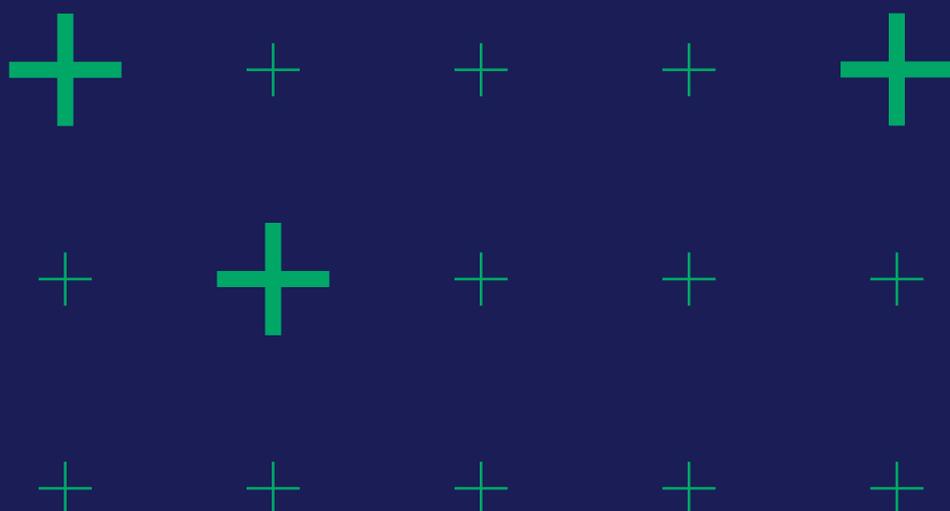


HYEXPERTS LEITFADEN
REGIONALE
WASSERSTOFFPROJEKTE
ERFOLGREICH KONZEPTIONIEREN



Studie im Auftrag des
Bundesministeriums für
Digitales und Verkehr
Herausgeberin: NOW GmbH
Autorin: Accenture



now-gmbh.de

IMPRESSUM

Erstellt durch

NOW GmbH
Nationale Organisation Wasserstoff-
und Brennstoffzellentechnologie

Fasanenstraße 5 | 10623 Berlin
T. 030 · 311 61 16-100
E. kontakt@now-gmbh.de

Autorinnen und Autoren

Alexander Gehling (NOW)
Till Gerstein (Accenture)
Patrick Wienert (Accenture)
Robert Lange (Accenture)
Thomas Hauler (Accenture)
Peter Cheng (Accenture)
Marcel Frohreich (Ingenion)

Im Auftrag des

Bundesministeriums für
Digitales und Verkehr (BMDV)
Invalidenstraße 44
10115 Berlin

Gestaltung und Realisation
peppermint werbung berlin

Erscheinungsdatum

November 2024

Copyright

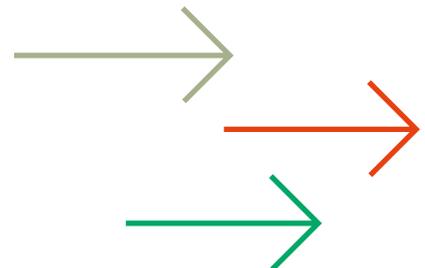
Die Nutzungsrechte liegen – soweit
nicht explizit genannt – beim
Bundesministerium für Digitales
und Verkehr, der NOW GmbH und
bei Accenture.

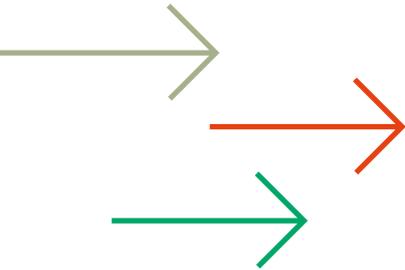
Haftungshinweis

Die Verantwortung für
den Inhalt dieser
Veröffentlichung liegt
bei den Autorinnen
und Autoren.

Inhalt

+¹	Einleitung	5
+²	Ausgangsbasis und Motivation	7
+³	Struktur des Leitfadens	10
+⁴	Potenzialanalysen für Wasserstoff	14
	4.1 H ₂ -Erzeugung und -Versorgung	16
	4.2 Bedarfe	24
	4.3 Bedarfe regionaler Mobilitätskonzepte	25
+⁵	Konzeptentwicklung für H₂-Projekte	28
	5.1 Erzeugungskonzepte	29
	5.2 Infrastrukturkonzepte	36
	5.3 Pipelinekonzepte	38
	5.4 Trailerkonzepte	42
	5.5 Tankstellen	46
	5.6 Mobilitätsanwendungen	53
	5.7 Gesamtkonzepte, Sektorenkopplung und Digitalisierung	59
	5.8 Technologielieferanten	61
+⁶	Genehmigungen und Regulatorik	62
	6.1 Genehmigungsverfahren entlang der H ₂ -Wertschöpfungskette	63
	6.1.1 Genehmigungsverfahren H ₂ -Erzeugung	67
	6.1.2 Genehmigungsverfahren H ₂ -Infrastruktur	69
	6.2 Regulatorische und marktwirtschaftliche Treiber entlang der H ₂ -Wertschöpfungskette	70
+⁷	Fördermöglichkeiten	74
+⁸	Links, Datengrundlagen und Tools	76



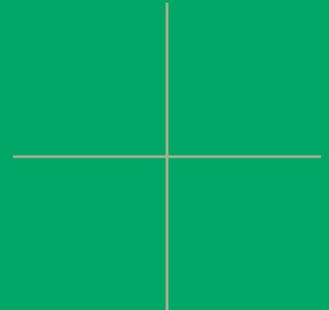


+ Anhang	78
A1 Bedarfe in der Industrie	79
A2 Entwicklung von Vision und Roadmap	82
+ Abkürzungsverzeichnis	84
+ Abbildungsverzeichnis	85
+ Tabellenverzeichnis	86
+ Literaturverzeichnis	87



Disclaimer: Die im Leitfaden referenzierten HyExperts Berichte bilden nur einen Teil der in den Berichten durchgeführten Analysen und entwickelten Konzepte ab. Die Inhalte dieses Leitfadens werden auf die wesentlichen Methoden reduziert. Die kompletten Beschreibungen sind den vielfältigen HyExperts Berichten zu entnehmen.

+¹ Einleitung



Seit 2019 unterstützt der durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) etablierte Regionen-Wettbewerb »HyLand – Wasserstoffregionen in Deutschland« bei der Initiierung, Planung und Umsetzung von Wasserstoff-Wertschöpfungsketten. Im Rahmen des »Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie« (NIP) wurde in den Jahren 2019 und 2021 der HyLand-Wettbewerb durchgeführt.

In den bislang zwei Wettbewerbsrunden erhielten 28 Regionen die HyExperts Förderung. Die ausgewählten Regionen wurden bei der Analyse regionaler Potenziale zur Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff unterstützt. Die Umsetzung in konkrete Projekte wurde vorbereitet; wirtschaftliche und methodische Konzepte entwickelt. Sie bereiten die Umsetzung der Potenziale in konkreten Projekten vor, indem sie wirtschaftliche und methodische Konzepte entwickeln. Die Studien und Konzeptentwicklungen der HyExperts Regionen zeigen, dass Regionen von den Potenzialen lokal erzeugten und eingesetzten Wasserstoffs massiv profitieren können, unter anderem durch die regionale Wertschöpfung sowie dem Aufbau von Expertise in Wirtschaft und Verwaltung.

Unternehmen stehen unter wachsendem regulatorischem und wirtschaftlichem Transformationsdruck. Gleichzeitig steigen die Kosten fossiler Energieträger. Um langfristig wettbewerbsfähig zu bleiben und sich vor wirtschaftlichen Risiken zu schützen, müssen Unternehmen Wissen über technische Alternativen und Zugang zu den Infrastrukturen und Märkten erlangen. Die Dekarbonisierung des Verkehrssektors betrifft zahlreiche unterschiedliche Akteure in den Regionen – von kleinen bis großen Speditionen über Betreiber von Busflotten bis hin zu kommunalen Unternehmen mit Abfallsammelfahrzeugen. Regionale H₂-Erzeugung und Infrastruktur sollten parallel

zur Nutzung in der Mobilität geplant werden. Die Erzeugung von Wasserstoff in kleinen, dezentralen Elektrolyseuren und dessen Transport zu den umliegenden Tankstellen bieten regionalen Akteuren beträchtliche Chancen für zusätzliche Wertschöpfung und können zugleich als Basis für den weiteren Ausbau regionaler H₂-Systeme dienen. Zudem können lokal über kürzere Strecken Transportkosten vermieden oder Synergien zwischen Sektoren sinnvoll genutzt werden.

Die im HyLand Wettbewerb geförderten H₂-Regionen entwickeln H₂-Ökosysteme, die als Modellregionen dienen. Gemeinsam mit lokalen Akteuren wird die gesamte Wertschöpfungskette, von der Erzeugung des Wasserstoffs über dessen Speicherung und Transport, bis hin zu seiner Nutzung, konzeptioniert und praktisch etabliert. Auf diese Weise werden regionale Infrastrukturen aufgebaut und Kompetenzen erworben, welche für den breiten Einsatz von Wasserstoff erforderlich sind. Folglich können die geförderten H₂-Regionen als Nukleus für den Aufbau einer nationalen H₂-Wirtschaft fungieren. Dafür müssen die gewonnenen Erfahrungen und das Fachwissen weiteren Regionen als Blaupause bereitgestellt werden.

