47</sup> Quelle: UC Davis, C. Yang und J. Moan (2008): Determining the Lowest-Cost Hydrogen Delivery Mode.

<sup>48</sup> G = Trailer-Transport von gasförmigem H<sub>2</sub>; L = Trailer-Transport von flüssigem H<sub>2</sub>; P = Transport per Pipeline

<sup>49</sup> Quelle: Guidehouse (2020): European Hydrogen Backbone, How a dedicated Hydrogen Infrastructure can be created. Im Auftrag der europäischen Fernleitungsnetzbetreiber.

Anzahl notwendig sein. In der Maximalausprägung (Szenario "Klimaschutz" und XS-Tankstellen<sup>50</sup>) sind dies 30 und in der Minimalausprägung (Szenario "Regulatorik" und L-Tankstellen) ist es eine Tankstelle (vgl. Tab. 1).

Tabelle 1: Anzahl von Wasserstofftankstellen (HRS<sup>51</sup>) in Abhängigkeit von Szenario und Tankstellengröße<sup>52</sup>

	Tankstellenvariante			
	Sehr klein: XS	Klein: S	Mittelgroß: M	Groß: L
Zapfpunkte	1	1	2	4
<b>Max. Durchsatz</b>				
Pro Tag:	80 kg	212 kg	420 kg	1.000 kg
Pro Jahr:	29.200 kg	77.380 kg	153.300 kg	365.000 kg
<b>Bedarf an HRS in Marburg -Biedenkopf</b>				
Szenario Regulatorik:	13	5	2	1
Szenario Klimaschutz:	30	11	6	3

## Annahmen zur Analyse der Wasserstoffpotenziale des Landkreises Marburg-Biedenkopf

### Wasserstoffherzeugung

Tabelle 2: Parameter für die Ermittlung der Wasserstoffherzeugungspotenziale

	Wirkungsgrad	Verhältnis Energieeinsatz					
<b>Elektrolyse</b>	63 %						
<b>Dampfreformierung</b>		1,81 kWh <sub>H<sub>2</sub></sub> /kWh <sub>el</sub>					
	Energieträger	Verfahren	(Rest-) Wirkungsgrad	Volllaststunden p. a.	Restlaufzeit	Minimale Anlagengröße	Verfügbarkeit für H <sub>2</sub> -Erzeugung
<b>Ausgeförderte Anlagen</b>	Wind	EL <sup>53</sup>	95 %	2.200	10 Jahre	alle	30 %
	PV	EL	80 %	900	10 Jahre	> 0,1 MW	60 %
	Biomasse	DF <sup>54</sup>	100 %	7.000	10 Jahre	> 0,1 MW	10 %
<b>Bestehende Anlagen</b>	Wind	EL	100 %	2.200	20 Jahre	> 0,1 MW	5 %
	PV	EL	100 %	900	20 Jahre	> 0,1 MW	5 %
	Biomasse	DF	100 %	7.000	20 Jahre	> 0,1 MW	0 %
	MHKW	EL	100 %	.. <sup>55</sup>	20 Jahre	-	50 %
<b>Neue Anlagen</b>	Wind	EL	100 %	2.200	20 Jahre	alle	10 %
	PV	EL	100 %	900	20 Jahre	> 0,1 MW	5 %
	Biomasse	DF	100 %	7.000	20 Jahre	alle	5 %

### Wasserstoffnutzung im Verkehr

<sup>50</sup> Definition nach H2Mobility Deutschland GmbH & Co.KG, Berlin

<sup>51</sup> Hydrogen refuelling station

<sup>52</sup> Klassendefinition anhand „Wuppertal Institut (2017): Shell Wasserstoff-Studie – Energie der Zukunft? Im Auftrag der Shell Deutschland Oil GmbH“.

<sup>53</sup> EL: Elektrolyse.

<sup>54</sup> DF: Dampfreformierung.

<sup>55</sup> Berechnung über die jährlich erzeugten Strommengen.

Tabelle 3: Quoten von Brennstoffzellenfahrzeugen an emissionsarmen/-freien Fahrzeugen im Szenario „Klimaziele“

Fahrzeugklasse	In den Jahren 2021 – 2025	In den Jahren 2026 – 2030
PKW	0,5 %	1,0 %
LNF [bis 3,5 t zzG]	3,0 %	4,0 %
SNF I [3,5 – 12 t zzG]	12,5 %	50,0 %
SNF II [ab 12 t zzG]	12,5 %	50,0 %
Busse	5 %	20,0 %

## 8.2. Simulation des Technologiekonzeptes der Region Marburg-Biedenkopf

Auf Basis der Kostenannahmen der Komponenten werden im Folgenden die Potenziale des Technologiekonzeptes der Region beschrieben und die Ergebnisse der Simulation und der Optimierung vorgestellt. Das zu untersuchende System stellt das Konzept der Region Marburg-Biedenkopf dar, welches unter Berücksichtigung der Vorgaben der Region vom Reiner Lemoine Institut in eine valide Topologie überführt und mit dem Simulationsframework SMOOTH<sup>56</sup> simuliert und optimiert wurde.

### Annahmen

Die Annahmen der Kosten beziehen sich ausschließlich auf die Komponenten.

Komponente	Technische Daten <sup>57</sup>	Wirtschaftliche Daten <sup>58</sup>
Dampfreformierung + Gasreinigung	Lebensdauer: 20 a	CAPEX <sup>59</sup> : $0,3326 \cdot \ln(m_{H_2}) + 1,0251$ OPEX <sup>60</sup> : 0,1 % der CAPEX
Elektrolyseur	Lebensdauer: 21 a Emissionen: 31.75 kg CO <sub>2</sub> äqui./kW	CAPEX: 840 €/kW OPEX: 4 % der CAPEX
Wasserstoffspeicher	Lebensdauer: 40 a Emissionen: $68/5 + 3/1750 p_{max}$ kg CO <sub>2</sub> äqui./kg	CAPEX: $0,5393 p_{max} + 604,6$ €/kg OPEX: 1 % der CAPEX
Kompressor	Lebensdauer: 30 a Emissionen: -	CAPEX: $28.063 m_{flow max}^{0,6378}$ € OPEX: 3 % der CAPEX
Stromnetz	Emissionen: 421 g CO <sub>2</sub> äqui./kWh	Kosten: 18,55 ct/kWh
Gasnetz	Emissionen: 202 g CO <sub>2</sub> äqui./kWh	-
Wasserstoffnetz	-	9,50 €/kg (brutto)

### Vorstellung der Modellierung

<sup>56</sup> <https://github.com/rl-institut/smooth>

<sup>57</sup> Eigene Recherchen

<sup>58</sup> Quelle: NOW

<sup>59</sup> Capital expenditure (Investitionskosten)

<sup>60</sup> Operational expenditure (Betriebskosten)

Ziel ist es, die Wasserstoffherzeugung aus Biogasanlagen in der Region Marburg-Biedenkopf zu analysieren und zu bewerten. Dazu wird das RLI<sup>61</sup>-eigene Simulationstool SMOOTH verwendet. Das Tool ermöglicht die Modellierung eines Energiesystems auf Komponentenbasis. Einzelne Komponenten (Speicher, Dampfreformierer, etc.) sind mit physikalischen Grundgleichungen als Modelle zur Benutzung verfügbar. Diese Komponenten werden in verschiedenen Bilanzkreisen (Strom, Wasserstoff, etc.) verschaltet, um das Gesamtsystem darzustellen. Die Simulation des Gesamtsystems erfolgt in stündlichen Zeitschritten.

### Modell Wasserstoffherzeugung aus Biogas

In der Region Marburg-Biedenkopf gibt es eine Reihe von Biogasanlagen, die aktuell zur Stromerzeugung und Wärmeversorgung verwendet werden. Besonders zu erwähnen sind dabei die Anlagen in Kombination mit den Bioenergiehöfen. Dabei werden die lokalen Biogasanlagen für die Wärme- und Stromerzeugung der Bioenergiehöfe verwendet. Mit der Simulation wird nun ein Energiesystem modelliert, durch welches das produzierte Biogas zu Wasserstoff umgewandelt wird. Der produzierte Wasserstoff wird auf ein Druckniveau von 200 bar gebracht, um anschließend in diversen Abnahmepfaden eingesetzt zu werden.

Der Umwandlungsprozess von Biogas zu Wasserstoff wird als Dampfreformierung mit anschließender Gasreinigung modelliert. Abb. 13 zeigt das modellierte Konzept.

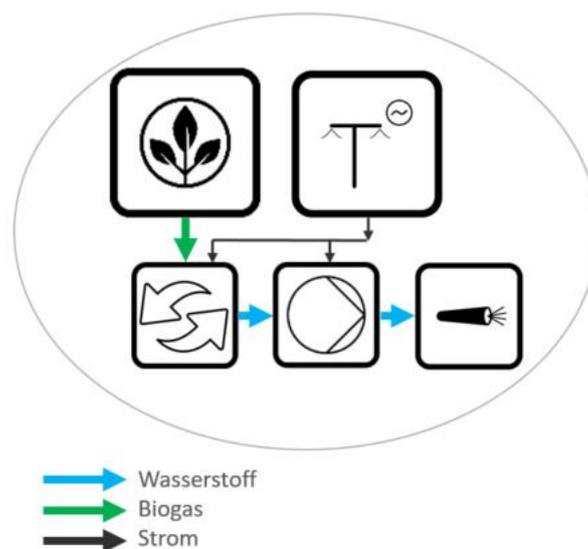


Abbildung 13: Modell des Energiesystems zur Wasserstoffherzeugung aus Biogas

Das Modell besteht aus folgenden Komponenten:



Biogasanlage, Produktionskosten: 35 ct/m<sup>3</sup> Biogas



Netzanschluss zur Stromversorgung der technischen Anlagen (Dampfreformierung, Verdichtung, Reinigung)



Dampfreformierungsanlage mit anschließender Gasreinigung, Reinheit des Wasserstoffes nach Reinigung: 5.0

<sup>61</sup> Reiner Lemoine Institut



Kompressor zur Verdichtung auf 200 bar Enddruckniveau



Weiterverwendung des Wasserstoffes: Verkauf in Flaschenbündeln, Direktversorgung Tankstelle, etc.

### Betrachtete Anlagen und Eingangsgrößen

In der Region Marburg-Biedenkopf wurden insgesamt acht Biogasanlagen betrachtet. Abb. 14 zeigt die geographische Lage der Anlagen im Landkreis.

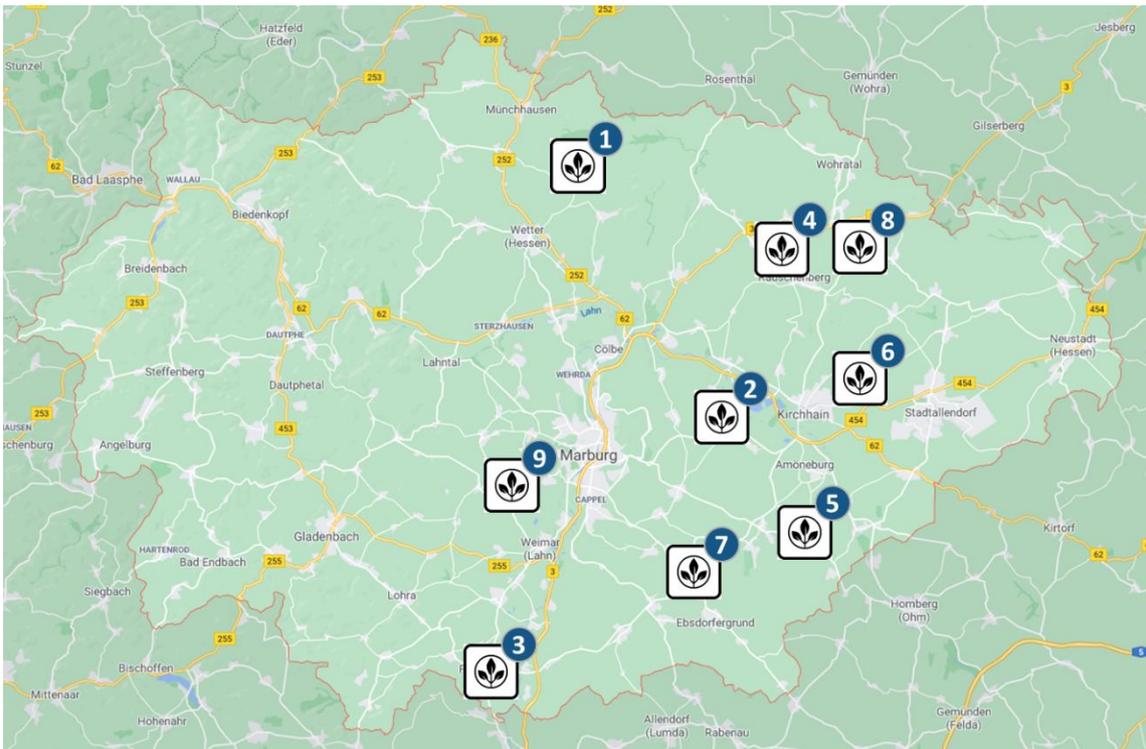


Abbildung 14: Betrachtete Biogasanlagen im Landkreis Marburg-Biedenkopf

Die Produktionskapazitäten für Biogas und damit Eingangsgrößen der Anlagen für die Simulation sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Produktionskapazitäten (Biogas) der betrachteten Anlagen

ID	Biogas Mio. m <sup>3</sup> /a
1	3,5

2	2,3
3	2,1
4	2,0
4	2,2
5	4,4
6	2,0
7	5,6
8	4,3
9	1,0

### Ergebnisse

Alle Anlagen wurden nach dem oben beschriebenen Modell simuliert und die Produktionskapazitäten sowie Kosten für die Wasserstoffherzeugung bestimmt. Die bestimmten Wasserstoffmengen beziehen sich auf eine vollständige Umstellung der Anlage auf Wasserstoff, d.h. die verfügbare Gesamtmenge Biogas (vgl. Tabelle 5) wird in Wasserstoff umgewandelt.

Die Wasserstoff-Gestehungskosten sind ermittelte Annuitäten für die benötigten Komponenten zur Umstellung auf die Wasserstoffherzeugung (Dampfreformation, Gasreinigung, Verdichtung) sowie deren Wartungs- und Betriebskosten.

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der Simulation:

*Tabelle 5: Simulationsergebnisse der Biogasanlagen*

ID	Produktionsmenge Biogas	Produktionsmenge Wasserstoff	H <sub>2</sub> -Gestehungs- kosten (gesamt)
	Mio. m <sup>3</sup> /a	kg/a	€/kg
1	3,5	380.625	5,21
2	2,3	250.125	5,41
3	2,1	228.375	5,45
4	2,0	218.587	5,46
4	2,2	239.250	5,42
5	2,2	478.500	5,42
5	2,2	478.500	5,42
6	2,0	217.500	5,47
7	5,6	609.000	5,06
8	4,3	467.625	5,14
9	1,04	113.100	5,25

Insgesamt besitzen die betrachteten Biogasanlagen in der Region ein Potenzial zur Produktion von 3.202.687 kg Wasserstoff pro Jahr.

Zur besseren Einordnung dieser Größenordnung werden verschiedene Abnahmeszenarien aufgestellt, die mit dieser Menge an Wasserstoff versorgt werden können. Dies sind rein fiktive Szenarien zur besseren Verdeutlichung des Potenzials und stellen keine konkreten Projektideen oder Abnahmepfade der Region dar.

Das Produktionspotenzial der regionalen Biogasanlagen von rund 3.200 Tonnen Wasserstoff pro Jahr ist für folgende Abnahmemöglichkeiten aus dem Mobilitätssektor einsetzbar:

- Bis zu zwölf Wasserstoff-Tankstellen vom Typ „Large“ (Definition nach H2Mobility), entspricht der Versorgung von rund 2.000 Brennstoffzellen-Pkw oder 27 Brennstoffzellen-Lkw;
- Bis zu 100 Brennstoffzellenzüge vom Typ Alstom Coradia iLint mit jeweils 300 km Tagesfahrleistung;
- Bis zu 500 Brennstoffzellenbusse (H<sub>2</sub>-Verbrauch: 7,3 kg/100km) mit jeweils 250 km Tagesfahrleistung.

### Detailbetrachtung Bioenergiedorf

Da viele der betrachteten Biogasanlagen für die Strom- und Wärmebereitstellung von Bioenergiedörfern eingesetzt werden, wird eine Detailbetrachtung vorgenommen, wie ein solches Technologiekonzept aussehen könnte.

Abbildung 15 zeigt den schematischen Aufbau eines Technologiekonzeptes zur zukünftigen Versorgung von Bioenergiedörfern und gleichzeitiger Wasserstoffproduktion.

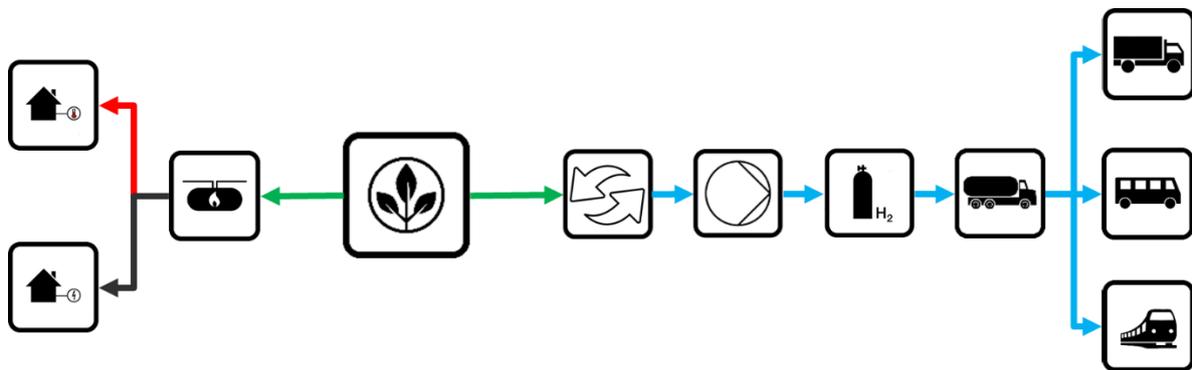


Abbildung 15: Modell des Technologiekonzeptes für Bioenergiedörfer

Dabei wird das produzierte Biogas zu einem Teil für die Strom- und Wärmeversorgung mittels BHKW<sup>62</sup> eingesetzt. Der übrige Anteil wird zur Wasserstoffproduktion eingesetzt. Die Abnahmepfade auf der rechten Seite sind wieder beispielhafte Mobilitätsabnehmer, die den produzierten Wasserstoff verwenden können.

In der aktuellen Verwendung der Biogasanlagen im Zusammenhang mit Bioenergiedörfern werden die Produktionskosten für das Biogas hauptsächlich durch die Einspeisevergütung aus dem EEG durch eingespeisten Strom aus den BHKW getragen.

In dem Zukunftsszenario fallen diese Einnahmen weg, weil die durch das EEG geregelte Einspeisevergütung aller betrachteten Anlagen zwischen 2024 und 2031 ausläuft. Damit müssen neue Einnahmequellen, zum Beispiel aus dem Verkauf von Wasserstoff, diese Einnahmeausfälle kompensieren. Zur Betrachtung dieses Zusammenhanges werden die bisherigen Einnahmen aus der EEG-Vergütung einem zukünftigen Wasserstoffverkauf gegenübergestellt. Der erzielbare Wasserstoffpreis wird mit 7,98 €/kg netto (9,50 €/kg brutto) angenommen, da dies der aktuell

<sup>62</sup> Blockheizkraftwerk

festgesetzte Preis an bestehenden Wasserstofftankstellen in Deutschland ist. Mögliche Preisentwicklungen des Wasserstoffes werden in dieser Modellrechnung nicht berücksichtigt. Die betrachtete Beispielanlage hat eine Produktionskapazität von 4,4 Mio. m<sup>3</sup> Biogas.

Abb. 16 zeigt die ermittelten Einnahmen für die Einspeisevergütung nach EEG mit einem angenommenen Preis von 18,5 ct/kWh im Vergleich zum verkauften Wasserstoff mit 7,98 €/kg. Beide Größen stehen in Bezug zur Anlagenauslastung: 100 % bedeutet, dass die komplette Menge an Biogas für die jeweiligen Pfade verwendet wird.

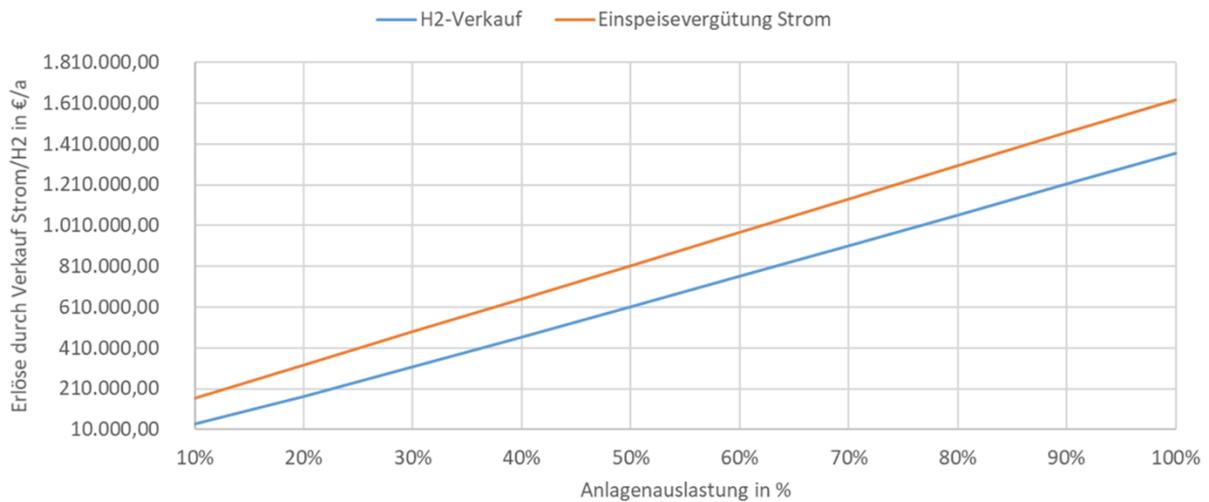


Abbildung 16: Vergleich von Einnahmen aus der EEG-Einspeisevergütung (Annahme 18,5 ct/kWh) und eines zukünftigen Wasserstoffverkaufs (Annahme Verkaufspreis 7,98 €/kg)

Bei einer angenommenen durchschnittlichen Einspeisevergütung von 18,5 ct/kWh liegen die Einnahmen aus dem Wasserstoffverkauf selbst bei einer Vollaustung der Anlage unter den Werten für die Stromeinspeisung.

Abb. 17 zeigt die Ergebnisse bei einer angenommenen Einspeisevergütung von 15,5 ct/kWh.

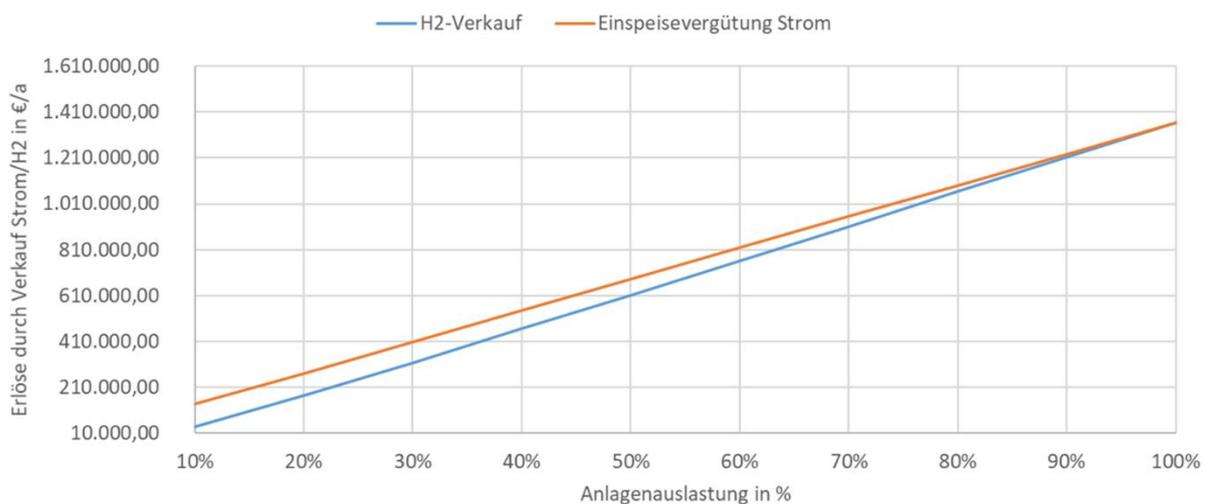


Abbildung 17: Vergleich von Einnahmen aus der EEG-Einspeisevergütung (Annahme 15,5 ct/kWh) und eines zukünftigen Wasserstoffverkaufs (Annahme Verkaufspreis 7,98 €/kg)

Bei dieser geringeren Einspeisevergütung sind nur bei Vollaustung der Anlage gleiche Einnahmen durch den Wasserstoffpfad möglich.

Abb. 18 zeigt die Ergebnisse bei einer angenommenen Einspeisevergütung von 10 ct/kWh.

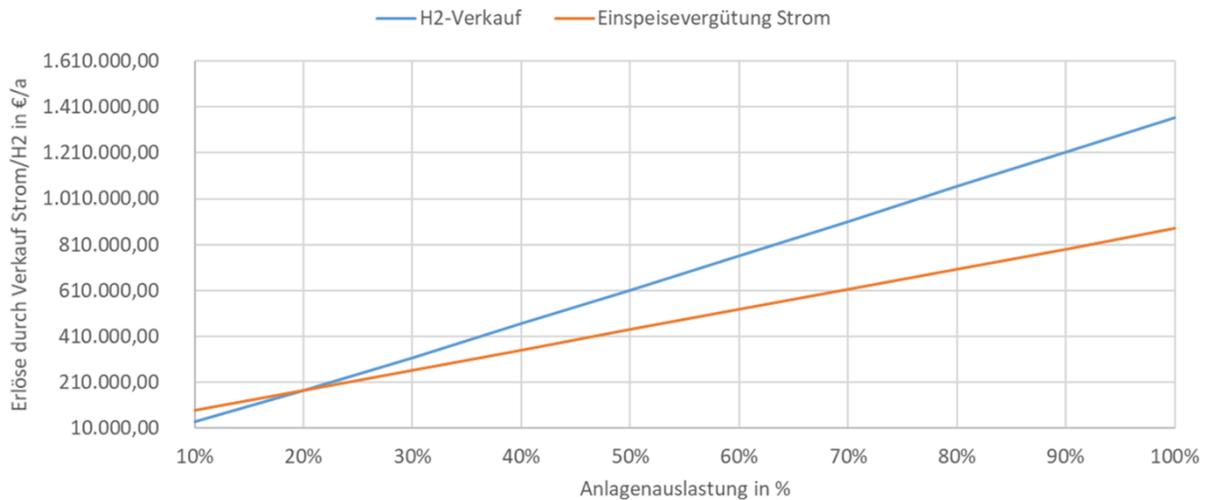


Abbildung 18: Vergleich von Einnahmen aus der EEG-Einspeisevergütung (Annahme 10 ct/kWh) und eines zukünftigen Wasserstoffverkaufs (Annahme Verkaufspreis 7,98 €/kg)

Bei einer angenommenen Einspeisevergütung von 10 ct/kWh generiert der Wasserstoffverkauf ab einer Anlagenauslastung von 20 % höhere Einnahmen als aus der Stromeinspeisung.

### Detailbetrachtung Tankstelle

Der produzierte Wasserstoff der Biogasanlage kann auch in Form einer Tankstellenanlage direkt vor Ort in den Verkehr gebracht werden. Das Technologiekonzept für diesen Anwendungsfall ist in Abb. 19 dargestellt.

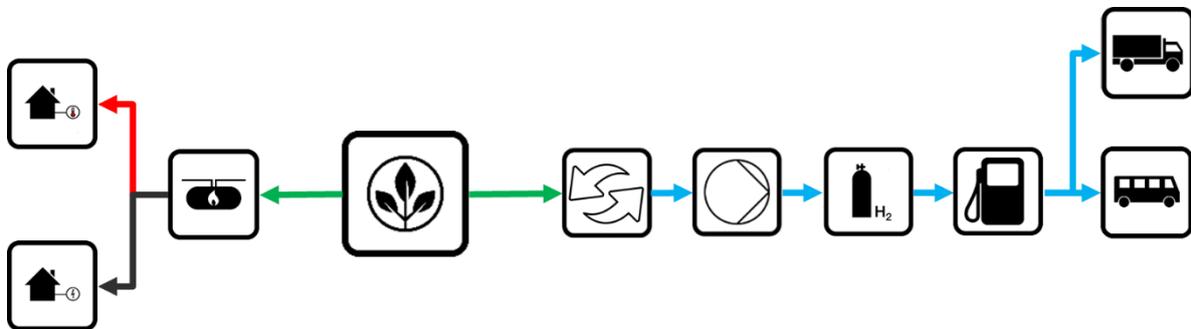


Abbildung 19: Schematische Darstellung des Technologiekonzepts Wasserstoffproduktion mit angeschlossener Tankstelle

Zur Durchführung der Simulation dieses Modells werden folgende Annahmen getroffen:

- Tankstellensystem mit 350 bar (für Anwendungen Lkw, Bus oder Entsorgungsfahrzeuge);
- Synthetisierte Mobilitätsbedarfe von 106.111 kg/a Wasserstoff.