Im Zuge der verschiedenen HyExperts Projekte ist ein umfangreicher Wissensschatz entstanden, welcher in einzelnen Berichten, Leitfäden und Präsentationen dokumentiert ist. Dieser Leitfaden »HyExperts – Regionale Wasserstoffprojekte erfolgreich konzeptionieren« konsolidiert diese Inhalte, um das Wissen und angewandte Vorgehensweisen für Akteure anderer Regionen nutzbar zu machen. Der Leitfaden dient als Handreichung für Städte, Kommunen und Unternehmen bei der Planung von H₂-Projekten.

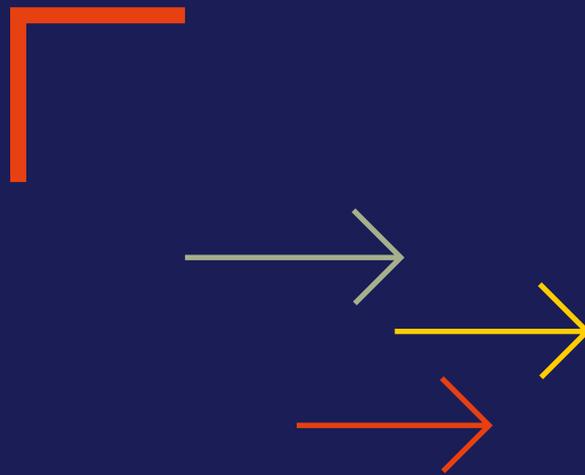
DIE GRUNDLAGE FÜR DEN LEITFADEN LIEFERN DIE ERKENNTNISSE DER EINZELNEN HYEXPERTS BERICHTS, DIE UM AKTUELLE LITERATUR ERWEITERT WERDEN.

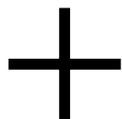
Die Grundlage für den Leitfaden liefern die Erkenntnisse der einzelnen HyExperts Berichte, welche um aktuelle Literatur erweitert werden. Die Intention des Leitfadens liegt in der Wissensvermittlung bezüglich Vorgehensweisen und Methoden, die im Rahmen der HyExperts Studien erprobt und beschrieben sind.

Der Leitfaden ist als Nachschlagewerk universell einsetzbar und ermöglicht die Nutzung und Anwendung des Erfahrungsschatzes aus 28 erfolgreichen HyExperts Projekten.

$+$ ²

Ausgangsbasis und Motivation





Ausgangsbasis des Leitfadens



Im Zuge der HyLand Förderung konnten sich Regionen in drei Kategorien für verschiedene Fördermechanismen bewerben: Während die Unterstützung in der Kategorie »HyStarter« als Aktivator für H₂-Aktivitäten dient, zielt die Förderung der Kategorie »HyExperts« auf die Ent-

wicklung von Umsetzungskonzepten auf Grundlage der regionalen H₂-Potenziale ab. Die fortgeschrittene Unterstützung »HyPerformer« dient der konkreten Umsetzung der konzeptionierten H₂-Projekte.

Abbildung 1: HyLand-Kategorien im Überblick

HyStarter

HyLand I: 9 Regionen, HyLand II: 15 Regionen – Aktivierung, Organisation der Akteurslandschaft



HyExperts

HyLand I: 13 Regionen, HyLand II: 15 Regionen – Erstellung von umsetzungsreifen Konzepten



HyPerformer

Hyland I: 3 Regionen, HyLand II: 3 Regionen – Umsetzung konkreter Wasserstoffprojekte



- **HyStarter**-Regionen haben geringe Erfahrungen und Kenntnisse zu Wasserstoff und dessen Potenzialen in der Energiewende. Ein Team aus Beratungsunternehmen betreute bisher insgesamt 24 Regionen und versorgte sie mit umfangreichem Wissen zu technischen, wirtschaftlichen und regulatorischen Fragen. Zum Abschluss ist ein Akteursnetzwerk etabliert, welches über das nötige Know-how verfügt, um ein positives Umfeld für die Entwicklung von H₂-Projekten zu schaffen.
- **HyExperts**-Regionen sind bereits vertraut mit dem Thema Wasserstoff und Brennstoffzelle und es gibt erste Analysen, Projektpartner und Projektideen rund um das Thema Wasserstoff im Verkehrssektor. Für die umfassende Weiterentwicklung der Projektideen ist ein Gesamtkonzept mit Untersuchungen zur technischen und

wirtschaftlichen Machbarkeit nötig. Die Regionen erhalten eine Förderung zur Beauftragung eines externen Dienstleisters, welcher die Machbarkeitsstudien in ihrem Auftrag durchführt.

- **Die HyPerformer**-Förderung hat zum Ziel, integrierte Konzepte mit Fokus auf den Mobilitätsbereich umzusetzen. Zu diesem Zweck erhalten die geförderten Regionen Investitionszuschüsse für den Kauf von Anlagen und Anwendungen. Das Ziel einer HyPerformer Region ist die möglichst schnelle und zielgerichtete Umsetzung des regionalen Konzepts zur integrierten H₂-Nutzung.

Zur verständlichen Abgrenzung der Kategorien HyStarter und HyExperts wird auf die nachfolgende [Abbildung 2](#) verwiesen. Diese veranschaulicht das aufeinanderfolgende Prinzip der Phasen und stellt jeweilige thematische Schwerpunkte innerhalb der HyStarter- und HyExperts-Kategorien dar.

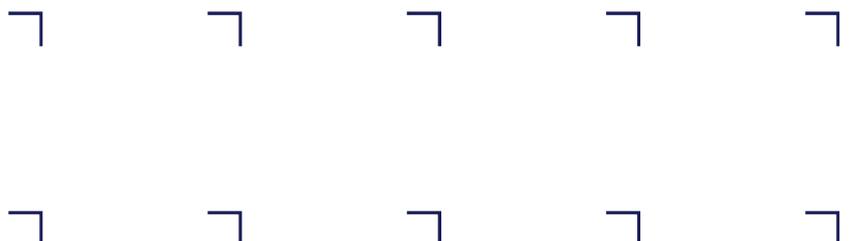


Abbildung 2: Inhaltliche Fokussierung der HyStarter und HyExperts Projekte



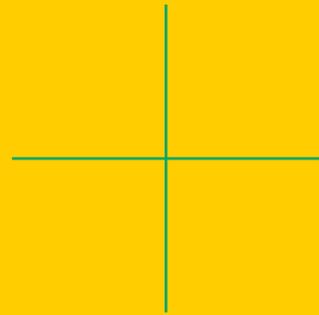
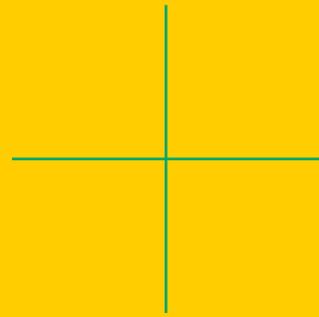
Die öffentlich zugänglichen HyExperts-Studien (www.hy.land/downloads) enthalten Gesamtkonzepte zur integrierten Nutzung von Wasserstoff. Dabei fokussieren sie den Aufbau von Infrastrukturen und die Beschaffung von Technologien im Verkehrssektor, begründet durch den unmittelbaren Handlungsdruck für Flottenbetreiber in kommunaler sowie in privater Hand – beispielsweise durch Vorgaben wie dem Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge (engl. Clean Vehicles Directive, CVD), der CO₂-Maut oder der EU-Flottenverordnung.

Grundsätzlich behandeln die HyExperts Studien die Ermittlung regionaler H₂-Erzeugung- oder Versorgungspotenziale. Angefangen mit der Ermittlung der Verfügbarkeit von Strom aus Erneuerbaren Energien (EE-Strom) zur Produktion von Wasserstoff oder Möglichkeiten, größere Mengen zu importieren. Anschließend erfolgen Analysen von möglichen Erzeugungs-, Verteilungs- und Nutzungskonzepten. Die Analysen unterscheiden sich dabei sowohl in der Tiefe als auch in der Breite: Während einige Regionen gezielt einzelne Projekte identifizieren und bewerten, entwickeln andere Regionen Konzepte auf höherer Betrachtungsebene. Im Ergebnis geben die erstellten Studien einen breiten Überblick über die Herausforderungen und den Ideenreichtum bei der Konzeptentwicklung.





Struktur des Leitfadens



Der vorliegende Leitfaden basiert auf den Erkenntnissen der 28 HyExperts-Regionen, die Förderungen in den Phasen I oder II erhalten und deren Wissen in einzelnen Dokumenten festgehalten haben.^[1] **Der Leitfaden hat zum Ziel, die entwickelten und angewandten Methoden der HyExperts zur regionalen H₂-Potenzialanalyse und der Entwicklung von Umsetzungskonzepten entlang der H₂-Wertschöpfungskette zu konsolidieren.**

[1] Eine Übersicht der geförderten Regionen und der jeweiligen Dokumentationen der Ergebnisse ist auf der HyLand-Website (www.hy.land) in der Rubrik »Downloads« zu finden.

Der Leitfaden wird Regionen, Kommunen oder Unternehmen als Vorlage oder Nachschlagewerk empfohlen, um lokale H₂-Konzepte eigenständig zu entwickeln und Analysen zur Potenzialermittlung durchzuführen. Die im Leitfaden gegebenen Best Practice Beispiele und Empfehlungen zur weiterführenden Lektüre sind durch Querverweise auf die jeweiligen HyExperts Studien oder andere Fachliteratur gestützt. Darüber hinaus beinhaltet er Erkenntnisse aus Ergebnissen der HyStarter- und HyPerformer-Regionen.