Im Vergleich zu einer reinen Wasserstoffproduktion tragen die zusätzlichen Komponenten der Tankstelle zu vier Prozent zu den Gesamtkosten der Anlage bei. Tabelle 6 zeigt die Kostenaufstellung dieser Beispielanlage:

Tabelle 6: Kostenbetrachtung Wasserstoffproduktion mit angeschlossener Tankstelle für Mobilitätsbedarfe

Annahmen/Parameter	
Produktionsmenge Biogas in Mio. m <sup>3</sup> /a	3,5

Produktionsmenge H <sub>2</sub> in kg/a	380.625
Bedarfe Mobilität H <sub>2</sub> in kg/a (H2Mobility „medium“)	106.111
<b>Kostenbetrachtung</b>	
Summe Dampfreformierung	+1.962.592
H <sub>2</sub> -Gestehungskosten in €/kg	+5,16
Summe mit Tankstelle	+2.047.662
H <sub>2</sub> -Gestehungskosten in €/kg (Gesamtmenge H <sub>2</sub> )	+5,38

Die Kostenaufschlüsselung der Gesamtanlage zeigt Abbildung 20.

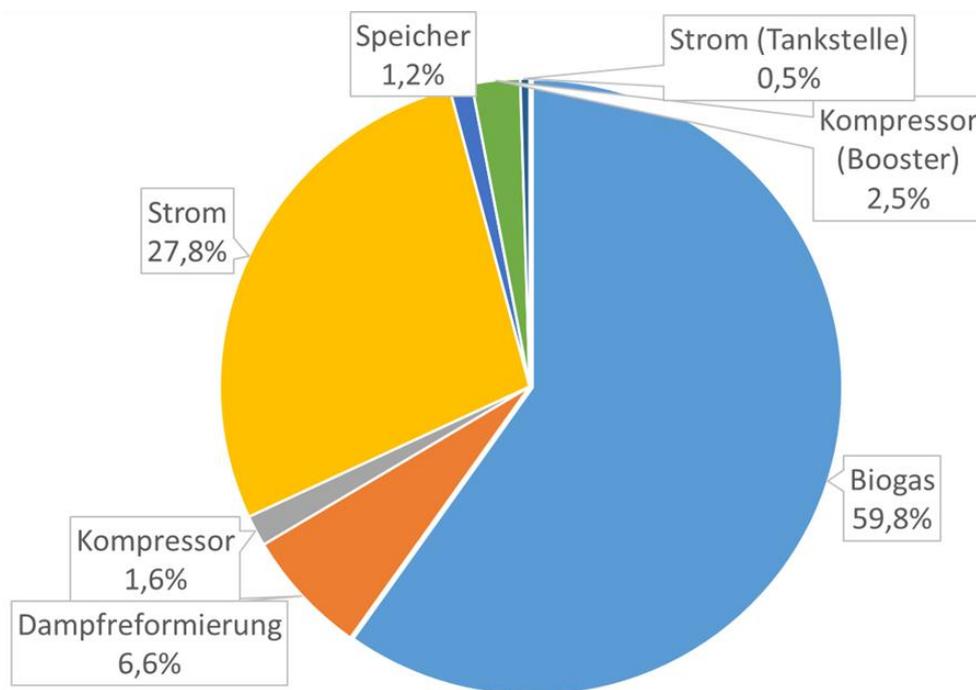


Abbildung 20: Kostenzusammensetzung Gesamtanlage nach Einzelkomponenten

Die Energieträger Biogas und Strom haben im Vergleich zu den Anlagenkomponenten den größten Anteil an den Gesamtkosten. Die Investitionskosten der Einzelkomponenten fließen in Form von Annuitäten in die Rechnung ein, die sich auf die Lebensdauer der Komponenten (siehe Annahmen) beziehen.

Die angenommene Biogas-Produktionskapazität von 3,5 Mio. m<sup>3</sup>/a kann zur Produktion von bis zu 380.625 kg Wasserstoff pro Jahr eingesetzt werden. Davon nehmen die angenommenen Mobilitätsbedarfe nur ca. ein Drittel ab. Die restliche Menge Wasserstoff steht zur weiteren Vermarktung bzw. zum Verkauf bereit.

### Fazit und Ausblick

Die Simulationsergebnisse der Biogasanlagen der Region Marburg-Biedenkopf stellen eine erste Übersicht über das Produktionspotenzial von Wasserstoff aus Biogas dar. Auch die Detailbetrachtungen der Bioenergiedörfer und Tankstellen sind eine erste Grobschätzung und stellen

eine Konzeptidee dar, wie die Produktion von Wasserstoff mit anderen Sektoren (Mobilität, Wärme, Strom) gekoppelt werden kann.

Bei allen Betrachtungen mussten Annahmen getroffen werden, um die Simulation durchführen zu können. Aus diesem Grund sind weitere konkrete Untersuchungen/Simulationen notwendig, um Einzelanlagen und Abnahmeszenarien abschließend bewerten zu können. Speziell die Abnahmepfade müssen konkretisiert werden. Die Bedarfsstrukturen, speziell aus dem Mobilitätsbereich, haben großen Einfluss auf die Gesamtwirtschaftlichkeit einer Anlage. So erfordern zum Beispiel hohe stündliche Abnahmemengen (z.B. zur Betankung von Lkw oder gleichzeitige Betankung mehrerer Busse) eine entsprechend große Dimensionierung von Wasserstoffspeichern und Kompressoren, um die Bedarfe erfüllen zu können. Dies führt zu hohen Gesamtkosten der Anlage.

Die reinen Produktionskosten des Wasserstoffes aus Biogas mittels Dampfreformierung liegen für die betrachteten Anlagen im Bereich zwischen fünf und sechs Euro pro Kilogramm. Dies stellt einen konkurrenzfähigen Preis dar, wenn der aktuell festgesetzte Wasserstoffpreis an Tankstellen von 7,98 €/kg netto (9,50 €/kg brutto) als Vergleich angesetzt wird. Jedoch stellt dies die reinen Gestehungskosten auf Grundlage der Investitions- und Betriebs-/Wartungskosten der Einzelkomponenten dar. Zusätzliche Kosten für die Weiterverarbeitung des Wasserstoffes (Speicherung, Verdichtung, Transport) sind hier nicht mit eingerechnet.

Das gesamte Potenzial zur Wasserstoffproduktion der betrachteten Anlagen liegt mit über 3.000 Tonnen pro Jahr auf einem sehr hohen Niveau und kann für viele Abnahmeszenarien in Betracht gezogen werden.

## 9. Marktmodelle für Wasserstoff in der Region

In Abb. 21 und Abb. 22 sind zwei Beispiele für Wasserstoff-Marktmodelle dargestellt, die den Wasserstoffhandel zwischen der Erzeugungseite - also bspw. Betreiber von Biogas- und Elektrolyseanlagen - und der Verbrauchsseite organisieren und Angebot und Nachfrage der Akteur\*innen bedarfsgerecht zusammenführen könnten.

Im Marktmodell "Basic" wird auf dem Marktplatz das Mengen-Matching organisiert und somit Transparenz über Angebot und Nachfrage in der Region geschaffen (vgl. Abb. 21Abbildung). Die Vertragsausgestaltung, die Wasserstofflieferung und die Zahlungsvorgänge erfolgen bei diesem Basismodell weiterhin bilateral zwischen Wasserstoffherzeuger und -verbraucher. Die Finanzierung der Marktplatzdienstleistungen könnte durch ein Dienstleistungsentgelt der auf dem Marktplatz gelisteten Wasserstoffherzeuger erfolgen. Das Modell hat den Vorteil, dass es einfach zu implementieren ist und einen gewissen Wettbewerb in der Region anreizt, um die volkswirtschaftlichen Kosten für die Region niedrig zu halten.

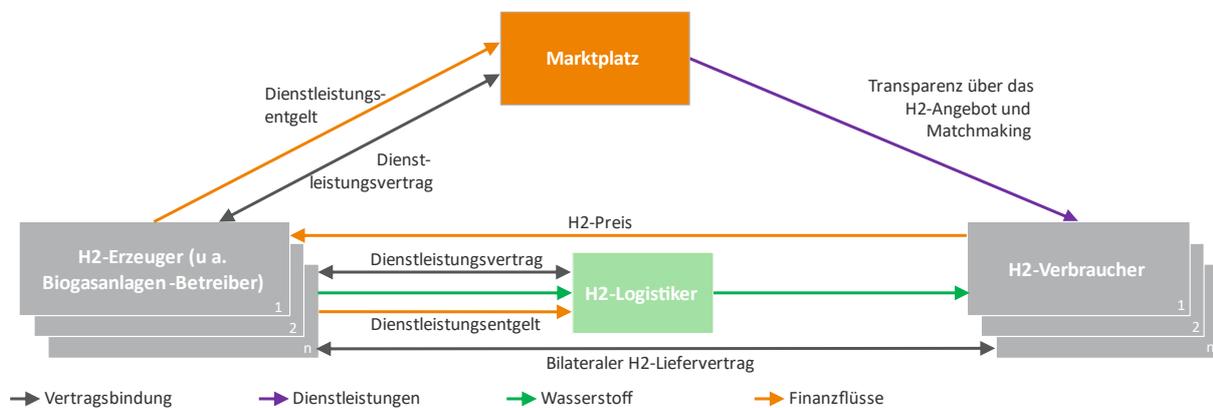


Abbildung 21: Marktmodell Basic

Im Marktmodell "Sorglos" garantiert der Marktplatz den Wasserstoffherzeugern zudem vorher vereinbarte Wasserstoffabnahmen und den Wasserstoffverbrauchern vorher vereinbarte Wasserstoffverfügbarkeiten zu einem vertraglich definierten Preis (vgl. Abb. 22). Das dargestellte Marktplatzkonzept entkoppelt somit energetische von finanziellen Flüssen.

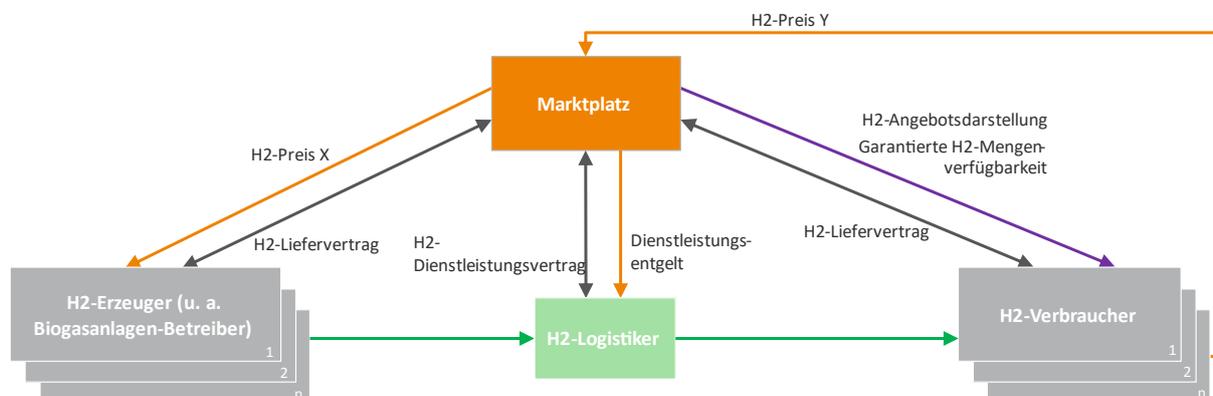


Abbildung 22: Marktmodell Sorglos

Veranlasst beispielsweise ein Elektrolysebetreiber einen Wasserstofftransport zu einer Tankstelle, erhält er eine entsprechende Vergütung vom Betreiber des Marktplatzes. Dabei garantiert der Marktplatzbetreiber sowohl dem Wasserstoffherzeuger als auch dem Tankstellenbetreiber feste Verkaufs- bzw. Einkaufspreise, sodass sie Investitionssicherheit für ihre Infrastruktur haben. Wenn diese einheitlichen Einkaufspreise unter Berücksichtigung notwendiger Zulagen für "Weiterverarbeitungsprozesse" auch einheitlich an den Endkunden in der Region weitergegeben werden, würde das Konzept einer Kannibalisierung verschiedener Akteure entgegenwirken. Beispielsweise würde vermieden, dass unterschiedliche Tankstellen den Wasserstoff zu unterschiedlichen Preisen anbieten und die Nutzer\*innen nur dort tanken, wo der Wasserstoff am günstigsten ist.

Gleichzeitig garantiert der Marktplatzbetreiber dem Elektrolysebetreiber Abnahmemengen und den Nutzer\*innen verfügbare Wasserstoffmengen. Flottenbetreiber, die Brennstoffzellenfahrzeuge anschaffen möchten, müssten sich somit keine Gedanken um die Kraftstoffversorgung mit Wasserstoff machen.

Um Angebot und Nachfrage im zeitlichen Verlauf synchronisieren zu können, müssten sowohl Erzeuger als auch Nachfrager ihre Wasserstoffmengen im Vorhinein anmelden. Bei eventuellen Unterdeckungen sowie für den Fall von Produktionsausfällen muss der Marktplatzbetreiber Backup-Lieferverträge vereinbaren. In Summe würde ein derartiger Marktplatz Preis- und Mengenrisiken für die Anwender\*innen übernehmen. Zudem müssen die Akteur\*innen keine bilateralen Verträge miteinander abschließen – einziger Vertragspartner wird der Marktplatz. Hierdurch sinken neben den Risiken und Kosten auch administrative Aufwände, wodurch Eintrittsbarrieren gesenkt werden.

Voraussichtlich würden beim Marktplatzbetreiber in der Sorglos-Variante in der Anfangszeit negative Margen anfallen. Abhilfe schaffen könnte eine Überführung des Ansatzes des vom BMWi geförderten Programms H2Global vom internationalen in den regionalen Kontext. Das H2Global-Konzept sieht den temporären Ausgleich der Differenz zwischen Ankaufspreis und Verkaufspreis für grünen Wasserstoff durch Fördermittel vor.

## 10. Die Vision einer regionalen Wasserstoffwirtschaft im Landkreis Marburg-Biedenkopf im Jahr 2030 und 2050

Die Idee einer Wasserstoffwirtschaft in der Region Marburg-Biedenkopf steht unter dem Motto „Global denken, regional wirtschaften, lokal handeln“. Daraus spricht der Gedanke, den Herausforderungen des Klimawandels mit lokalen Aktivitäten zu begegnen. Typisch für die Vision der Region ist die lokale Erzeugung von regenerativem Wasserstoff, dargestellt durch die Solarstromanlagen auf fast allen Gebäuden und Windenergieanlagen in den Mittelgebirgszügen des Landkreises, die lokale Nutzung des Wasserstoffes in der Industrie, zur Energieversorgung der Bioenergiedörfer und die Versorgung der örtlichen Tankstellen zur Betankung eines Brennstoffzellenzuges und der brennstoffzellenbetriebenen Lkws für den regionalen und überregionalen Lieferverkehr.



Abb. 23: Illustrierte Darstellung der Vision

Die Illustration bildet keine expliziten Orte ab, sondern greift die verschiedenen Charakteristika der Region Marburg-Biedenkopf auf.

Vision für 2030: Die Produktion von grünem Strom bzw. grünem Gas wird in den nächsten Jahren deutlich steigen. Neue PV-, Windenergie- und Biogasanlagen werden gebaut; alte werden nach ihrer Förderzeit im EEG mit positiven Margen durch den Verkauf von Wasserstoff profitabel weiter betrieben. Die Elektrolyseanlagen stehen ortsnah an den Stromerzeugungsanlagen, sodass der grüne Strom ohne große Transportverluste und hocheffizient genutzt werden kann. Die Mengen, die nicht ins Stromnetz eingespeist oder zur Versorgung der Bioenergiedörfer genutzt werden, dienen zur Herstellung von grünem Wasserstoff. Dieser kann, wenn er nicht gleich vertankt wird, vor Ort gespeichert und zeitlich versetzt energetisch genutzt werden.



Die erste Wasserstofftankstelle ist errichtet, Wasserstoffherzeuger und Wasserstoffabnehmer haben den Transport und die Verteilung des Wasserstoffes mittels Trailer organisiert. Erste Geschäftsmodelle sind entwickelt und versprechen erste kleine Gewinnmargen.

Vision für 2050: Die Akzeptanz der Bevölkerung in der Region für weitere Windparks und Freiflächensolarstromanlagen ist gestiegen, seitdem deutlich ist, dass mit der Nutzung des damit produzierten grünen Wasserstoffes die regionalen Treibhausgasemissionen deutlich gesenkt werden konnten und die Wertschöpfung der heimischen Industrie gesteigert werden konnte. Die Region erzeugt mehr grünen Wasserstoff, als sie selbst nutzen kann und hat sich als Wasserstoffexporteur über die Grenzen von Mittelhessen hinaus etabliert.

Neben den Unternehmen zur Erzeugung von Wasserstoff und den Anwendern haben sich neue Logistikunternehmen für die Verteilung des Wasserstoffes gegründet. Liefer- und Dienstleistungsverträge haben lange Laufzeiten, so dass eine preisstabile Versorgung über Jahre gesichert ist. Die Kosten für den Wasserstoff und seinen Transport sind deutlich gesunken, der Bedarf gestiegen, so dass über den Bau einer Wasserstoff-Pipeline beraten wird, um die hohe Anzahl an Trailern auf den Straßen der Region zu verringern.

## 11. Der Handlungsansatz für die Region Marburg-Biedenkopf – Den Boden bereiten

Unter dem Leitbild “Den Boden bereiten“ haben die Akteure\*innen der Region Marburg-Biedenkopf einen Handlungsansatz entwickelt, der die Ziele in diesem Projekt in Zusammenhang mit entsprechenden Themenfeldern und einer chronologischen Abfolge bringt.

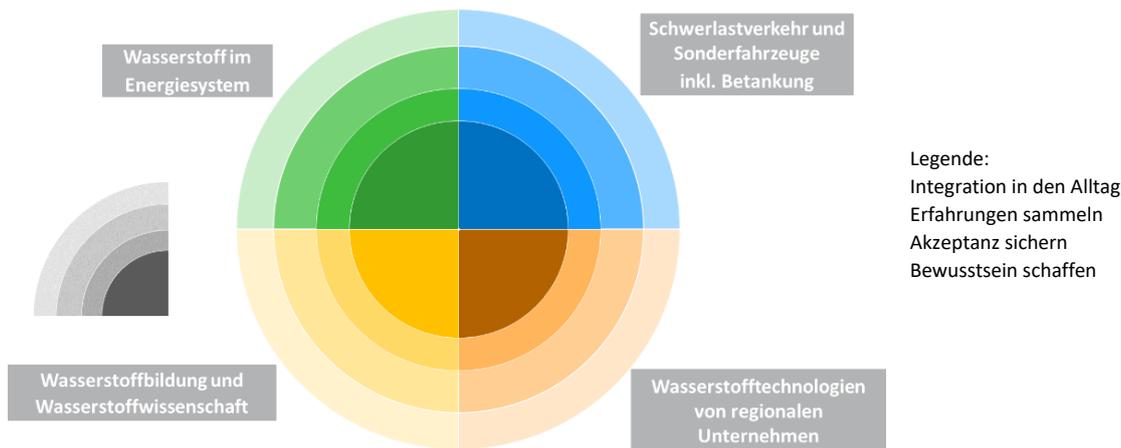


Abb. 24: Das Phasenmodell des Handlungsansatzes

Die einzelnen Bereiche sind untereinander thematisch vernetzt und in aufeinander aufbauenden Phasen unterteilt:

- Phase 1 (der innere Kern): Ansätze in diesem Bereich sollen ein Bewusstsein für die Notwendigkeit der Transformation im Energie- und Verkehrssektor schaffen.
- Phase 2 (der erste Ring): Durch Vermittlung von Wissen und sachlichen Informationen soll die Akzeptanz für die neue Technologie gesichert werden.
- Phase 3 (der zweite Ring): Die Auswertung von Demonstrationsanlagen bringen wertvolle Daten und Erfahrungen.
- Phase 4 (der dritte und äußere Ring): Die neue Technologie ist im Alltag angekommen und wird angenommen und akzeptiert.

Folgende Ziele werden in den einzelnen Feldern verfolgt:

- Wasserstoff im Energiesystem:
  - Substitution fossiler Energieträger.
  - Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen und Klärschlämmen zur Energiegewinnung vor Ort.
  - Perspektiven für Post-EEG-Biogasanlagen.
- Wasserstoff im Schwerlastverkehr:
  - Erfüllung der Quoten der Clean Vehicle Directive (EU) und des SaubFahrzeugBeschG (D).
  - Prüfung des Betriebs von Bussen, Entsorgungsfahrzeugen, kommunalen Sonderfahrzeugen und Zügen.
  - Errichtung von Wasserstofftankstellen.
  - Schnittstellen zum Themenfeld “Wasserstofftechnologien von regionalen Unternehmen“.

- Wasserstofftechnologien von regionalen Unternehmen:
  - Entwicklung neuer Produkte für die BZ63-Technologie.
  - Nutzung des Wasserstoffes für die eigene Energieversorgung.
  - Identifikation neuer Forschungsfelder für Produkte und Prozesse.
- Wasserstoff in Bildung und Wissenschaft:
  - Entwicklung einer Bildungsmatrix mit aufbauenden Bildungsmodulen für ausgesuchte Zielgruppen.
  - Inhalte für stationäre Angebote (z.B. im Chemikum) und mobile Angebote (in Schulen und Betrieben) entwickeln.
  - Neben “Lehrbuchwissen“ vor allem auch Erfahrungen aus Praxisanwendungen vermitteln.
  - Sachlich und fachlich informieren und dabei auch kritische Aspekte aufgreifen.

Der Gedanke “Global denken, regional wirtschaften, lokal handeln“ findet sich auch in diesem integrativen Ansatz wieder: Die einzelnen Ziele können sich in unterschiedlichen Phasen ergänzen und bilden neue Lösungsansätze für die Region heraus. Die Entwicklungsgeschwindigkeit in einer Phase hängt maßgeblich von den dort handelnden Akteur\*innen und den vorhandenen Rahmenbedingungen (rechtliche und regulatorische Vorgaben, Handlungsdruck, Interessenslage, Finanzierungsstrategien u. ä.) ab. Hier bietet der Ansatz hohe Potenziale und gute Handlungsmöglichkeiten für den Akteurskreis der Region.

## 12. Übersicht der Themenfelder im Landkreis Marburg-Biedenkopf

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über die für die Region relevanten Themenfelder bei der Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft, Optionen für die Produktion, den Transport und die Nutzung und stellt erste Projektideen vor, die im Rahmen von HyStarter entstanden sind.

### 12.1. Möglichkeiten der Wasserstoffproduktion

#### Wasserstoff aus der Elektrolyse

Mit elektrischem Strom aus Windenergie- und PV-Dach- oder Freiflächenanlagen kann durch Elektrolyse grüner Wasserstoff erzeugt werden. Dabei wird das Wasser in seine elementaren Bestandteile, Wasserstoff und Sauerstoff, gespalten, der Wasserstoff separiert und unter Druck gespeichert. Eine detaillierte Beschreibung des Prozesses findet sich im Anhang.

Der Elektrolyseur wird als Containerlösung installiert. So kann er auch nachträglich an einen anderen Standort verlegt und darüber hinaus an einzelne oder mehrere Erzeugungsanlagen gekoppelt werden. Auch die gleichzeitige Kopplung eines Elektrolyseurs an PV- und Windenergieanlagen ist realisierbar. Bei der Standortwahl müssen energierechtliche und energieregulatorische Rahmenbedingungen wie EEG-Umlage und Netzentgelte beachtet werden. Soll der produzierte Wasserstoff vor Ort gespeichert werden, ist eine Verdichterstation notwendig. Alle benötigten Komponenten für die Wasserstofferzeugung, mit Ausnahme des Verdichters, werden im Container installiert. Je nach Elektrolyseurgröße wird eine Aufstellfläche für zwei 20-ft<sup>64</sup>-Container benötigt. Zusätzlich bedarf es einer Versorgung mit Wasser von mindestens Leitungswasserqualität, die oftmals nicht in Windparks oder PV-Freiflächenanlagen vorhanden ist. Sollte die vorhandene Wasserqualität unzureichend sein, bedarf es einer separaten Wasseraufbereitungsanlage, die zusätzlich zum Container errichtet werden muss.

Elektrolyseanlagen sind in einem breiten Leistungsspektrum zwischen 0,1 MW und 10 MW sowie verschiedenen Ausgangsdruckstufen erhältlich und in der Praxis bewährt. Sie werden von unterschiedlichen deutschen, europäischen und international tätigen Unternehmen angeboten und können mit unterschiedlichen Service- und Supportangeboten bestellt werden.

Von der Planung bis zur Errichtung eines Elektrolyseurs ist mit einem Zeithorizont von mindestens einem Jahr zu kalkulieren. Verzögerungen aufgrund regional bedingter Herausforderungen wie z.B. Genehmigungsprozessen können auftreten. Der Standort des Elektrolyseurs ist hinsichtlich Umlagen und Abgaben zu analysieren. Bei Post-EEG Anlagen sind der technische Zustand, Kosten-Aufwendungen, OPEX und CAPEX für ein wirtschaftliches Betreiben der Anlagen ausschlaggebend. Technisch ist die Kopplung von noch zu errichtenden Anlagen, laufenden EEG-Anlagen und mit Post-EEG-Anlagen möglich. Bei Stilllegung einer Anlage ist auch ein Standortwechsel des Elektrolyseurs möglich. Neben der Strombereitstellung muss auch die Wasserversorgung sichergestellt werden.

#### Wasserstoff aus Reststoffen mittels Hydrolyse

Dieses Produktionsverfahren für Wasserstoff wird in drei Prozessschritte unterteilt: Im ersten Schritt werden inhomogene Stoffe zu Bio-Kohle verarbeitet. Die Bio-Kohleproduktion ist aus Klärschlamm, Gülle, Mist, Bio- u. organischen Abfällen, Plastik (bis zu 30 %) und auch faserhaltigen Abfällen wie GFK<sup>65</sup> möglich. Voraussetzung der Eingangsstoffe ist ein 30-prozentiger Feststoffanteil. Mittels produzierter

---

<sup>64</sup> ft: Abk. für das Längenmaß Foot (1 ft. entsprechen 30,48 cm)

<sup>65</sup> Glasfaserverstärkter Kunststoff

Bio-Kohle wird in einem Reaktor Dampf erzeugt. Im zweiten Schritt wird der Dampf und die Bio-Kohle in einem Flugstromvergaser zu Synthesegas umgewandelt. Bei diesem Vorgang beträgt die Arbeitstemperatur über 180 °C, sodass die Gasphase nicht erreicht wird und aufgrund der homogenen Bio-Kohle die Teerbildung und somit ein Verkleben der Anlage ausbleibt. Das Synthesegas wird im letzten Schritt genutzt, um über eine CO-Shift-Reaktion<sup>66</sup> Wasserstoff zu erzeugen. Für die einzelnen Prozessschritte werden verschiedene Systeme benötigt, die modular als Containerlösung errichtet werden. Anstelle von Wasserstoff kann über die Anlage auch Bio-Kohle, -Methan oder -Methanol gewonnen werden.

Anlagen zur Produktion von Wasserstoff aus diesem Verfahren werden derzeit nur von der Fa. blueFLUX angeboten und befinden sich noch in der Prototypenphase. Ab Ende 2024 wird der Hersteller die Anlagen in verschiedenen Leistungsklassen anbieten. Die einzelnen Prozessschritte sind erprobt und gelten als zuverlässig, das Gesamtkonzept muss aber noch den Testbetrieb erfolgreich absolvieren. Für den Betrieb einer solchen Anlage ist eine Genehmigung nach BImSchG<sup>67</sup> sowie eine regulatorische Klärung zur Einordnung des Ausgangsstoffes als "grüner" Wasserstoff erforderlich. Die Produktionskosten gibt der Hersteller mit 2,00 €/kg Wasserstoff an, mit einem Ausgangsdruck von 40 bar und einer Reinheit von 99,9 % (3.0 Qualität)<sup>68</sup>. Für eine Nutzung in einem Brennstoffzellenantrieb in der Mobilität ist somit einer Aufbereitung auf 5.0 Qualität (99,999 %) notwendig.