Allgemeine Struktur des Leitfadens



→ **Potenzialanalyse:**

In diesem Kapitel werden Methoden zur Prognose und Beurteilung von Möglichkeiten zur H₂-Erzeugung und -Versorgung beschrieben (siehe [Kapitel 4.1](#)). Im Anschluss werden Vorgehensweisen, Grundlagen und Ausgangsdaten, zur Erstellung von Bedarfsprognosen bezüglich Wasserstoffs im Sektor Mobilität (siehe [Kapitel 4.2](#)) ausgeführt. Ein Überblick zur Ermittlung industrieller H₂-Bedarfe ist dem [Anhang 1](#) zu entnehmen.



→ **Genehmigungen und Regulatorik:**

In diesem Kapitel wird insbesondere auf genehmigungsrechtliche Verfahren sowie regulatorische Rahmenbedingungen und Gesetze eingegangen. Neben allgemeinen Genehmigungsverfahren wird gesondert auf die H₂-Erzeugung und -Infrastruktur eingegangen.



→ **Konzeptentwicklung:**

Hier wird die Entwicklung von H₂-Projekten entlang der Wertschöpfungskette mit Fokus auf den Bereich Mobilität gezeigt. Das Kapitel enthält umfangreiche Checklisten zur erfolgreichen Planung und Bewertung von Projekten der H₂-Erzeugung (siehe [Kapitel 5.1](#)), Infrastruktur (siehe [Kapitel 5.2 bis 5.5](#)) und Fahrzeugen (siehe [Kapitel 5.6](#)). Ziel ist Nachweise der techno-ökonomischen Machbarkeit zu erbringen und Investitionsentscheidungen vorzubereiten.



→ **Fördermöglichkeiten:**

An dieser Stelle im Leitfaden werden Pfade zur Identifikation geeigneter Förderangebote beschrieben. Enthalten sind Anlaufstellen zur Identifikation geeigneter Programme sowie zur Förderberatung.

Darüber hinaus sind an dafür geeigneten Stellen gesonderte [Technologie Deep Dives](#), grundlegendes Basiswissen und besondere [Best Practices](#) hervorgehoben. An ausgewählten Schritten des Leitfadens sind zudem Herausforderungen inklusive zugehöriger Lösungsansätze gekennzeichnet. Dies dient dazu, Aufmerksamkeit für potenzielle Hürden im beschriebenen Prozess zu schaffen. Verweise auf Tools sind durch entsprechende Icons markiert (siehe [Abbildung 3](#)).

Struktur innerhalb der Kapitel 4 und 5

Die folgenden Kapitel zu [Potenzialanalysen](#) und [Konzeptentwicklung](#) ([Kapitel 4](#) und [5](#)) geben eine Auswahl an Methodiken wieder, welche in den HyExperts Studien angewandt werden. Darunter zählen Methoden der Analyse von EE-Verfügbarkeiten, der Ableitung von H₂-Erzeugungspotenzialen, der Identifikation von Transportrouten- und Technologien, der Ermittlung von H₂-Bedarfen (qualitativ Bottom-up oder quantitativ Top-down), der Grobkonzeptionierung von H₂-Tankstellen und vielem mehr. Wie beschrieben, baut die Entwicklung von Konzepten oftmals auf den Kenntnissen zu regionalen Potenzialen auf. Bei den entsprechenden Schritten setzt demnach [Kapitel 5](#) die Parameter des [Kapitels 4](#) voraus.

Für einen strukturierten und eingängigen Aufbau des Leitfadens werden in den folgenden Kapiteln die Stufen der Wertschöpfungskette einzeln betrachtet. Die jeweiligen Unterkapitel sind wiederum in folgende Abschnitte gegliedert:

➔ **Treiber, Ziele und Parameter:**

Hier werden Ziele und Motivation der jeweiligen Vorgehen erläutert sowie die wesentlichen notwendigen Parameter aufgelistet.

➔ **Vorgehen:**

Hier werden die empfohlenen Methoden im Checklisten Format beschrieben. Die jeweiligen Schritte sind mit Querverweisen zu vertiefender Lektüre in den jeweiligen HyExperts Studien hinterlegt.

➔ **ggf. Best Practices:**

An dafür geeigneter Stelle wird als Beispiel für eine gute Methode oder dessen gute Umsetzung ein Best Practice genannt und auf die jeweilige Quelle verwiesen.

Abbildung 3: Beispiele von Technologie Deep-Dives, Best Practice Beispielen und Herausforderungen inkl. Lösungsansätzen

Herausforderung Nr. 4: Netzanbindung

- Es kann vorkommen, dass in frühen Planungsphasen bestehende Kapazitäten und Anschlüsse nicht verifiziert werden (z. B. von Verteilnetzen, Strom, Wasser)

Lösungsansatz: Frühzeitige Klärung von der Anschlusskapazität und Parameter

- z. B. Leistungsparameter, mögliche Ausbaupläne mit Netzbetreiber und Anbiestern klären und ggf. Anforderungen mitteilen, um Anpassungen (z. B. Ausbau, Erweiterung, Umlötung) ergreifen können

Best Practice: Potenzialanalyse PV-Erzeugungskapazität

GIS-Analyse mit Hilfe von Ausschlusskriterien für PV-Freiflächenanlagen

Methode

- Bestimmung des Untersuchungsgebiets
- Analyse der Raumwiderstände und Ermittlung der Ausschlussflächen
- Berechnung des theoretischen PV-Potenzials aus Differenzflächen

Ergebnis

- Übersichtskarte der potenziellen PV-Flächen
- Theoretisches PV-Potenzial [MW]
- PV-Erzeugungspotenzial [GWh/a]

Tool

- Geo-Informationssysteme (GIS)

Technologie Deep-Dive: H₂-Erzeugung

Basiswissen H₂-Erzeugung:
Technologieübersicht existierender Elektrosysetechnologien zur Herstellung von grünem Wasserstoff [HyExperts II – Landkreis Helmstedt, S. 52 ff.](#)

Tabelle 1: Vergleich der verfügbaren Elektrosysetechnologien nach aktuellem Stand der Technik

Parameter	Stand der Technik (2020)			
	AEL	PEM	SOEC	AEM
Elek. Wirkungsgrad [% _{el}]	66,7	65,4	83,3	60,6
Stromverbrauch (bei Nominalkapazität) kWh/kg _{H₂}	50	51	40	55
CAPEX [€/kW _{el}]	600	900	2.100	1.000
O & M [€/kg _{H₂} (d)/a]	50	41	410	34
Anfahrtszeit (heiß)	60 Sec	2 Sec	600 Sec	30 Sec
Anfahrtszeit (kalt)	60 Min	30 Sec	12 h	30 Min
Stack Degradation [%/1000h]	0,12	0,19	1,9	> 1,0
Verbrauch krit. Rohmaterialien g/kW	0,6	2,5	-	1,7

AEL - alkalische Elektrolyse
SOEC - Hochtemperatur-Elektrolyse
PEM - Protonenaustauschmembran Elektrolyse
AEM - Anionenaustauschmembran Elektrolyse

Ein umfangreiches Basiswissen, inklusive Elektrolyse- sowie Biomasseverfahren, ist im Abschlussbericht von [HyExperts II – Region Nordhessen, S. 180 ff.](#) in Form von Steckbriefen dargestellt.

+

Potenzialanalysen für Wasserstoff



Das Kapitel zeigt die Vorgehensweise für die Analyse regionaler H₂-Potenziale entlang der Wertschöpfungskette von der EE-Erzeugung bis zur Nutzung des Wasserstoffs. Potenzialanalysen quantifizieren die Möglichkeiten zum Aufbau von regionalen H₂-Wirtschaften. Die beschriebenen Methoden sind aufgeteilt in die Bereiche Erzeugung, Versorgung und H₂-Bedarfe für regionale Mobilitätskonzepte. Zusätzlich ist im [Anhang des Leitfadens ein Vorgehen zur Identifikation von H₂-Bedarfen typischer regionaler Industrien](#) zu finden.

Folgende **wesentliche Output-Parameter** können Bestandteil einer Potenzialanalyse sein:

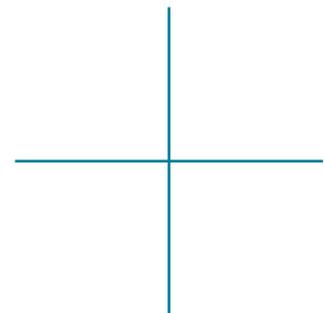
- Übersicht aller relevanten Stakeholder und Akteure in der Region
- Regionale EE-Erzeugungspotenziale [GWh/a]
- Regionale jährliche Stromüber- bzw. -unterdeckung [GWh/a]
- Regionale H₂-Erzeugungskapazitäten auf Basis der EE-Verfügbarkeit [t/a]
- Bestehende H₂-Verteilmöglichkeiten via bestehendem Erdgasnetz [Karte relevanter Leitungsverläufe]
- H₂-Bedarfspotenziale: Mobilität pro Fahrzeugtyp [t/a]
- H₂-Bedarfspotenziale: Industrie [t/a]



H₂ SCOUT
FOR REGIONS



Für die Quantifizierung der Potenziale kam in den Regionen des HyStarter II das Tool des Online-Szenarienrechners [H₂Scout](#) zum Einsatz. Der Szenarienrechner ermöglicht es den Akteuren vor Ort, Szenarien einer regionalen H₂-Wirtschaft für ein definiertes Zieljahr zu konfigurieren. Das Tool identifiziert das kostenoptimale Infrastruktursystem unter den gegebenen Rahmenbedingungen und theoretischen Annahmen. Das Infrastruktursystem ist dabei in der Lage, eine definierte Nachfragemenge an Wasserstoff für unterschiedliche Sektoren für das Jahr 2030 versorgungssicher zu decken, entweder aus eigener Produktion, aus vorhandenen Speichern oder durch Import von Wasserstoff (sofern im Szenario zugelassen). Weitere Informationen zu den konfigurierten Szenarien der HyStarter II Regionen sind im [HyStarter II Ergebnisbericht, S. 20 ff.](#) zu finden.