## 12.2. Wasserstofftransport

Zum Transport des Wasserstoffes vom Produktionsstandort zur Anwendung wird er in der Regel in Druckflaschen oder Röhrenspeichern verbracht und mittels Trailer (Sattelzugmaschinen mit Röhrenspeicheraufliegern) an den jeweiligen Standort der Nutzung befördert. Diese Distributionsweise ist heutiger Standard und kann mit 3,96 €/kg für 1.000 km berechnet werden<sup>69</sup>.

Alternativ kann der Wasserstoff in einer Wasserstoffpipeline transportiert und verteilt werden. Hier betragen die Transportkosten zwischen 0,09 und 0,17 €/kg<sup>70</sup>. Allerdings muss dafür eine einsprechende Infrastruktur aufgebaut werden. Die Kosten für einen Kilometer Pipeline sind abhängig vom Gebiet und der Bodenbeschaffenheit und belaufen sich zwischen einer Mio. Euro/km (in einem eher urban geprägten Gebiet) und 150.000 Euro/km<sup>71</sup> in einem eher ländlich geprägten Gebiet. Es können sowohl Rohre aus Stahl als auch aus Kunststoff (Polyethylen) verwendet werden (Diffusionsverluste sind vernachlässigbar). Polyethylen-Leitungen werden mit fünf bar und Stahlleitungen mit bis zu 70 bar Leitungsdruck betrieben. Somit ist bei einer DN100 Polyethylen-Leitung (10 cm Durchmesser) eine Transportkapazität von 13 Tonnen und bei einer DN100 Stahlleitung von fast 40 Tonnen Wasserstoff pro Tag möglich.

Trailer, Pipelines, Speicher- und Verdichtersysteme werden von zahlreichen Unternehmen angeboten, die Preise sind abhängig von den Leistungs- und Kapazitätskennzahlen.

## 12.3. Wasserstoff aus Biogasanlagen

Neben den oben beschriebenen Wasserstofferzeugungsverfahren mittels Elektrolyse und Hydrolyse bietet sich in der Region Marburg-Biedenkopf die Produktion von Wasserstoff mittels Biogasanlagen

---

<sup>66</sup>  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$

<sup>67</sup> Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG, zuletzt geändert am 10.08 2021

<sup>68</sup> blueFLUX Energy AG unter <https://www.bluefluxenergy.com/de/>

<sup>69</sup> McKinsey Hydrogen Supply Model

<sup>70</sup> Ontras, European Hydrogen Backbone, unter

[https://www.ontras.com/fileadmin/Dokumente\\_Newsroom/Presseinformationen/20200715\\_European\\_Hydrogen\\_Backbone\\_Report.pdf](https://www.ontras.com/fileadmin/Dokumente_Newsroom/Presseinformationen/20200715_European_Hydrogen_Backbone_Report.pdf)

<sup>71</sup> Westnetz, Projekt in Metelen

an. Hierbei wird der Wasserstoff durch Dampfreformierung von Biogas und anschließender Druckwechseladsorption gewonnen (siehe auch Anhang). Die Reformierung methanhaltiger Gase ist das weltweit häufigste Erzeugungsverfahren für Wasserstoff, jedoch ist bei der Biogasreformierung die Anerkennung als "grüner" Wasserstoff noch ungeklärt. Wird Energie für die Wärmeerzeugung benötigt, sollte das Biogas direkt dafür genutzt und aus Gründen des Wirkungsgrades auf eine Reformierung verzichtet werden. Dann empfiehlt es sich eher, Wasserstoff aus einer anderen Quelle für die nachträgliche Methanisierung von Biogas zu nutzen und damit dessen Heizwert zu erhöhen.

Wasserstoff aus der Biogasreformierung wird bislang nicht als "grün" anerkannt, der politische Diskussionsprozess ist aber angestoßen. Die Post-EEG-Zeit ist bei Biogasanlagen noch ungeklärt, sie können jedoch ein zweites Mal an der EEG-Ausschreibung teilnehmen. Eine Biogas-Methanisierung (Aufwertung der Qualität) kann kostengünstiger sein als dessen Reformierung. Allerdings muss es sich bei der Methanisierung um "grünes" Methan handeln, damit Biogas nicht die "grüne" Eigenschaft verliert. Bei der Verwendung ist der im Vergleich zur direkten Nutzung geringere energetische Wirkungsgrad bei der Wasserstoffproduktion aus Biogas zu beachten. Eine Untersuchung des Instituts für Industrieofenbau an der RWTH Aachen stellt in Aussicht, dass über Biogasreformierung Wasserstoff günstiger hergestellt werden kann als über eine Wasserelektrolyse. Zudem kann eine Wasserstoffqualität von 5.0 (99.999 %) erreicht werden, sodass der produzierte Wasserstoff über Brennstoffzellenqualität verfügt und u. a. im Mobilitätssektor eingesetzt werden kann.

#### 12.4. Wasserstoff in der Mobilität

Eine Option, den CO<sub>2</sub>-armen bzw. CO<sub>2</sub>-freien Wasserstoff zu nutzen, bieten Brennstoffzellenantriebe. In einer Brennstoffzelle werden Sauerstoff und Wasserstoff zusammengeführt, hierbei entsteht Wasser und elektrischer Strom (der umgekehrte Elektrolyseprozess). Mit dem Strom können Elektromotoren zum lokal emissionsfreien Betrieb eines Fahrzeugs angetrieben werden.

Brennstoffzellenbusse sind im Mobilitätssektor am weitesten technologisch fortgeschritten und gelten als serienreif. Im Vergleich zur batterieelektrischen Variante verfügen sie über höhere Reichweiten von bis zu 350 km und können in einem Zeitraum zwischen fünf und 15 Minuten an einer 350 bar-Tankstelle betankt werden. Üblicherweise werden 30 kg Wasserstoff bei 350 bar in einem Typ 3- oder Typ 4-Tank gespeichert. Wasserstofftankstellen können wegen des üblicherweise größeren Platzangebotes sinnvoll auf einem Betriebshof der Verkehrsbetriebe errichtet werden. In Kombination mit einer 700 bar-Zapfsäule können dort auch BZ<sup>72</sup>-Pkw betankt werden. Wird diese Kombination als eine öffentliche HRS geplant, muss sichergestellt sein, dass diese Tankstelle von den baulichen Gegebenheiten (Breite der Fahrspuren, Höhe des Daches) und von der Leistungsfähigkeit der Tankanlage für beide Betankungsarten geeignet ist.

Das städtische Busnetz der Stadt Marburg war Teil einer Machbarkeitsstudie von HO<sup>73</sup>-Busverkehr in Deutschland<sup>74</sup> des Fraunhofer ISI. Als Ergebnis lässt sich zusammenfassen, dass die untersuchten Buslinien technisch geeignet sind, auf batterieelektrischen oder oberleitungsgebundenen Betrieb umgestellt werden zu können. Ebenso lässt sich die Wirtschaftlichkeit gut darstellen.

Ggf. ist es sinnvoll und zielführend, mittels einer Studie die Nutzung von BZ-Bussen im außerstädtischen ÖPNV und auf den nicht elektrifizierten Strecken der Regionalbahn, die den

---

<sup>72</sup> BZ: Brennstoffzelle

<sup>73</sup> HO-Bus: Hybrid-Oberleitungsbus

<sup>74</sup> Teilstudie „Machbarkeitsstudie von HO-Busverkehrs in Deutschland – am Beispiel Marburg und Trier“, Fraunhofer ISI, Mannheim, 2020

Landkreis Marburg-Biedenkopf queren, bezüglich der CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Wirtschaftlichkeit zu untersuchen.

In Anlehnung an die BZ-Busse für den ÖPNV können Pkw (als Teile von Fahrzeugflotten), leichte und schwere Lastkraftwagen, Müllsammelfahrzeuge und, wie erwähnt, Züge mit BZ-Antrieben für eine deutliche Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Landkreis sorgen.

### 12.5. Wasserstoff in der stationären Anwendung

Der größte Teil des in der Region produzierten grünen Wasserstoffes wird nach dem vorliegenden Konzept zur Wärmebereitstellung in Gebäuden verwendet werden. Hier eignet sich eine auf Brennstoffzellenbetrieb gestützte Heizung und Warmwasserversorgung, insbesondere wenn kein Anschluss an das Gasnetz besteht oder hergestellt werden kann oder eine Insel- oder Quartierslösung angestrebt wird.

Bei den aktuellen stationären Brennstoffzellensystemen zur Wärmeversorgung, die gleichzeitig Wärme und Strom erzeugen, ist ein Wechsel des Betriebs von Erd- oder Biogas auf Wasserstoff möglich. Für Gebäudearten mit einem relativ konstanten Energiebedarf eignen sich Hochtemperatur-Brennstoffzellen, wie die SOFC<sup>75</sup> (mit Arbeitstemperaturen bis zu 1.000 °C) oder Wasserstoff-Blockheizkraftwerke.

### 12.6. Bildung und Qualifizierung zum Thema Wasserstoff

Mit dem Chemikum Marburg und den Fachbereichen Chemie und Physik der Universität Marburg können regionale und ortsnahe Kristallisationspunkte für die Wissensvermittlung und den Wissenstransfer in den Themenbereichen "Wasserstoff" und "Brennstoffzellentechnologie" genutzt werden. Hier werden die aktuellen Bildungsaktivitäten in diesen Bereichen eruiert und neue Formate entwickelt, die den unterschiedlichen Zielgruppen Schüler\*innen, Student\*innen, Auszubildene und einer interessierten Öffentlichkeit die Aktivitäten in der Region näherbringen und die technische Funktionalität und Einsatzmöglichkeiten erklären sollen. Hierbei spielt der Aufbau einer "Bildungsmatrix" als aufeinander aufbauende und kombinierbare Bildungsangebote eine besondere Rolle. Diese Matrix enthält Formate für möglichst anschauliche Erklärungen, Experimentiermaterial und -technik für anwendungsorientierte Bezüge. Dabei kommt dem systemischen Ansatz, d.h. dem Denken über die Systeme "Produktion" und "Anwendung" hinaus, eine besondere Bedeutung zu.

Die Matrix kann, inklusive entsprechend versierter Mitarbeiter\*innen, Kindergärten, Schulen, Volkshochschulen und anderen Bildungseinrichtungen zur Verfügung gestellt werden.

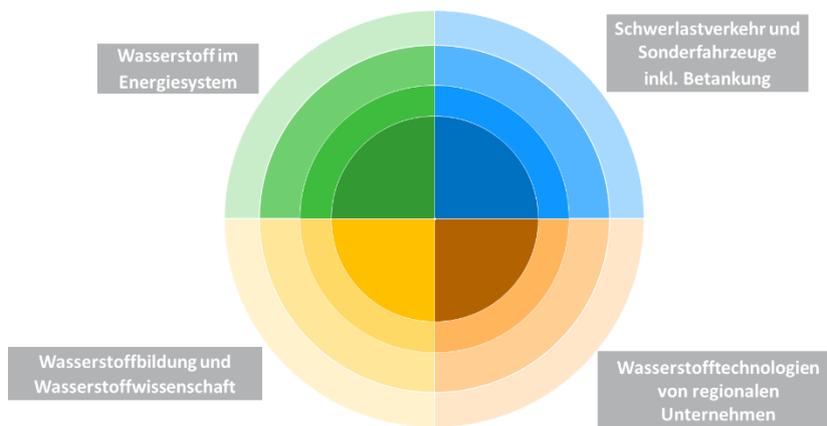
Dementsprechend wird die Ausbildung und Qualifizierung von Personal als eine außerordentlich wichtige Aufgabe in der Region gesehen. Das gilt nicht nur für das eben genannte Lehrpersonal, sondern auch für die Unternehmen der Automobilzulieferindustrie und den zukünftigen Installateur-, Logistik- und Tankstellenunternehmen. Hier müssen u.a. Fachkräfte für Wasserstofffahrzeuge, Brennstoffzellenheizungen, Blockheizkraftwerke und Tankstellenpersonal ausgebildet werden.

---

<sup>75</sup>SOFC: Solid oxide fuel cell, Festoxidbrennstoffzelle

## 13. Umsetzung des Handlungsansatzes

In allen vier Themenfeldern des Phasenmodells, welche die Region für ihre Aktivitäten im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie entwickelt hat, werden erste Projekte initiiert.



Im Themenfeld „Schwerlastverkehr und Sonderfahrzeuge“ soll eine erste Demonstrations-Wasserstofftankstelle errichtet werden. Dazu hat sich eine Arbeitsgruppe gegründet, die erste Überlegungen zur Ausstattung und zum Standort der Tankstelle erarbeiten wird. Insbesondere

sollen Grundlagen für den Planungs- und den Genehmigungsprozess entwickelt werden. Für den ÖPNV im Kreis Marburg-Biedenkopf sollte eine Machbarkeitsstudie aufzeigen, welche Optionen es zur Umsetzung der Quoten im SaubFahrzeugBeschG im Umlandverkehr gibt und welche Rolle brennstoffzellenbetriebene Busse dabei spielen können.

Für den Bereich „Wasserstoffbildung und Wasserstoffwissenschaft“ werden erste Gespräche mit dem Chemikum und den Fachbereichen Chemie und Physik der Universität zur Entwicklung der Bildungsmatrix anberaunt. Hierbei geht es insbesondere um die Definition der Zielgruppen und die Bereitstellung von Anschauungsmaterialien. Des Weiteren sind Gespräche mit der IHK Kassel-Marburg und der Handwerkskammer Kassel geplant, um die Bildungsmatrix für die Handwerksgruppen zu gestalten, die für die Verwendung der neuen Technologie bedeutsam sind. Der bereits bestehende gute Kontakt zur LandesEnergieAgentur Hessen sollte ausgebaut und vertieft werden, um in diesem Rahmen Bildungs- und Informationsangebote für die interessierte Öffentlichkeit zu entwickeln.

Die in der Region ansässigen Industrieunternehmen, insbesondere die Automobilzulieferer, werden auf mögliche Transformationsoptionen innerhalb ihres Produktportfolios und Produktionsprozesse angesprochen. Bei diesen Gesprächen sollte auch die unternehmenseigene Energieversorgung und die optionale Umstellung auf Wasserstoff und Brennstoffzelle angesprochen werden.