+4.1

H₂-Erzeugung und -Versorgung

Wesentliche Bestandteile der Potenzialanalyse sind die **Abschätzung von EE- und H₂-Erzeugungspotenzialen**, sowie von Optionen der regionalen Verteilung und Anbindungsmöglichkeiten an H₂-Märkte (z. B. über Anbindungen an Pipelinenetze). Zur Einordnung regionaler Erzeugungs- und Versorgungspotenziale ist es wichtig, relevante Stakeholder und Akteure im Bereich EE, H₂-Erzeugung, H₂-Infrastrukturbetreiber, sowie H₂-Nutzung in der Mobilität und in der Industrie zu konsultieren.

Treiber, Ziele und Parameter

Der Ausbau von EE-Erzeugungspotenzialen in Deutschland wird über verschiedene regulatorische Maßnahmen gefördert und gesteuert. Neben den Vorgaben auf EU-Ebene werden über das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) in Deutschland Rahmen und Ziele gesetzt.

Die Identifizierung und Ausweisung der Flächen für Windenergie erfolgt durch die Bundesländer, entweder auf regionaler Planungsebene oder durch die Kommunen, wodurch den Ländern eine entscheidende Verantwortung zukommt. Zudem hat die Bundesregierung mit dem Windenergieflächenbedarfsgesetz (WindBG) verbindliche Vorgaben für die Flächenbereitstellung gemacht. So sollen bis 2027 1,4% und bis 2032 2% der Bundesfläche für den Windenergieausbau reserviert werden. Zur Erreichung der Flächenziele werden Bundesländer ermutigt, die Flächenausweisungen zu erhöhen und Genehmigungsverfahren zu verkürzen. Neben der Erfassung von EE-Bestandsanlagen, ergibt sich die Möglichkeit, Potenziale für die H₂-Erzeugung- und Verfügbarkeit anhand der Ausbauziele abzuleiten.

Die Ermittlung von Erzeugungs- und Versorgungspotenzialen wird unterteilt in die Bereiche EE-Potenziale zur Erzeugung von grünem Wasserstoff, H₂-Erzeugungspotenziale und H₂-Versorgungspotenziale (z. B. Anbindungen an Transportnetze, Verteilungsmöglichkeiten in der Fläche).

Zielsetzung der Analyse der EE- und H₂-Erzeugungspotenziale ist, eine grundsätzliche Einschätzung der eigenen H₂-Erzeugungspotenziale und des möglichen Bedarfs für den H₂-Import treffen zu können. Es wird empfohlen, dass die erhobenen Parameter Prognosen für räumliche und zeitliche Strukturen der Angebote von Wasserstoff oder verfügbarer EE-Mengen umfassen, um den Hochlauf in der Region modellieren zu können.

Im Folgenden werden von den HyExpert-Regionen verwendete Methoden zur Identifizierung von Potenzialen bei der EE-Erzeugung sowie der H₂-Erzeugung und Versorgung vorgestellt.

Input-Parameter

- EE-Erzeugungskapazitäten [GWh/a]
- EE-Überschuss [GWh/a]
- Lokalisierung der EE-Kapazitäten



Vorgehen zur Ermittlung der Potenziale

Ermittlung von neuen EE-Erzeugungspotenzialen auf Basis der Flächenverfügbarkeit:

→ Identifikation von Potenzialflächen

- Separate Identifikation der Potenzialflächen nach Technologien (PV, Wind, etc.) im Untersuchungsgebiet
- Auswertung von Datenbanken in Form von Geo-Informationssystemen (GIS); ein beispielhaftes Vorgehen zur Identifikation von Ausbauflächen für Wind, PV und Wasserkraft wurde in der Region Chemnitz erarbeitet [HyExperts II – Chemnitz, S. 52](#)
- Konsultierung möglicher Projektierer bzw. Inhaber oder Anlagenbetreiber für genauere Abschätzungen bezüglich der Dimensionierung und Anschlussmöglichkeiten, Zeitpläne und Vermarktungsoptionen

→ Bewertung der identifizierten Flächen

- Definition von »Raumwiderständen« und Kriterien zur Eignung von Bebauung durch EE-Anlagen. Eine solche Liste wurde im Zuge der [HyExperts II – Landkreis Wartburgkreis, S. 24](#) erstellt
- Bewertung der identifizierten Flächen anhand der zuvor definierten Kriterien

→ Datenaufbereitung

- Auswertung der erhobenen Daten und Aufbereitung in Form von Datenbasen und Karten zur Lokalisierung von Clustern für mögliche Netzanschlüsse. Hierzu können Akteure angehalten werden, Flächen und Projekte frühzeitig auf interaktive Karten, wie sie beispielsweise die Firma Localiser mit dem [Wasserstoff-Markplatz](#) erstellt hat, einzutragen. Das dient der Sichtbarkeit, vermeidet den Aufwand, Karten und Übersichten aktuell zu halten und fördert die Vernetzung unter den Akteuren
- Visualisierung des Hochlaufs über eine Zeitachse oder »Meilensteinjahre« (siehe auch [Best Practice Abbildung 4](#))



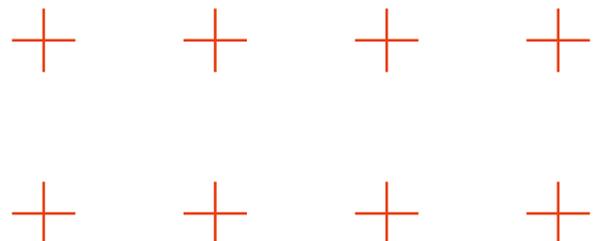
Herausforderung Nr. 1: Identifikation & Beschaffung geeigneter Standorte & Flächen

- z. B. für Elektrolyse, Speicherung, Logistik, Tankstellen sowie Zugang zu Freiflächen für PV und Windanlagen.
- Flächenverfügbarkeit im urbanen Raum
- Technische und betriebliche Anforderungen aus Systemauslegungen
- Rechtliche Anforderungen, z. B. Mindestabstände, Gebotszonen, Flächennutzungspläne



Lösungsansatz: Frühzeitige Einbindung von Behörden

- z. B. Stadtverwaltung, Baubehörden und Kreis- bzw. Landesbehörden
- Definition möglicher Standorte und Synchronisierung mit rechtlichen Rahmenbedingungen und lokalen Gegebenheiten
- Vertragliche Absicherung der Flächen



Die Verortung von Potenzialflächen und Projekten trägt zu der Sichtbarkeit und zur Vernetzung von Akteuren und Aktivitäten bei, dies führt zu Synergien und Folgeprojekten. Der [Wasserstoff-Marktplatz](#) wurde im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Energie des Landes Brandenburg und des Senats für Wirtschaft, Energie und Betriebe des Landes Berlin entwickelt. Die Firma Localiser RLI GmbH hat damit im Jahr 2022 den ersten digitalen Wasserstoff-Marktplatz veröffentlicht. Nach der Einweihung haben sich in kurzer Zeit viele Unternehmen und Organisationen im gesamten Bundesgebiet sowie im Ausland registriert.



Der [Wasserstoff-Marktplatz](#) ermöglicht die datengestützte, georeferenzierte Darstellung von Wasserstoff-Standorten und macht auf diese Weise Wasserstoffbedarfe und Wasserstofferzeugung sichtbar. Unternehmen, Behörden, Forschung und Politik vernetzen sich entlang der gesamten Wertschöpfungskette für Wasserstoff. Das HyExpert Projekt der Region Chemnitz bereite, gemeinsam mit Localiser RLI GmbH, die vollständige Integration aller Funktionalitäten des Marktplatzes vor, eine detaillierte Beschreibung der Aktivitäten befindet sich hier [HyExpert II – Chemnitz, S. 100 ff.](#)

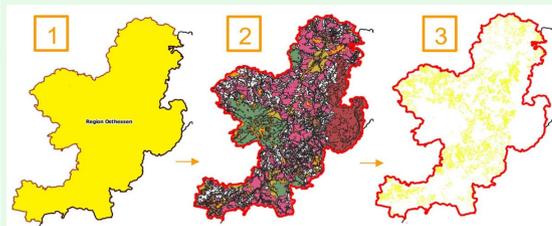


Abbildung 4: Best Practice: PV-Erzeugungskapazitäten

Best Practice: Potenzialanalyse PV-Erzeugungskapazitäten

GIS-Analyse mit Hilfe von Ausschlusskriterien für PV-Freiflächenanlagen

 Methode	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Bestimmung des Untersuchungsgebiets <input type="checkbox"/> Analyse der Raumwiderstände und Ermittlung der Ausschlussflächen <input type="checkbox"/> Berechnung des theoretischen PV-Potenzials aus Differenzflächen
 Ergebnis	<ul style="list-style-type: none"> • Übersichtskarte der potenziellen PV-Flächen • Theoretisches PV-Potenzial [MW] • PV-Erzeugungspotenzial [GWh/a]
 Tool	<ul style="list-style-type: none"> • Geo-Informationen-Systeme (GIS)



Ermittlung von EE-Erzeugungspotenzialen auf Basis des Anlagenbestandes:

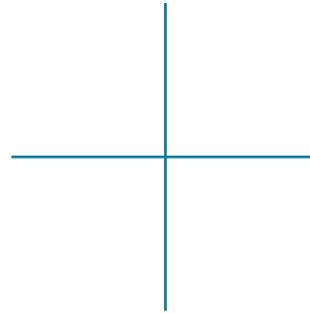
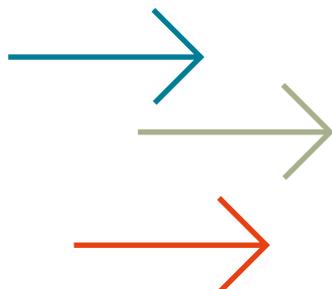
→ Übersicht bestehender EE-Erzeugungskapazitäten

- Auswertung von Datenbanken, wie dem Marktstammdatenregister ([MaStR](#)) zu bestehenden Kapazitäten aus PV, Wind, Wasserkraft, Biomasse und Geothermie, siehe dazu [HyExperts I – H₂-Lastverkehr Nordost-Niedersachsen, S. 74](#)
- Erstellung einer Übersicht der lokalen EE-Anlagen, inklusive Dimensionierungen

→ Analyse der aktuellen Anforderungen an die Erzeugung von Wasserstoff gemäß RED II und EEG-Förderungszeiträume

- Prüfung der Anforderungen an die Erzeugung gemäß RED II (insbesondere falls der Ort der H₂-Erzeugung bekannt ist), siehe dazu [HyExperts II – Landkreis Reutlingen, S. 29 ff.](#), [HyExperts II – Stadt Hagen, S. 63](#) sowie das Factsheet der NOW auf der nächsten Seite
- Prüfung der Möglichkeiten der H₂-Erzeugung auf Basis von Ü20 Post-EEG Anlagen [HyExperts II – Landkreis Neustadt an der Waldnaab, S. 26 ff.](#)
- **Wichtig:** Bei der Prüfung der Verwendung von Post-EEG Anlagen sind Effizienzverluste und mögliche verringerte Volllaststunden zu berücksichtigen
- Konsultierung der Anlagenbetreiber für genauere Abschätzungen bezüglich technischer Zustände, geplanten Umbauten und Wartungsbedarfen

Factsheet zu diesem Thema siehe nächste Seite.



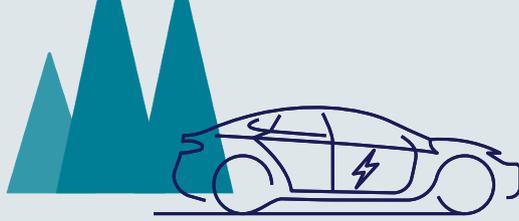
Herausforderung Nr. 2: Bestandsaufnahme (Angebot/ Nachfrage)

- Umfassende Übersicht und Verständnis über potenzielle H₂-Nachfrage inkl. Abnahmeorte, -zeiten & -mengen
- Bestehendes und zukünftiges H₂-Angebot, Infrastruktur, Logistik
- Frühe Definition verbindlicher Angebots- & Nachfrageparameter sowie Ausbaupläne



Lösungsansatz: Frühzeitige Einbindung von Akteuren, insb. auf Nachfrageseite & Schaffung von Verbindlichkeiten

- z. B. Interessensbekundungen, Vorverträge
- Fragebögen, Einzelabfragen und durchschnittliche Kennzahlen zur initialen Schätzung
- Erstellung verschiedener Nachfrage- bzw. Entwicklungsszenarien (gering, mittel, hoch)



Erneuerbare-Energien-Richtlinie III (RED III)



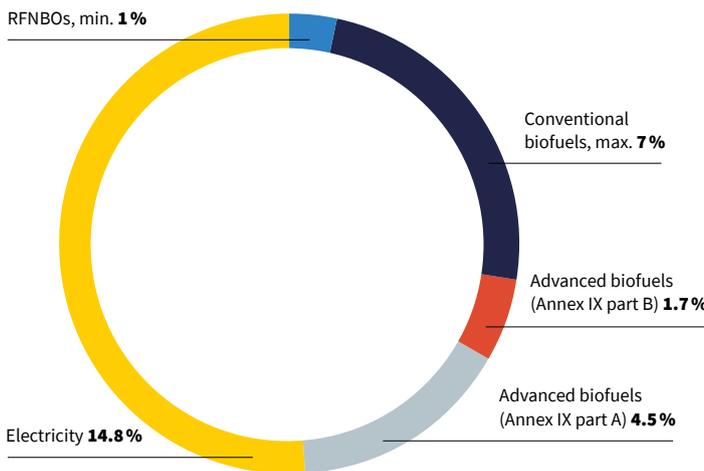
Ziele für erneuerbare Kraftstoffe im Verkehr

Die Europäische Union (EU) hat 2023 die als »RED III« (Renewable Energy Directive III) bezeichnete Revision der Erneuerbare-Energien-Richtlinie verabschiedet. Das sektorenübergreifende Ziel für die Nutzung erneuerbarer Energien in der EU bis 2030 wurde dabei erheblich angehoben: auf 42,5 Prozent.

Das Ziel für den Verkehrssektor wurde in der RED III ebenfalls deutlich verschärft. Sie gibt einen Mindestanteil von 29% erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch im Verkehrssektor vor oder eine Reduzierung

der Treibhausgase (THG) um mindestens 14,5% im Vergleich zu den Emissionen, die durch den Einsatz fossiler Kraftstoffe entstanden wären. Die Richtlinie verpflichtet **Unternehmen, die Kraftstoff in Verkehr bringen**, die beim Verbrennen dieser Kraftstoffe entstehenden Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Dafür stehen ihnen mehrere Kraftstoffoptionen zur Verfügung. Auch in der RED III sind Multiplikatoren für bestimmte Kraftstoffe und Anwendungen zulässig (siehe Aufzählung unten), wenn diese auf die Energieziele angerechnet werden.

Beispielszenario: Wie lässt sich das RED III-Ziel von 29% für den Verkehrssektor in 2030 erreichen?



RFNBOs, Erneuerbarer Kraftstoffe nicht-biogenen Ursprungs (Renewable Fuels of Non-Biological Origin, RFNBOs) werden als flüssige und gasförmige Kraftstoffe auf Basis erneuerbarer Energiequellen (ausgenommen Biomasse) definiert. Sie müssen eine minimale THG-Reduktion von 70 Prozent im Vergleich zu einem fossilen Komparator von 94 gCO₂-Äq./MJ erreichen.

Fortschrittliche Biokraftstoffe beschreiben flüssige und gasförmige Kraftstoffe auf Basis der im [Anhang IX Teil A](#) gelisteten biogenen Rest- und Abfallstoffe.

Ziele und Multiplikatoren im Einzelnen

- Kein Mindestanteil für erneuerbaren Strom im Verkehr.
 - Ein Multiplikator von x4 für erneuerbaren Strom, der in Straßenfahrzeugen verwendet wird
- Für Fortschrittliche Biokraftstoffe und RFNBO gilt ein Mindestanteil von 5,5% am Endenergieverbrauch im Verkehr, mit einer RFNBO-Unterquote von mindestens 1%
 - Multiplikator von x2 für fortschrittliche Biokraftstoffe und RFNBOs die in Straßenfahrzeugen verwendet werden
- Der Einsatz von Biokraftstoffen und Biogas aus UCO und tierischen Fetten ist begrenzt auf 1,7% der im Verkehrssektor insgesamt verbrauchten Energie
 - Multiplikator von x2 im Straßenverkehr
- Anteil konventioneller Biokraftstoffe, die 2020 im Verkehrssektor in den Mitgliedstaaten verbraucht wurden + 1%, jedoch höchstens 7%

THG-Berechnungsmethode

(Delegierter Rechtsakt zu Strombezugskriterien gemäß Artikel 27 RED II)

- Die Berechnungsmethode für RFNBOs bestimmt den THG-Fußabdruck über den gesamten Lebenszyklus
- Strom aus vollständig erneuerbaren Quellen wird mit 0 gCO₂-Äq./MJ einberechnet
- Für Netzstrom wird die Treibhausgasintensität der Gebotszone verwendet
- Erlaubte Kohlenstoffquellen für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe:
 - CO₂-Abscheidung aus der Luft (Direct Air Capture, DAC)
 - Biogenes CO₂
 - Industrielle Punktquelle (bis 2041)
- Bestimmungen hinsichtlich der gemeinsamen Verarbeitung mit fossilen oder biogenen Kraftstoffen (co-processing)



Zum Herunterladen des Factsheets in voller Länge bitte den QR-Code scannen.

Was gilt als vollständig erneuerbarer Strom?