Zur Steigerung der regionalen Wasserstoffproduktion prüfen die Stadtwerke Marburg, inwieweit durch Klärschlämme des lokalen Klärwerkes mittels Pyrolyse bzw. Hydrolyse Wasserstoff produziert werden kann. Damit würden die Transporte zur Entsorgung nach Frankfurt/Main entfallen und die Wertschöpfung in der Region bleiben.

## 14. Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation

Für eine fokussierte und auf die Bedürfnisse einer Region abgestimmte Öffentlichkeitsarbeit hat sich die Region Marburg-Biedenkopf angeboten. Zum einen befand sich die Region bereits in der Phase 2 des HyStarter-Projektes und zum anderen sind die Akteure vor Ort sehr interessiert an einer auf ihre Bedürfnisse zugeschnittenen Medienarbeit und Kommunikation zu "Wasserstoff", "Wasserstoffwirtschaft" und "Brennstoffzellentechnologie". So konnten die jeweiligen Abteilungen für Presse- und Öffentlichkeitsarbeit (des Landkreises Marburg-Biedenkopf, der Universitätsstadt Marburg und der Stadtwerke Marburg) bei ihrem Ziel, diese Themen zu koordinieren und weiterzuentwickeln, aktiv unterstützt werden.

Die Unterstützung umfasste folgende Maßnahmen:

- Kontextualisierung und narrativer Rahmen für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien.
- Identifizierung und Entwicklung medienrelevanter "Aufmacher".
- Identifizierung regionaler Player aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft.
- Vorbereitung der regionalen Akteure auf Presstermine.

Dazu wurden folgende Kommunikationsmaßnahmen mit den Medien der Region Marburg-Biedenkopf ergriffen:

- Gewinnung regionaler Medien (Print, Online, TV, Radio) für laufende Hintergrundberichtserstattungen.
- Durchführung von Pressehintergrundgesprächen zur Kontextualisierung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien sowie des HyStarter-Projektes.
- Entwicklung und Ausarbeitung möglicher Berichtsformate mit den Medien (Reportage, Experteninterviews, mod. Streitgespräch etc.).

### 14.1. Bedarfsanalyse

In einer Videokonferenz am 02. Dezember 2020 wurde eine Bedarfsanalyse ("Needs-Assessment") mit der Region Marburg-Biedenkopf durchgeführt. Ziel war die Ermittlung der spezifischen Interessen, Bedarfe und Wünsche der Projektbeteiligten. Anwesend waren Vertreter\*innen der Stadt Marburg, des Landkreises Marburg-Biedenkopf sowie der Stadtwerke Marburg.

Das Ergebnis: Alle Projektbeteiligten wünschen sich eine Unterstützung vor allem im Bereich der Koordinierung ihrer Kommunikationsmaßnahmen. Dazu zählen u.a. ein Veranstaltungskalender und die gemeinsame Entwicklung und Identifizierung möglicher Aufmacher. Landkreis und Stadtwerke sehen eigene Bedarfe v.a. bei der "Kontextualisierung" des Themas Wasserstoff mit Fragen der Mobilität, der Strom- und Wärmeversorgung, der Energie-Speicherung, der Recycling-Wirtschaft oder der chemischen Industrie.

### 14.2. Aufbau und Ausbau des Wasserstoff-Netzwerks in der Region

In Kooperation mit der Region Marburg-Biedenkopf werden fortlaufend geeignete lokale bzw. regionale Partner\*innen aus den Bereichen Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft identifiziert. In einem nächsten Schritt sollen diese den Medien als mögliche Interviewpartner\*innen und Expert\*innen vorgestellt werden. Aktuell werden u.a. Gespräche mit dem Chemikum Marburg, der Handelskammer, Energiedienstleistern und Betreiber\*innen von regionalen Erneuerbaren Energie-Anlagen geführt.

### 14.3. Gründung eines Kommunikationsteams Marburg-Biedenkopf

Nachdem die "Kümmerer" und Projektpartner\*innen identifiziert waren, wurde ein erweitertes Team aus Pressesprecher\*innen und Kommunikationsverantwortlichen gebildet, das sich gezielt mit der Innen- und Außenkommunikation befasst. Mit diesem Kommunikationsteam finden regelmäßig Video-Calls zur Koordinierung und Strategiebesprechung statt.

### 14.4. Energie- und Mobilitätswende systemisch denken – auch in der Kommunikation

In einer Videokonferenz am 03. Februar 2021 mit eingeladenen Wasserstoff-Expert\*innen wurde auch das Thema Sektorkopplung behandelt. Aus dem HyStarter-Team nahmen Vertreter\*innen der Stadt, des Landkreises sowie der Stadtwerke teil. Der Hintergrund: In den Medien und im öffentlichen Diskurs werden Bedarfe wie z.B. Klimatisierung, Stromversorgung, Mobilität, Prozesswärme, Abfallwirtschaft, Grundstoffe, etc. noch zu wenig ganzheitlich betrachtet. Dies führt oft zu Missverständnissen und Vorurteilen, auch in der Diskussion über die Möglichkeiten einer regionalen Wasserstoffwirtschaft.

### 14.5. „Digitale Heimat“ für HyStarter Marburg-Biedenkopf

Weil die betreffenden Internetseiten auf [hy-starter.de](https://hy-starter.de) nur über den jeweiligen Projektzeitraum online geschaltet sein sollen, war die Region Marburg-Biedenkopf auf der Suche nach einer langfristigen digitalen Heimat für alle Inhalte zum Thema „Regionale Wasserstoffwirtschaft“.

Mit der Domain/URL <https://www.marburg-biedenkopf.de/wasserstoffregion> wurde diese gefunden und technisch umgesetzt. Aktuell verlinkt die Internetadresse auf [hy-starter.de](https://hy-starter.de). Sobald diese für Marburg-Biedenkopf offline geschaltet wird, gibt es eine Migration der Webinhalte zur neuen URL.

### 14.6. Vorstellung des Online-Portals „mein-marburg-biedenkopf.de“

In einer Videokonferenz am 04. März 2021 stellten die Projektverantwortlichen des Portals [mein-marburg-biedenkopf.de](https://mein-marburg-biedenkopf.de), dessen Inhalte und Funktionalitäten vor. Teilnehmer\*innen waren alle HyStarter-Verantwortlichen inklusive des Kommunikationsteams.

Im Mittelpunkt stand die Frage: Welche HyStarter-Inhalte könnten ggf. in welchen Formaten auf dem Portal online gestellt werden? Im Anschluss an die Videokonferenz wurde in Zusammenarbeit mit Marburg-Biedenkopf ein Paper entwickelt, in dem mögliche Kooperationen (inkl. der Inhalte und Formate) zusammengetragen wurden. Dabei ging es auch um die strategische Vernetzung der verschiedenen Kommunikationskanäle, hier vor allem der jeweiligen Internetseiten mit den sozialen Netzwerken der HyStarter-Partner\*innen.

### 14.7. Presse-Hintergrundgespräche

Dem Kommunikationskonzept folgend werden im weiteren Projektverlauf noch zwei bis drei Presse-Hintergrundgespräche veranstaltet. Dafür wurde zusammen mit dem Kommunikationsteam Marburg-Biedenkopf ein Papier entwickelt, in dem die wichtigsten Elemente dieses Formates fortlaufend aktualisiert werden. Da es neben den HyStarter-Pressekonferenzen bereits erste HyStarter Presse-Hintergrundgespräche in der Region im Jahr 2020 gegeben hat, konnten hierzu schon Erfahrungen gesammelt und ausgetauscht werden.

### 14.8. Expert\*innenrunden zur regionalen Wasserstoffwirtschaft

Damit die Projekt-Partner\*innen fortlaufend über aktuelle Entwicklungen im Bereich der regionalen Wasserstoffwirtschaft informiert werden können, fanden neben den HyStarter Strategie-Dialogen auch Interviews und Briefings mit externen Expert\*innen statt. So legte die auf Energiefragen

spezialisierte Unternehmensberatung BBHC am 19. Februar 2021 eine Präsentation vor, in der es um die nationalen wie internationalen Wasserstoff-Potenziale geht. Die zentralen Fragen und Daten der Präsentation werden nun in einem nächsten Schritt aufgearbeitet und mit den Projekt-Partner\*innen diskutiert.

#### 14.9. Entwicklung eines längeren Textes für die Medien

In der Außenkommunikation werden in der Regel nur kürzere Presstexte in Form von Pressemitteilungen und/oder Tweets/Posts etc. in den sozialen Netzwerken erstellt und verwendet. Da es sich bei HyStarter um ein Projekt handelt, bei dem erste Konzeptideen für eine regionale Wasserstoffwirtschaft entwickelt werden, ist es Aufgabe der Projektverantwortlichen, diese so allgemeinverständlich wie möglich einer größeren Öffentlichkeit zugänglich und nachvollziehbar zu machen. Dafür soll auch ein längerer Presstext verfasst werden (Umfang ca. 5.000 Zeichen), in dem die Inhalte, Ziele und Motivationen des HyStarter-Projektes vertiefend dargelegt werden.

#### 14.10. Produktion eines Audio- bzw. Video-Podcasts

Sowohl für die Internetseiten der HyStarter-Partner\*innen als auch für deren Kanäle der sozialen Netzwerke eignen sich die Formate Ton und Bild besser als das Format Nur-Text. Empirische Daten so genannter "Klickzahlen" bzw. "User-Zugriffe" belegen, dass multi-mediale Inhalte allgemein im Netz stärker nachgefragt werden als reine Text-Inhalte. Das HyStarter-Team in Marburg-Biedenkopf hat vor diesem Hintergrund einen Audio- bzw. Video-Podcast produziert, in dem die jeweiligen Hausleitungen ihre Ziele und Motivationen beim Projekt HyStarter dem Publikum vorstellen. Dafür wurden im Vorfeld zusammen mit den Projekt-Partner\*innen zentrale Fragen und Kernaussagen sowie ein Produktionsplan entwickelt. Die technische Umsetzung fand in Kooperation mit einer lokalen Medien-Agentur statt.

#### 14.11. Ankündigung und Bewerbung zweier HyStarter Bürger\*innen-Sprechstunden

Als aktuellen Aufmacher für die Außenkommunikation sollen auch die beiden HyStarter Bürger\*innen-Sprechstunden genutzt werden, welche Anfang September 2021 stattgefunden haben. Bei den HyStarter Bürger\*innen-Sprechstunden werden das entwickelte HyStarter-Konzept einer regionalen Wasserstoff-Wirtschaft vorgestellt und eingehende Fragen interessierter Bürger\*innen beantwortet. Im Vorfeld der Sprechstunden werden diese durch gezielte Kommunikationsmaßnahmen angekündigt und beworben. Dazu zählen:

- Bewerbung und Ankündigung auf den Internetseiten sowie in den Newslettern der Akteure vor Ort,
- Bewerbung und Ankündigung auf sonstigen Kanälen der sozialen Netzwerke (Twitter, Facebook, etc.),
- Bewerbung und Ankündigung in den Medien (hier vor allem den beiden lokalen Anzeigen-Blättern sowie den lokalen Radio-Sendern),
- ggf. zusätzliche Mailings über die Verteiler der Akteure.

#### 14.12. Erarbeitung eines Argumentepapiers / FAQ zum Thema „Wasserstoff“

Zahlreiche Fragen rund um die Themen Produktion, Distribution, Anwendung und Nachhaltigkeit von Wasserstoff zeigen die Komplexität des Themas. Darüber hinaus betrifft das Thema Wasserstoff gleich mehrere Wirtschaftssektoren und Gewerke, u.a. den Strom- und Wärmesektor, den Mobilitätssektor sowie die chemische Industrie. Auf Seiten der Medien und der Öffentlichkeit resultiert daraus ein

erhöhter Informationsbedarf, damit ein faktenbasierter öffentlicher Diskurs über Fragen einer zukünftigen Wasserstoffnutzung überhaupt stattfinden kann. Vor diesem Hintergrund hat die Spielt New Technologies in Zusammenarbeit mit Marburg-Biedenkopf ein Argumentepapier / FAQ entwickelt, das nun bei Veranstaltungen und in der Kommunikation eingesetzt werden kann<sup>76</sup>.

---

<sup>76</sup> Siehe Anhang 1

## Anhang: Das kleine 1x1 des Wasserstoffes/FAQ

Allgemeines und Wissenswertes:<sup>77</sup>

Wasserstoff (Hydrogenium, chemisches Formelzeichen H) ...

... ist das häufigste chemische Element in der Natur und tritt auf der Erde nur in chemisch gebundener Form (H<sub>2</sub>), wie z.B. in Wasser (H<sub>2</sub>O), in nahezu allen organischen Verbindungen auf.

... ist ein farb- und geruchloses, ungiftiges, chemisch beständiges und unter normalen Bedingungen reaktionsarmes Gas.

... entzündet sich nicht selbst, ist weder ätzend noch radioaktiv und verbrennt mit farbloser Flamme rückstandlos.

... hat ein spezifisches Gewicht von 0,0899 g/l und ist somit 14-mal leichter als Luft.

... wird bei – 252,77° Celsius flüssig und hat in diesem Aggregatzustand ein spezifisches Gewicht von 70,99 g/l.

... hat im Vergleich verschiedener Brenn- und Kraftstoffe folgende Eigenschaften:

Einheiten	Erdgas	Wasserstoff	Benzin
Heizwert (kWh/kg)	13,12	33,33	11,60
Heizwert (kWh/m <sup>3</sup> )	10,42	3,00	8.677,00
Brennwert (kWh/m <sup>3</sup> )	11,42	3,54	10.173,00
Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	0,79	0,09	748,00
CO <sub>2</sub> -Emmisionen (kg/kWh)	0,20	0,00 <sup>78</sup>	0,26

Kleine Farbenlehre des Wasserstoffs<sup>79</sup>:

**Grüner Wasserstoff** Grüner Wasserstoff wird durch Elektrolyse von Wasser hergestellt. Für die Elektrolyse kommt dabei ausschließlich Strom aus Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien zum Einsatz. Unabhängig von der Elektrolysetechnologie erfolgt die H<sub>2</sub>-Produktion kohlenstofffrei, da der eingesetzte Strom zu 100 Prozent aus regenerativen Quellen stammt.

**Grauer Wasserstoff** Grauer Wasserstoff wird aus fossilen Brennstoffen gewonnen. Hierbei wird in der Regel Erdgas unter dem Einsatz thermischer Energie in Wasserstoff und Kohlendioxyd (CO<sub>2</sub>) umgewandelt (Dampfreformierung). Das CO<sub>2</sub> wird dabei in die Atmosphäre abgegeben.