→ Analyse des regionalen EE-Überschussstroms und der Abregelung von EE-Anlagen

- Alternativ kann eine Analyse des regionalen Überschussstroms erfolgen. Ein beispielhaftes Vorgehen ist im [HyExperts II – Chemnitz, S. 73](#) dargestellt

→ Bewertung der H₂-Erzeugung

- Berechnung potenzieller H₂-Produktionskapazitäten verbleibender Kapazitäten bestehender Anlagen nach Ende der EEG-Förderung (Ü20-Anlagen) bzw. RED II Anforderungen

→ Validierung und Anpassungen der Prognosen

- Validierung der Berechnungen nach Abgleich der Daten mit dem Feedback der Betreiber zu möglichen Anlagenmodernisierungen
- Anpassung der Prognosen

Vorgehen zur Ermittlung von H₂-Erzeugungspotenzialen

→ Technologieübersicht H₂-Erzeugung

- Grundlegende Sichtung von Technologien zur H₂-Erzeugung (Elektrolyseverfahren, thermische Konversionsprozesse, bio-chemische Verfahren)
- Bewertung der Technologie anhand technologischer Reife, Effizienz und Kosten, siehe dazu [HyExperts II – Region Nordhessen, S. 180 ff.](#) sowie [Kapitel 5.8](#)

→ Qualitative Erfassung von H₂-Erzeugungspotenzialen

- Definition von Kriterien hinsichtlich verfügbarer Infrastruktur- und Rahmenbedingungen
- Bewertung & Priorisierung geeigneter Technologien unter Einbezug der Wirtschaftlichkeit
- Beispiel für einen Bewertungs- und Priorisierungsansatz: [HyExpert I – Nordost-Niedersachsen, S. 23 ff.](#)

→ Erfassung quantitativer H₂-Erzeugungspotenziale

- Analyse der bestehenden EE-Stromerzeugung, des Hochlaufs und des EE-Stromüberschusses, siehe dazu vorherige Abschnitte zur EE-Erzeugung
- Kalkulation von möglichen regionalen H₂-Erzeugungsmengen, siehe dazu [HyExperts II – Landeshauptstadt Mainz, S. 36 ff.](#)



Herausforderung Nr. 3: Unterschiedliche technologische Reifegrade der Wertschöpfungsstufen

- z. B. Elektrolyse, Speicherung, Transport, Tankstelle, Mobilitätsanwendung
- unterschiedliche Lieferzeiten in Umsetzungsplanung



Lösungsansatz: Marktstudie und Austausch mit Lieferanten

- insb. zur zeitnahen Verfügbarkeit, Service- und Garantieleistung, Entwicklungsstände, benötigte Komponenten
- Schnittstellen und Abhängigkeiten entlang der Wertschöpfungskette simulieren und entsprechend in Umsetzungs- und Finanzplanung beachten

Abbildung 5: Best Practice: Ermittlung von regionalem EE-Überschussstrom

Best Practice: Ermittlung von regionalem EE-Überschussstrom

Vergleich prognostizierter Jahreslastgänge und regionalen EE-Kapazitäten

Methode

☐ Berechnung auf Basis öffentlicher Daten unter Verwendung aktueller und prognostizierte EE-Erzeugungsprofilen und Jahreslastgängen für das Stromverteilnetz

Ergebnis

- Jährliche regionale Überschussenergie auf Stundenbasis
- Jährlich erreichbare Volllaststunden für Elektrolyse

Tool

- Marktstammdatenregister
- Netzentwicklungsplan (NEP)

```

graph TD
    1[1 Bundesweite Jahres-Strombedarfs-prognose] --> 3[3 Prognostizierter Jahreslastgang für das Stromverteilnetz]
    2[2 Jahreslastgang für das Stromverteilnetz] --> 3
    4[4 Prognostizierter Ausbau der flukt. EE in der Projektregion (Wind und PV)] --> 6[6 Prognostiziertes regionales EE-Erzeugungsprofil]
    5[5 Leistungsnormierte Profile der Wind- und PV-Einspeisung] --> 6
    3 --- 6
    6 --- 7[7 Abschätzung der überschüssigen Leistungen aus EE (stündliches Profil)]
    
```

HYEXPERTS *Region Chemnitz, S.73 ff.*

Vorgehen zur Ermittlung von H₂-Versorgungspotenzialen

➔ Analyse von H₂-Versorgungspotenzialen

- Screening von Unternehmen, welche heute schon Wasserstoff per Trailer liefern. Auch wenn die Kosten pro kg hoch sind und regional variieren können, sind mittelfristig Kostendegressionen zu erwarten. Die Preise solcher Lieferanten sollten im Auge behalten werden und können als Richtwert zur Bewertung von Rahmenbedingungen herangezogen werden.
- Screening von Kapazitäten aus H₂-Transportpipelines (H₂-Kernnetz) und anderen möglichen Anbindungen an Bezugsquellen, siehe hierzu regelmäßige Veröffentlichungen des [FNB-Gas](#)
- Konsultierung mit nahegelegenen Kommunen und Regionen zur Erfassung von geplanten H₂-Projekten



Herausforderung Nr. 4: Netzanbindung

- Es kann vorkommen, dass in frühen Planungsphasen bestehende Kapazitäten und Anschlüsse nicht verifiziert werden (z. B. von Verteilnetzen, Strom, Wasser)



Lösungsansatz: Frühzeitige Klärung vorhandener Anschlusskapazitäten und Parameter

- z. B. Leistungsparameter, mögliche Ausbaupläne mit Netzbetreibern und Anbietern klären und geplante Anforderungen mitteilen, um ggf. Anpassungen (z. B. Ausbau, Erweiterung, Umleitung) ergreifen zu können

+4.2

H₂-Bedarfe

Die Identifizierung und Regionalisierung von H₂-Bedarfen ist ein elementarer Bestandteil der Analyse der regionalen Transformationspfade, insbesondere in den Sektoren Mobilität und Industrie. Für den Aufbau von H₂-Regionen müssen regionale Erzeugung und Abnahme zeitlich, geografisch, technologisch und wirtschaftlich in Einklang gebracht werden. Die Aufschlüsselung der H₂-Bedarfe in ausreichendem Detailgrad ist für den Hochlauf regionaler Wertschöpfungsketten essenziell.

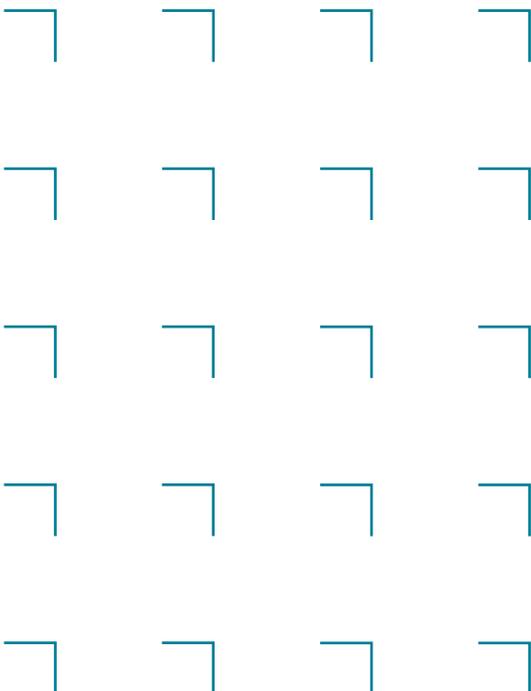
Unternehmen unterliegen Transformationszwängen. Durch die Abfrage von Bedarfen nach klimafreundlichen Alternativen zur Energieversorgung einzelner Anlagen oder Anwendungen bereiten sich Unternehmen aktiv auf die Transformation vor und mindern dadurch ihr eigenes Risiko.

Treiber, Ziele und Parameter

Für das Erreichen von Klimaneutralität in Industrie und Verkehr wird der Einsatz von Wasserstoff ein wesentlicher Bestandteil sein. Dennoch ist zu beobachten, dass die Nachfrage bisher nicht realisiert werden konnte und so der marktwirtschaftliche Treiber auf Nachfrageseite bislang nicht vollständig ausgeprägt ist. Das Kapitel zielt auf die Quantifizierung von H₂-Bedarfen ab, der Fokus liegt dabei auf dem Mobilitätssektor. Zusätzlich ist im Anhang des Leitfadens ein Vorgehen zur Identifikation von H₂-Bedarfen typischer regionaler Industrien zu finden.

Inputparameter Verkehr:

- Regionales Fahrzeugaufkommen [-]
- Mittlere Tagesfahrweite [km/d]
- Täglicher H₂-Bedarf [kg/d]
- Liste der relevanten Stakeholder wie etwa Flottenbetreiber und Industriebetriebe



+4.3

Bedarfe regionaler Mobilitätskonzepte

Vorgehen bei der Planung und Auslegung

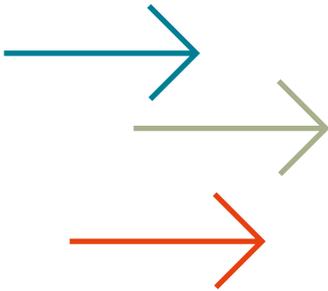
Die Analyse künftiger H₂-Bedarfe in der Mobilität erfolgt in der Regel über zwei getrennte Ansätze, die jedoch auch kombiniert werden können. **Ein vielverwendeter quantitativer Ansatz ist die Hochrechnung von H₂-Bedarfen** für Pkw, LNF, mittelschwere, schwere und kommunale NFZ auf Basis von aktuell gemeldeten Fahrzeugbeständen auf Stadt-, Kreis- bzw. Regionalebene und H₂-Technologiediffusionskurven (Top-down Ansatz). Der qualitative Bottom-up Ansatz ermittelt den H₂-Bedarf über Befragung relevanter Stakeholder via Interview oder Onlineumfrage.

→ Top-down: Ermittlung von H₂-Nutzungspotenzialen in der Mobilität

- Ermittlung des regionalen Fahrzeugaufkommens
- Berechnung der mittleren Tagesfahrweite der Fahrzeuge
- Datenbasis: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), die jährlich Daten von deutschlandweiten Zählstellen bereitstellt, siehe dazu [[Fraunhofer 2021, S. 16](#)]. Eine ähnliche Herangehensweise wird im [HyExperts I – HYW-HEELS Fulda, S. 28 ff.](#) gewählt. Über die Daten des BASt wird das stündliche Lkw aufkommen analysiert, um H₂-Bedarf und Stoßzeiten für die H₂-Tankstelle zu ermitteln. Siehe auch [HyExperts II – Nordhessen, S. 47](#)
- Optionale Nutzung von Verkehrsmodellen PTV Validate (kostenpflichtig), um die mittlere Tagesfahrweite zu ermitteln [[Ifeu 2022, S. 22](#)]
- Anhand der Fahrzeugkilometer pro Tag erfolgt die Berechnung des H₂-Bedarfs. Mit Hilfe der gleichen Daten kann der Ladebedarf für batterieelektrische Flotten berechnet werden. Faktoren zur Abwägung zwischen emissionsfreien Antriebstechnologien für Flotten finden Sie auch [HyExpert II – Hagen, S. 12-16](#). In [Abbildung 7](#) sind beispielhafte Verbräuche einzelner Fahrzeugklassen dargestellt.