**Blauer Wasserstoff** Blauer Wasserstoff ist grauer Wasserstoff, dessen CO<sub>2</sub> bei der Entstehung abgeschieden und gespeichert wird (Carbon Capture and Storage, CCS). Da das CO<sub>2</sub> nicht in die Atmosphäre gelangt, kann diese Art der Wasserstoffproduktion als CO<sub>2</sub>-neutral betrachtet werden.

**Türkiser Wasserstoff** Türkiser Wasserstoff wird mittels thermischer Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) hergestellt. Hierbei fällt anstelle von gasförmigem Kohlendioxyd fester Kohlenstoff an. Dieses Verfahren ist erst dann CO<sub>2</sub>-neutral, wenn die Energieversorgung des dafür verwendeten

<sup>77</sup> Vgl. „Wasserstoff: kleines Molekül mit großem Potenzial“, BDEW, Januar 2021 und TÜV Süd unter [www.tuvsud.de](http://www.tuvsud.de)

<sup>78</sup> bei „grünem“ Wasserstoff

<sup>79</sup> Vgl.: Internetseite des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, <https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html>, 2020

Hochtemperaturreaktors ausschließlich aus erneuerbaren Quellen erfolgt und der Kohlenstoff dauerhaft gebunden werden kann.

**Oranger Wasserstoff**<sup>80</sup> Oranger Wasserstoff entsteht, wenn zum Betrieb der Elektrolyse Strom aus der thermischen Abfallverwertung oder direkt aus Biomasse gewonnen wird.

**Violetter Wasserstoff**<sup>81</sup> Violetter Wasserstoff entsteht, wenn zum Betrieb der Elektrolyse Strom aus Kernenergie genutzt wird.

**Weißer Wasserstoff**<sup>82</sup> Selten sind die natürlichen Vorkommen von Wasserstoff. In einigen Gegenden der Erde lässt sich geogener, sog. „weißer“ Wasserstoff mittels Fracking-Technologien gewinnen. Ebenso wird Wasserstoff, der als Nebenprodukt eines chemischen Prozesses abfällt, als „weißer“ Wasserstoff bezeichnet.

Derzeitige Erzeugungsarten und Kosten von Wasserstoff<sup>83</sup>:

Das meistgenutzte Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff ist die Dampfreformierung. In diesem mehrstufigen Prozess werden Kohlenwasserstoffe (insbesondere Erdgas, welches zum größten Teil aus Methan ( $\text{CH}_4$ ) besteht) zusammen mit Wasserdampf bei hohem Druck und hoher Temperatur über Katalysatoren zur Reaktion gebracht. Dabei entstehen Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) und Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ). Abgesehen von Prozessen, bei denen Wasserstoff als Nebenprodukt anfällt, erfolgt derzeit praktisch die gesamte weltweite Wasserstoffgewinnung über Dampfreformierung. Mit Herstellungskosten von 1,50 €/kg ist es zudem zurzeit das kostengünstigste Verfahren zur Wasserstoffgewinnung.

Große Hoffnungen werden auf die Herstellung von Wasserstoff aus der Wasserelektrolyse gesetzt. Dazu wird der Ausgangsstoff Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) dem Elektrolyseur zugeführt und eine elektrische Spannung angelegt. An der Kathode werden Elektronen abgegeben, es bilden sich  $\text{OH}^-$ -Ionen und Wasserstoff. Die Ionen wandern durch eine nur für diese durchlässige Elektrolytmembran und geben an der Anode die überschüssigen Elektronen wieder ab. Hier entstehen Sauerstoff (und etwas Wasser). Dabei sammelt sich das Wasserstoffgas an der Kathode und das Sauerstoffgas an der Anode. Die eingesetzte elektrische Energie wird als chemische Energie im Wasserstoff gespeichert.

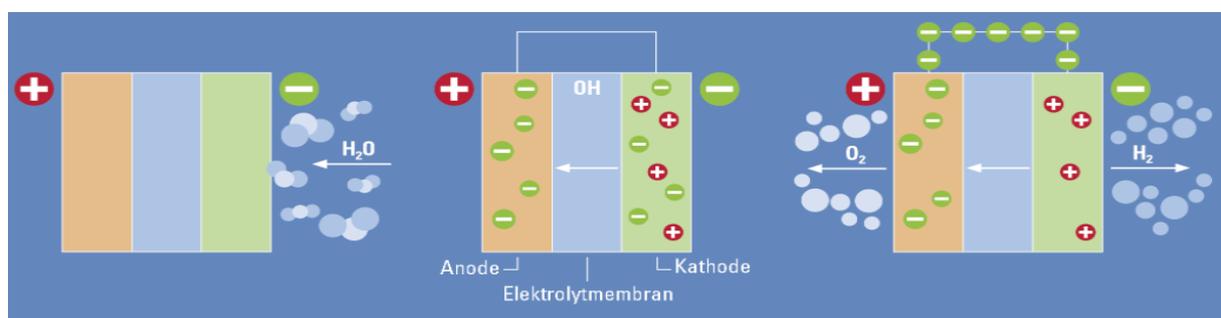


Abb. 24: Wasserelektrolyse

© NOW GmbH

<sup>80</sup> Vgl.: rechtswissenschaftliche und rechtspolitische Kurzstudie „Wasserstoff-Farbenlehre“, IKEM, 2020

<sup>81</sup> Vgl.: Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion unter <https://www.solarify.eu/2020/03/18/wasserstoff-farbenlehre/>

<sup>82</sup> Vgl.: Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion unter <https://www.solarify.eu/2020/03/18/wasserstoff-farbenlehre/>

<sup>83</sup> Vgl.: Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE unter <https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/energy/wasserstoff>

Noch ist Wasserstoff in der Herstellung aus Elektrolyse mit etwa 4 €/kg relativ teuer. Die Internationale Energieagentur (IEA) geht davon aus, dass Skalierungseffekte und sinkende Preise für elektrischen Strom aus erneuerbaren Energiequellen die Kosten bis 2030 um 30 Prozent sinken lassen können.

Neben der Elektrolyse mit Strom aus regenerativen Quellen ist die Reformierung von Biogas, welches bei der Vergärung oder Vergasung von Biomasse entsteht, eine weitere Option zur Herstellung von "grünem" Wasserstoff. Bei dieser Art der Dampfreformierung ist das entstehende CO<sub>2</sub> klimaneutral, da das Reaktionsgas aus biogenen Abfällen bzw. sog. "Energiepflanzen" gewonnen wird. Bei diesem Verfahren wird mit Kosten zwischen 6,50 € und 9,10 € je Kilogramm Wasserstoff gerechnet<sup>84</sup>.

Während bei der Pyrolyse (die thermische Spaltung unter Ausschluss von Sauerstoff, siehe "türkiser" Wasserstoff) möglichst trockene Ausgangsstoffe verwendet werden sollten, können bei der Hydrolyse auch nasse biologische Reststoffe, wie z. B. Lebensmittelabfälle, Klärschlämme oder Gülle, aber auch Reste von Kunststoffverpackungen, eingesetzt werden. Mittels hohen Druckes und hoher Temperatur werden erst Biokohle und Wasserdampf und anschließend, in einem Vergasungsprozess, Wasserstoff hergestellt. Erste Prototypen solcher Anlagen produzieren Wasserstoff zu Kosten von unter 2,00 €/kg<sup>85</sup>.

Klima- und Umweltschutzzvorteile des Wasserstoffs<sup>86</sup>:

- Bei der Verbrennung von Wasserstoff mit Luft in Verbrennungsmotoren und Gasturbinen entstehen bei optimaler Verbrennungsführung nur sehr geringe bis vernachlässigbare Emissionen.
- Stickoxidemissionen (NO<sub>x</sub>-Emissionen) stellen unter gesundheitsrelevanten Gesichtspunkten eine große Herausforderung dar und nehmen bei der Verbrennung exponentiell mit der Verbrennungstemperatur zu. Sie lassen sich durch eine geeignete Prozessführung beeinflussen. Da Wasserstoff hier größere Freiheiten als andere Brennstoffe bietet, ist eine deutliche Minderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen gegenüber Kraft- und Brennstoffen auf Basis von Mineralöl oder Erdgas möglich, sofern eine niedrige Verbrennungstemperatur erreicht wird (zum Beispiel mit hohem Luftüberschuss).
- Beim Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellen (BZ)<sup>87</sup> werden Schadstoffemissionen vollständig vermieden. Es entsteht als Reaktionsprodukt bei der Stromerzeugung aus Wasserstoff und Luftsauerstoff nur demineralisiertes Wasser.
- Der Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellen mit höherer Betriebstemperatur verursacht verglichen mit konventionellen Kraftwerken um bis zu 100-mal geringere Emissionen.
- Wasserstoff als Sekundärenergieträger bietet die Möglichkeit, unterschiedliche erneuerbare Energien flexibel in den Brenn- und Kraftstoffsektor einzuführen.
- Zur Beurteilung der Umwelt- und Klimarelevanz ist die gesamte Brennstoffkette von der Primärenergie (zum Beispiel Erdöl, Erdgas) bis zur Endanwendung (Benzin, Diesel, Kerosin) zu betrachten.

---

<sup>84</sup> Vgl.: Fraunhofer ISE, Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien, 2021

<sup>85</sup> Vgl.: <https://www.bluefluxenergy.com/de/>

<sup>86</sup> Vgl.: TÜV Süd unter <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/wasserstoff-brennstoffzellen-info/wasserstoff/eigenschaften-von-wasserstoff>

<sup>87</sup> Engl.: Fuel cell (FC)

Aktuelle Anwendungsbeispiele von Wasserstoff<sup>88</sup>:

- Wasserstoff kann mit Metalloxiden reagieren und diesen den Sauerstoff entziehen. Dieses Verfahren wird bei der Verhüttung von metallischen Erzen angewandt, insbesondere um Metalle möglichst rein zu gewinnen.
- Im Haber-Bosch-Verfahren wird aus Stickstoff und Wasserstoff Ammoniak hergestellt und daraus wiederum Düngemittel und Sprengstoffe.
- Durch verschiedene chemische Prozesse (Kohlehydrierung) wird Kohlestoff mit Wasserstoff in flüssige Kohlenwasserstoffe überführt. So lassen sich Benzin, Diesel, Kerosin und Heizöl synthetisch herstellen.
- Aufgrund seiner hohen Wärmekapazität benutzt man Wasserstoff in Kraftwerken und industriellen Anlagen als Kühlmittel. Insbesondere setzt man Wasserstoff dort ein, wo eine Flüssigkeitskühlung problematisch werden kann.
- In der Stahlerzeugung wird der Hochofen mit einem Erz-Koks-Gemisch beladen und unter Einblasen von Kohlenstaub erhitzt. Hierzu kann auch Wasserstoff genutzt werden, der dem Eisenoxid den Sauerstoff entzieht und sich zu Wasser verbindet. Neben „grünem“ Stahl fällt somit nur Wasser als Abfallprodukt an.

Wasserstoff als Energiespeicher<sup>89</sup>:

Wasserstoff lässt sich als Energieträger leicht transportieren. Wie Erdgas kann Wasserstoff zusammengepresst unter hohem Druck oder in flüssiger Form gespeichert werden. Druckspeicher gibt es in unterschiedlichen Ausführungen, von zehn Liter fassenden Gasflaschen bis hin zu Großspeichern mit 100.000 Kubikmetern. Für Brennstoffzellenfahrzeuge sind Tankdrücke von 700 bar heute technischer Standard. Aufgrund der geringeren Dicht von Wasserstoff sind solche hohen Drücke notwendig, um in einem Fahrzeugtank eine ausreichende Energiemenge zu speichern und damit die Reichweite des Fahrzeugs zu erhöhen. Außerdem gibt es noch andere Speichermöglichkeiten, die sich derzeit in der Entwicklung befinden. Man unterteilt grundsätzlich drei verschiedene Speichermöglichkeiten von Wasserstoff: gasförmig in Druckbehältern, flüssig in vakuumisolierten Behältern und als Einlagerung in Metallen auf molekularer Ebene.

Wasserstoff im Verkehr<sup>90</sup>:

Im Mobilitätssektor wird bereits seit einigen Jahrzehnten an der Nutzung von Wasserstoff geforscht – sowohl in Verbindung mit Brennstoffzellen als auch für die direkte Verbrennung – ähnlich der in einem Otto- oder Dieselmotor. Die Nutzung in der Brennstoffzelle hat, neben der höheren Effizienz im Vergleich zum Wasserstoffverbrennungsmotor, den Vorteil, dass außer Wasser keine weiteren Emissionen auftreten. Für die Betankung und Speicherung von Wasserstoff als komprimiertes Gas gibt es einen weltweiten Standard, der in der Regel 350-bar-Systeme für Busse, Schwerlastfahrzeuge und Schienenfahrzeuge vorsieht. 700-bar-Systeme kommen hauptsächlich in Pkw sowie Anwendungen, bei denen aufgrund des begrenzten Bauraumes eine höhere Energiedichte auf

---

<sup>88</sup> Vgl.: <https://www.chemie.de/lexikon/Wasserstoff.htm>

<sup>89</sup> Vgl.: <http://www.iwr.de/wasserstoff/wasserstoff-infos.html>

<sup>90</sup> Vgl.: [https://www.dlr.de/content/de/downloads/publikationen/broschueren/2020/wasserstoffstudie-teil-2.pdf;jsessionid=C15841FAE3B5093C0447928600B0F63D.delivery-replication1?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.dlr.de/content/de/downloads/publikationen/broschueren/2020/wasserstoffstudie-teil-2.pdf;jsessionid=C15841FAE3B5093C0447928600B0F63D.delivery-replication1?__blob=publicationFile&v=4)

Speichersystemebene erzielt werden muss, zum Einsatz. Im Vergleich zur Batterie weist die Kombination aus Brennstoffzellen und Wasserstoffspeicher eine günstigere Energiedichte auf, weshalb zurzeit vermehrt in den Bereichen Schwerlast-Lkw, maritime Systeme und Kurzstreckenflüge geforscht wird. Durch die Weiterverarbeitung von Wasserstoff zu synthetischen Kraftstoffen – auch “strombasierte Kraftstoffe“ oder “E-Fuels“ genannt – können durch den Einsatz erneuerbarer Energien sogar Höchstleistungsanwendungen klimaneutral ausgestaltet werden.

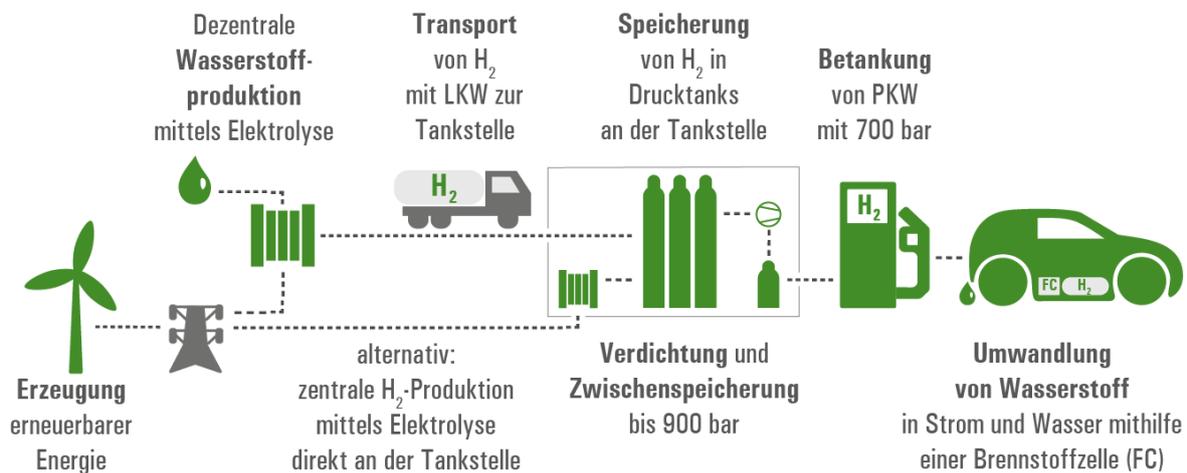


Abb. 25: Wasserstoffdistribution und -speicherung für den Verkehr

© NOW GmbH

Weitere Forschungsbeispiele für mögliche Anwendungen von Wasserstoff im Höchstleistungssegment:

- MAN erforscht aktuell, welche Anpassungen und Umrüstungen vorgenommen werden müssen, um ihre mit Schweröl und Schiffsdiesel angetriebenen Schiffsmotoren für e-Diesel zu ertüchtigen.
- Rolls Royce testet Flugzeugtriebwerke für den Einsatz mit e-Kerosin.
- Global agierende Logistikunternehmen wie DHL und Schenker überprüfen derzeit, wie ihre Fahrzeug- und Flugzeugflotte auch mittels e-Fuels zukünftig klimaneutral werden kann.
- Die Raffinerie Heide produziert bereits heute im Rahmen von Forschungsprojekten e-Kerosin.
- Unternehmen wie Sunfire produzieren bereits heute wasserstoffbasierte Kraftstoffe und Industriegase.
- Luftfahrt- und Reederei-Verbände beraten derzeit, welche Rahmenbedingungen für einen Markthochlauf von e-Kerosin bzw. e-Diesel notwendig sind.
- Die Bundesregierung plant, e-Kerosin bzw. e-Schiffsdiesel für die Bundesluftwaffe bzw. die Marine zur Verfügung zu stellen.

Sicherheitstechnische Aspekte zum Wasserstoff<sup>91</sup>:

Wasserstoff ist unter Umgebungstemperatur und -druck ein ungiftiges, leicht flüchtiges Gas. In Kombination mit Sauerstoff, bei einer  $H_2$ -Konzentration zwischen 4 und 75 % kann ein explosionsfähiges Gemisch entstehen. Bei höheren Wasserstoffkonzentrationen ist eine Zündung des

<sup>91</sup> Vgl.: Landkreis Schaumburg, HyStarter-Konzept – Anhang 2: Sicherheitstechnische Aspekte, 2021

Gasgemischs aufgrund der zu geringen Sauerstoffkonzentration nicht mehr möglich. Zur Explosion ist zusätzlich eine Zündquelle erforderlich, welche die Knallgas-Reaktion auslöst.

Für die Sicherheit der Anwendung von Wasserstoff als Kraftstoff oder Energiespeicher bedeutet dies folgendes:

- Im Außenbereich bzw. in gut gelüfteten Räumen ist es aufgrund der Flüchtigkeit von Wasserstoff sehr unwahrscheinlich, dass ein zündfähiges Gemisch entsteht. Ebenso können Fahrzeugtanks nicht explodieren, die 100 % Wasserstoff enthalten. In Werkstätten und anderen Räumen vermeiden bauliche Maßnahmen die Ansammlung von Wasserstoff in Nischen und unter Dachflächen, zusätzlich installierte Wasserstoffsensoren alarmieren im Fall von Leckagen.
- Gasförmiger Wasserstoff kann problemlos auch über längere Zeit ohne Verluste in Drucktanks gespeichert werden. Die Diffusionsrate der Moleküle durch die Tankwand (Stahl oder Kunststoff) ist vernachlässigbar gering und stellt kein Sicherheitsproblem dar. Wenn Wasserstoff kaltflüssig bei minus 253°C gelagert oder transportiert wird, sorgt ein Sicherheitsventil im Tank dafür, dass bei Erwärmung (Übergang in die Gasphase) kein Überdruck im Tank entsteht. Dieses Sicherheitsventil öffnet ab einem definierten Innendruck automatisch und lässt Wasserstoff in die Umgebung ab. In der Vergangenheit wurden Fahrzeuge erprobt, die mit Flüssigwasserstoff statt wie heute üblich mit Druckwasserstoff betrieben wurden. Auch diese Fahrzeuge verfügten über die beschriebene Sicherheitseinrichtung, was dazu führte, dass sich der Tank bei längeren Stillstandzeiten „von selbst entleert“. Diese Beobachtung hat jedoch nichts mit der Diffusivität von Wasserstoff zu tun und lässt sich nicht auf Druckgastanks übertragen.

Die Versprödung von Metallen oder Metalllegierungen durch Wasserstoff ist ein bekanntes Phänomen. Polymere Werkstoffe sind nicht durch diesen Effekt betroffen. Weltweit existiert ein mehr als 2.000 km umfassendes Wasserstoffnetzwerk, das seit Jahren sicher betrieben wird. Durch geeignete Materialauswahl und Auslegung der Komponenten kann der theoretischen Gefahr der Versprödung entgegengewirkt werden, eine vorzeitige Alterung oder Versprödung wird damit minimiert und weitestgehend ausgeschlossen.

Ähnlich wie Fahrzeuge mit verbrennungsmotorischem Antrieb können auch Brennstoffzellenfahrzeuge in Unfälle verwickelt werden. Feuerwehren müssen bei der Bergung von verunglückten Brennstoffzellenfahrzeugen beachten, dass die Hochvolttechnologien des elektrischen Antriebs abgeschaltet sind und sich kein Wasserstoff entzündet hat. Da das Gasgemisch im Fahrzeugtank außerhalb der Explosionsgrenzen liegt, verbrennt der Wasserstoff im Falle einer Beschädigung des Tanks kontrolliert in einer farblosen Flamme, die mithilfe einer Wärmebildkamera auch tagsüber sichtbar gemacht werden kann. Im Gegensatz zum verunfallten Fahrzeug mit Verbrenner brauchen sich die Feuerwehrleute aber keine Gedanken um ausgelaufenes Öl, Benzin oder Diesel zu machen. Das Erdreich muss nicht dekontaminiert werden, die Straße bleibt ohne weitere Maßnahmen befahrbar. Auch besteht keine Explosionsgefahr aufgrund von sich bildenden Kraftstoffpfützen, da Wasserstoff leichter als Luft ist und sich schnell verflüchtigt.

Der Betrieb von Fahrzeugen mit Druckwasserstoffspeichern in Garagen und Tunneln ist dank der strengen Zulassungsverfahren sicher möglich. Die bereits heute in Garagen und Tunneln eingebauten Ventilationssysteme haben für den Normalbetrieb von Wasserstofffahrzeugen völlig ausreichende Luftwechselraten. Ob die Ventilatoren explosionsgeschützt ausgeführt werden müssen, ist bisher noch nicht abschließend geklärt und hängt von den jeweils angenommenen Szenarien ab.

Die Betankung von Wasserstofffahrzeugen mit 700 bar erfolgt unter Verwendung von Betankungsprotokollen, die sicherstellen, dass sich die Druck- und Temperaturrampen zu jeder Zeit im sicheren Bereich befinden. Sobald eine der vorgegebenen Druck- oder Temperaturbereiche überschritten wird, beendet die Tankstelle automatisch den Betankungsvorgang und fährt in den Sicherheitsmodus. Es ist ebenfalls sicherheitstechnisch ausgeschlossen, den Betankungsvorgang zu starten, wenn die Tankkupplung nicht richtig aufgesetzt und arretiert wurde.

Fragen und Antworten:

Bei welchen Herausforderungen kann die Nutzung von Wasserstoff eine Lösung bieten?<sup>92</sup>

Es ist absehbar, dass fossile Energieträger, auf die unsere Energieversorgung aktuell aufgebaut ist, zukünftig nicht mehr zu den heutigen Bedingungen genutzt werden können. Dafür gibt es zwei Gründe:

- Die Vorräte an Erdöl, Erdgas, Stein- und Braunkohle sind begrenzt. Die weltweiten theoretischen Vorräte an Erdöl reichen noch einige Jahrzehnte, die von Erdgas und Stein- und Braunkohle einige Jahrhunderte. Allerdings ist wegen des zunehmenden Förderaufwandes bei fortschreitender Erschöpfung eines Feldes mit deutlich höheren Förderkosten und damit steigenden Preisen zu rechnen.
- Mit der weiteren Verbrennung von fossilen Primärenergieträgern wird durch die Freisetzung von CO<sub>2</sub> in das Gleichgewicht der Atmosphäre eingegriffen. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge des Klimasystems ist es sehr schwer, mögliche Folgen genau vorherzusagen. Erste Auswirkungen sind bereits deutlich zu beobachten.

Daher muss die Energieversorgung auf die Grundlage von nachhaltiger, das heißt dauerhaft vorhandener und klimaverträglicher Primärenergieträger (Energie aus Biomasse, Solar-, Wind- und Wasserenergie sowie Geothermie) gestellt werden. Wasserstoff kann dabei als nachhaltiges Speicher- und Transportmedium dienen.

Welche Rolle kann Wasserstoff bei der Transformation des Energieversorgungssystems spielen?<sup>93</sup>

Wasserstoff eignet sich sehr gut als Speicher- und Transportmittel insbesondere für regenerativ erzeugten elektrischen Strom und bietet eine universelle "Energie-Plattform" für alle Formen der Anwendung.

- Speicherung: Wasserstoff bietet die Möglichkeit, die mittels erneuerbarer Energieanlagen erzeugte, volatile elektrische Energie, welche nicht zeitnah genutzt oder verteilt werden kann, zu speichern und zu einem späteren Zeitpunkt wieder nutzbar zu machen.
- Transport: Gleichzeitig bietet Wasserstoff eine technisch sehr effiziente Option des Energietransportes (Moleküle lassen sich besser transportieren als Elektronen). Damit ergeben sich, neben dem Kabel bzw. der Freileitung, alternative Möglichkeiten des Stromtransportes.

---

<sup>92</sup> Vgl.: Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband, Berlin, 2021, unter <https://www.dwv-info.de/wissen-und-unwissen/fragen-und-antworten>

<sup>93</sup> Vgl.: Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband, Berlin, 2021, unter <https://www.dwv-info.de/wissen-und-unwissen/fragen-und-antworten>

## Welche Vorteile bietet Wasserstoff?<sup>94</sup>

Wasserstoff ist nachhaltig verfügbar, klimaverträglich in der Anwendung und universell einsetzbar.

- Nachhaltig: Wasserstoff ist das häufigste Element auf der Erde und seine Rohstoffe (Wasser, Kohlenwasserstoff und andere organische Verbindungen) sind, zumindest theoretisch, dauerhaft verfügbar. Bei der energetischen Nutzung von Wasserstoff entsteht Wasser, aus dem im Prinzip wieder Wasserstoff gewonnen werden kann. Es ist allerdings notwendig, zukünftig auch weitere Herstellungsmethoden (z.B. die Methanpyrolyse oder die Salzwasserelektrolyse) zu nutzen.
- Klimaverträglich: Bei der Verwendung von Wasserstoff (d.h. bei der Verbrennung zur Wärmeerzeugung oder in der Brennstoffzelle) entstehen außer Wasser und Wärme (in der Brennstoffzelle) keine weiteren Emissionen. Wird Wasserstoff über die „kalte Verbrennung“ innerhalb einer Brennstoffzelle in Strom, Wasser und Wärme umgewandelt, entstehen weder Schadstoff- noch Treibhausgasemissionen. Unter klimaschutztechnischen Gesichtspunkten ist dabei von Bedeutung, dass der Wasserstoff entsprechend klimaneutral hergestellt wurde („grüner“ Wasserstoff).
- Universell einsetzbar: In Verbindung mit allen regenerativen und konventionellen Energieträgern bietet Wasserstoff als Energiespeicher- und Energietransportmittel enorme Freiheitsgrade bei der Produktion und der Nutzung. In vielen Anwendungen in den Sektoren Verkehr, Industrie und Wärmeerzeugung kann Wasserstoff als Kraft-, Treib- oder Brennstoff genutzt werden.

## Warum „grüner“ Wasserstoff in der Region?

In vielen Regionen zwingen regionale Klimaschutzpläne die Verantwortlichen vor Ort, Konzepte zu entwickeln, mit welchen sich die lokalen Treibhausgasemissionen senken bzw. vermeiden lassen. Die größten Verursacher von Treibhausgas- (THG-) Emissionen werden in regionalen Industrieanlagen und dem lokalen Verkehr verortet. Insbesondere Anwendungen im ÖPNV (Busverkehr) und in der Entsorgung (Müllfahrzeuge) lassen sich mit Brennstoffzellenantrieben nachhaltig und klimaneutral nutzen. In Verbindung mit Windparks oder Solarfreiflächenanlagen in der Region, die abgeregelt werden müssen, wenn der erzeugte, „grüne“ Strom nicht eingespeist werden kann, bietet sich hier eine Wertschöpfungskette für Energie, deren Erlöse (energetischer und finanzieller Art) in der Region nutzbar gemacht werden können. Durch die Gestaltungshoheit der Kommune und der regionalen Akteur\*innen können Geschäfts- und Betriebsmodelle erarbeitet werden, welche die wirtschaftliche Entwicklung der Region fördern können. Damit ist Wasserstoff mehr als „nur“ Klimaschutz.

---

<sup>94</sup> Vgl.: Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband, Berlin, 2021, unter <https://www.dwv-info.de/wissen-und-unwissen/fragen-und-antworten>