Abbildung 6: Icons mit H₂-Mobilitätsanwendungen





→ **Bottom-up: Bestimmung von H₂-Bedarfen über die Befragung regionaler Stakeholder**

Eingrenzung der zu berücksichtigenden Fahrzeugtypen und Standorte

- Befragung der regionalen Stakeholder (Flottenbetreiber) zur Bestimmung der Annahmen für die Modellierung des Hochlaufs [HyExpert I HyDrive OWL Ostwestfalen Lippe, S. 65 ff.](#)
- Definition von Hochlaufszszenarien und Auswahl von sogenannten Stützjahren, also einzelne Jahre im Verlauf des Hochlaufs, die als Meilenstein herangezogen werden
- Analyse spezifischer Fahrzeugklassen hinsichtlich
 - Kraftstoffverbrauch
 - Laufleistung und Strecken, siehe z. B. [HyExpert I – HYWHEELS Fulda, S. 70 ff.](#)
 - Betankungsverhalten [HyExpert I – MH₂Regio Frankfurt am Main, S. 135 ff.](#)
- Berechnung der Entwicklung der Flottenanteile von Brennstoffzellenfahrzeugen unter Berücksichtigung der jährlichen Anschaffungsquote und Altersstruktur des Flottenmixes
- Berechnung des standortgenauen H₂-Bedarfs



Herausforderung Nr. 5: Identifikation & Einbindung regionaler Akteure

- Fehlende Übersicht an Unternehmen oder Institutionen, die bereits Berührungspunkte mit Wasserstoff hatten oder entsprechendes eigenständig planen



Lösungsansatz: Register aufsetzen

- z. B. über den H₂-Marktplatz von [Localiser](#)
- kommunale Flotten, Speditionen, Industrien mit Werksverkehr, Metallverarbeitung, Chemieindustrie, Universitäten, ...
- Akteure proaktiv ansprechen und überzeugen

- Optional: Hochrechnung des H₂-Bedarfs für weitere Standorte bzw. Flottenbetreiber in der Region inkl. Auswertung der Hochlaufkurven und Visualisierung, beispielsweise in Heat Maps, also einer kartographischen Darstellung von H₂-Bedarfen
- Im Zuge des [HyExperts I – MH₂Regio Frankfurt am Main, S. 30 ff.](#) wurde eine detaillierte Bedarfsanalyse inkl. Hochlauf für verschiedene Flotten, wie etwa Busdepots, Logistikunternehmen oder Binnenhäfen durchgeführt.



Abbildung 7: Best Practice: Berechnung H₂-Bedarfe in der Mobilität

Best Practice: Berechnung H₂-Bedarfe Mobilität

Fahrzeugspezifische und standortgenaue H₂-Hochlaufanalyse von BZ-Fahrzeugen

Methode

- Stakeholderbefragung zur Erschließung der Datenbasis
- Berechnung fahrzeugspezifischer Bedarfe und Auslastungen
- Analyse der Entwicklung der Flottenanteile
- Szenariobasierte Hochlaufanalyse

Ergebnis

- Fahrzeugspezifische H₂-Bedarfshochlaufkurven
- Heatmap der standortgenauen Bedarfe

Abbildung 9: Flottenanteile konservatives Szenario

Abbildung 8: Flottenanteile optimistisches Szenario

Optimistisches Szenario

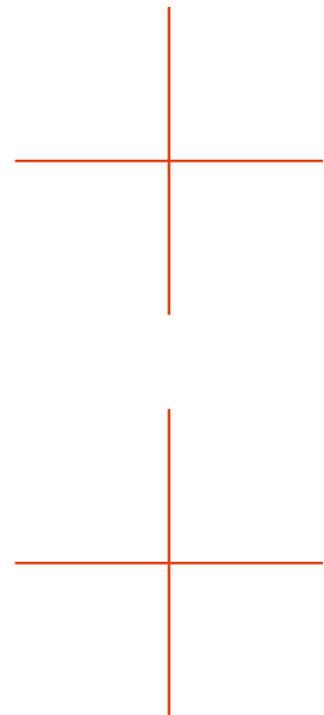
2025 2030 2035 2040

MH2Regio Frankfurt am Main, S.32 ff.

➔ **Exkurs: Ermittlung von H₂-Nutzungspotenzialen für maritime Mobilitätsanwendungen**

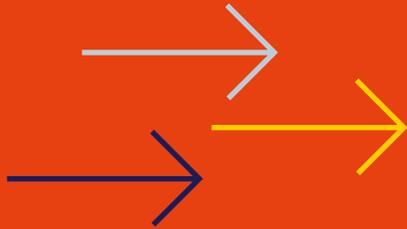
In der Studie [LBST 2023] wird sowohl der Top-Down, als auch der Bottom-Up Ansatz zur Ermittlung des H₂-Bedarfs gewählt.

- **Top Down:** Zusammenfassung der durchschnittlichen Kraftstoffverbräuche und Leistungsdaten der Haupt-systeme von verschiedenen Schiffstypen
- Analyse der zukünftigen Nutzung von Wasserstoff in Konkurrenz mit anderen Kraftstoffen (z. B. Ammoniak und Methanol)
- Über die Fahrzeuganzahl Ermittlung des H₂-Bedarfs
- **Bottom-Up:** die Stakeholder der Hafenwirtschaft der deutschen Seehäfen werden nach sektorenübergreifenden H₂-Bedarfen in einem Interview befragt
- Weitere Infos über Wasserstoff im maritimen Mobilitäts-sektor finden sich im [HyExpert I – H₂Brake CO₂Brake, S. 87 ff.](#), welcher sich speziell mit dem maritimen Anwendungsfall von Brennstoffzellen-Anwendungen in der Hafenwirtschaft auseinandersetzt.



+⁵

Konzeptentwicklung für H₂-Projekte



+5.1

Erzeugungskonzepte

Das Kapitel zeigt die methodische Vorgehensweise für die Entwicklung von H₂-Projekten entlang der Wertschöpfungskette mit Fokus auf den Bereich Mobilität. Das Ziel der Konzeptentwicklung ist es, die techno-ökonomische Machbarkeit nachzuweisen, Investitionsentscheidungen vorzubereiten und die Grundlage für einen Förderantrag zu schaffen.

Treiber, Ziele und Parameter

Der Aufbau von H₂-Erzeugungskapazitäten wird derzeit zu einem wesentlichen Teil durch regulatorische Treiber und Zielsetzungen fokussiert. So tragen übergeordnete Strategien wie die Nationale Wasserstoffstrategie, das zuletzt vorgestellte Wasserstoffbeschleunigungsgesetz oder der THG-Quotenhandel oder spezifische Förderprogramme zum Ausbau bei. Weiterhin ist zu beobachten, dass auch marktwirtschaftliche Treiber den Ausbau lokaler Elektrolysekapazitäten fördern können, wie die Stabilität von Energiepreisen- und Systemen, Versorgungssicherheit oder Resilienz gegenüber Energiekrisen. Den größten Treiber für den Hochlauf stellt allerdings eine stabile Nachfrage zu wettbewerbsfähigen Preisen dar.

Die Entwicklung von H₂-Erzeugungskonzepten ist zumeist ein elementarer Bestandteil für den Aufbau regionaler Wertschöpfungsketten. Im Rahmen einer fundierten techno-

ökonomischen Konzeptionierung wird geprüft, ob Wasserstoff zu wettbewerbsfähigen Konditionen unter Berücksichtigung der technischen und regulatorischen Rahmenbedingungen erzeugt und abgenommen werden kann. Daneben ist darüber hinaus ein passendes Betreiber- und Skalierungskonzept zu entwickeln, welches sich trägt und sich gegebenenfalls für eine Projektförderung qualifiziert.

Ziel des Kapitels ist eine Handreichung bei der Entwicklung von H₂-Erzeugungskonzepten unter Berücksichtigung der unten beschriebenen Projektinputparameter. Das in neun Schritten zusammengefasste Vorgehen umfasst eine Beschreibung der Grobkonzeptionierung von H₂-Erzeugungsprojekten. Wichtig: Es handelt sich bei den folgenden Beschreibungen ausschließlich um H₂-Erzeugungskonzepte mit Elektrolyse. Eine Übersicht weiterer Erzeugungsverfahren (z. B. Wasserstoff aus Biomasse) und deren Potenziale und Anwendungsfälle sind unter anderem in [HyExperts II – Landkreis Havelland Studie, S. 19 ff.](#) beschrieben.



Technologie Deep-Dive: H₂-Erzeugung

Basiswissen H₂-Erzeugung:

Technologieübersicht existierender Elektrolysetechnologien zur Herstellung von grünem Wasserstoff [HyExperts II – Landkreis Helmstedt, S. 52 ff.](#):

Tabelle 1: Vergleich der verfügbaren Elektrolysetechnologien nach aktuellem Stand der Technik

Parameter		Stand der Technik (2020)			
		AEL	PEM	SOEC	AEM
Elek. Wirkungsgrad	[% _{LHV}]	66,7	65,4	83,3	60,6
Stromverbrauch (bei Nominalkapazität)	kWh/kg _{H₂}	50	51	40	55
CAPEX	[€/kW _{el}]	600	900	2.100	1.000
O & M	[€/(kg/d)/a]	50	41	410	34
Anfahrtszeit (heiß)		60 Sec	2 Sec	600 Sec	30 Sec
Anfahrtszeit (kalt)		60 Min	30 Sec	12 h	30 Min
Stack-Degradation	[%/1000h]	0,12	0,19	1,9	> 1,0
Verbrauch krit. Rohmaterialien	g/kW	0,6	2,5	–	1,7

AEL = Alkalische Elektrolyse
SOEC = Hochtemperaturelektrolyse

PEM = Protonenaustauschmembran Elektrolyse
AEM = Anionenaustauschmembran Elektrolyse

Ein umfangreiches Basiswissen, inklusive Elektrolyse- sowie Biomasseverfahren, ist im Abschlussbericht von [HyExperts II – Region Nordhessen, S. 180 ff.](#) in Form von Steckbriefen dargestellt.

Inputparameter:

- Regionaler Strombezug in stündlicher Auflösung [GWh/a]
- Grünstrombezugsoptionen am Markt/PPAs [GWh/a]
- Bestehende H₂-Verteilmöglichkeiten via Leitung oder Trailer inkl. Kostenabschätzung
- H₂-Bedarfspotenziale Mobilität [t/a]
- H₂-Bedarfspotenziale Industrie [t/a]
- Technische Technologieparameter, wie etwa Investitionskosten
- Erlösrechnung (prognostizierte Verkaufserlöse)
- Qualitative Standortkriterien

Vorgehen bei der Planung und Auslegung

→ Definition des Projektstandortes

Im Zuge der Potenzialanalyse werden häufig mehrere Standorte identifiziert, weshalb es gilt, diese in einem ersten Schritt zu priorisieren und auszuwählen. Standortfaktoren und Bewertungsschema für die Standortauswahl sind zu finden in [HyExperts II – Stadt Hagen, S. 72 ff.](#):

- Flächenverfügbarkeit: Daumenregel bis 10 MW Elektrolyseleistung gilt: (400 m²/MW_e) [HyExperts II – Stadt Hagen, S. 73](#)
- Wasserverfügbarkeit: Faustregel Wasserbedarf: Pro 1 kg H₂ erfordern ca. 9-10 Liter entmineralisiertes Wasser oder ca. 12-22 Liter Trinkwasser [HyExperts II – Stadt Hagen, S. 73](#)
- Initiale Genehmigungsvoraussetzungen für Elektrolyseanlagen: siehe [Kapitel 6.1](#)
- Potenzial zum Anschluss der Elektrolyse an einen Mittelspannungsanschluss
- Potenzial zur H₂-Einspeisung in ein potenzielles H₂-Pipelinennetz: Nähe zu potenziellen oder in Planung befindlichen H₂-Pipelines, siehe auch [Kapitel 5.3](#)
- Potenzial zur H₂-Abgabe an Trailer (Straßenanbindung): Prüfung der unmittelbaren Nähe zu Straßeninfrastruktur und Rangierfläche am Standort, siehe auch [Kapitel 5.4](#)

→ Technologieauswahl

- Ausführliche Beschreibung verschiedener **Erzeugungstechnologien**: [HyExperts II – Region Nordhessen, S. 180 ff.](#) oder im [HyExperts I – HyExpEL Emscher Lippe, S. 65 ff.](#)
- Ein umfassender Technologievergleich, inklusive **Bewertung der Eignung**, findet sich im [HyExperts I – H₂-Lastverkehr Nordost-Niedersachsen, S. 15 ff.](#) Eine vergleichende Analyse von Elektrolyse- und Erzeugungstechnologien von Wasserstoff auf Basis von **Biomasse** sind im [HyExperts II – Landkreis Neustadt an der Waldnaab, S. 68 ff.](#) zu finden



siehe:

Herausforderung Nr. 1 (S. 9):

Identifikation & Beschaffung geeigneter Standorte & Flächen



Herausforderung Nr. 4 (S. 13):

Netzanbindung



siehe:

Herausforderung Nr. 3 (S. 12):

Unterschiedliche technologische Reifegrade der Wertschöpfungsstufen



→ Abnahmepotenziale

Die Identifikation von projektspezifischen Abnahmepotenzialen erfolgt analog zu den in [Kapitel 4.2](#) beschriebenen Methoden zur Bedarfsermittlung, Bottom-up und Top-down, oder über Tools, wie beispielsweise dem H₂-Marktplatz der Firma localiser (www.localiser.de).

→ Aggregation und Bewertung der Strombezugsoptionen

Ausgehend von der Ermittlung der regionalen EE-Erzeugungskapazitäten (siehe [Kapitel 4.1](#)) ist frühzeitig ein erstes EE-Strombezugsmodell abzuleiten. [HyExperts II – Region Chemnitz, S. 133 ff.](#) stellt die **Strombezugsoptionen** Direktleitung, Stromliefervertrag (PPA) und marktgetriebener Strombezug samt Implikationen für die systemdienliche Fahrweise und Wirtschaftlichkeit vor. Eine vergleichende Analyse von drei verschiedenen **Strombezugsoptionen** ist auch im [HyExperts II – Landkreis Haveland, S. 40 ff.](#) zu finden.



siehe:

Herausforderung Nr. 1 (S. 9):

Identifikation & Beschaffung geeigneter Standorte & Flächen



siehe:

Herausforderung Nr. 4 (S. 13):

Netzanbindung

→ Technische Machbarkeit

Der Identifikation von Standorten und Strombezugsoptionen schließt sich in der Regel eine erste technische Machbarkeitsprüfung an. Diese beinhaltet eine erste Auslegung der Anlage sowie eine Analyse der technischen Voraussetzungen und Anbindungsmöglichkeiten für Strom, Wasser und beispielsweise eine Trailer-Abfüllanlage.



➔ **Betreibermodell**

Für die ökonomische Bewertung von Elektrolyseprojekten gilt es, das passende Betreibermodell zu finden und eine finanzielle Erstbegutachtung durchzuführen. Die Definition des passenden Betreibermodells ist dabei kontinuierlich über den gesamten Konzeptentwicklungsprozess zu berücksichtigen.

- Wesentlichen Einnahmequellen für Elektrolyseure: Wasserstoff, Abwärme, Sauerstoff, Anbieten von Regellast (Systemdienstleistung): [HyExperts II – Region Chemnitz, S. 136](#)
- Weiterführende Informationen zur Nutzung von **Abwärmepotenzialen**: [HyExperts II – KielRegion, S. 91 ff. und S. 110 ff.](#)
- Eine vergleichende ökonomische Betrachtung von **Vermarktungsoptionen** liefert eine Studie der Deutschen Energieagentur [[dena 2023](#)]
- Vergleich diverser techno-ökonomischer **Betreibermodelle** (Direktleitung, »PPA as produced«, marktpreisgetriebene Fahrweise): [HyExperts II – Landkreis Havelland, S. 40 ff.](#)

➔ **Wirtschaftlichkeit**

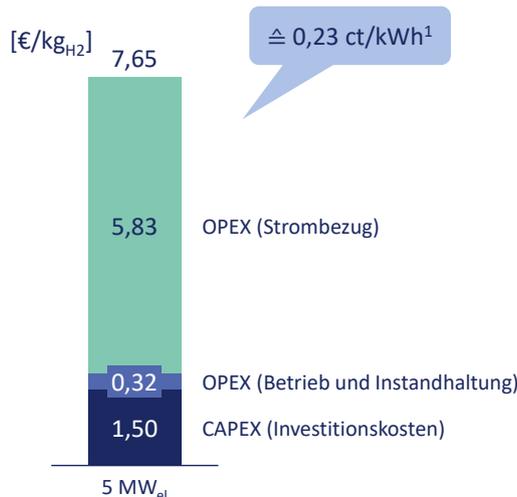
Kalkulation der H₂-Gestehungskosten (Levelized cost of hydrogen – LCOH)

- Beispielhafte Berechnung von **LCOH** in [Abbildung 8](#): Wesentliche Einflussfaktoren sind Strombezug sowie die Anzahl der Betriebsstunden (Volllaststunden [h/a])
- Umfängliche Analyse des Einflusses der Volllaststunden auf die LCOH sowie eine solide Datenbasis für die Kalkulation ist unter anderem im [HyExperts II – Region HyAllgäu*-Bodensee, S. 25 ff.](#), [HyExperts II – Landkreis Helmstedt, S. 56 ff.](#), [HyExperts II – KielRegion, S. 127 ff.](#) sowie in Kapitel 8 zu finden
- Eine **Gesamtwirtschaftlichkeitsrechnung** liefert unter anderem [HyExperts II – Region HyAllgäu*-Bodensee, S. 25 ff.](#) siehe auch Best Practice [Abbildung 9](#)



Es gibt zahlreiche Tools zur Berechnung von H₂-Gestehungskosten bzw. von Bereitstellungskosten. Eine Übersicht über verschiedene Tools und ihre jeweiligen Systemgrenzen befindet sich in [HyExperts II – Landkreis Wartburgkreis, S. 16 f.](#)

Abbildung 8: Beispielhafte H₂-Gestehungskosten in der Wasserelektrolyse (Quelle: HyExperts II – Hy-NATuRe Reutlingen, S. 60)



→ Anforderungen an die Genehmigung

- Kontinuierliche Prüfung der aktuellen Anforderungen an die Genehmigung
- Ausführlicher Genehmigungsleitfaden: [HyExperts II – Landkreis Havelland, S. 39 ff.](#)
- Übersicht der wesentlichen Genehmigungsrechtlichen Anforderungen (siehe [Kapitel Genehmigungen](#))

→ Lieferanten-Screening

- Screening der Lieferanten für Komponenten und Systeme (siehe [Kapitel 5.8](#))



Herausforderung Nr. 6: Unterschiedliche Behörden

- z. B. Bau, Umwelt, Verkehr, Stadtentwicklung, erstreckend bis zur Landkreis- oder Landesebene. Langwierige und komplexe Prozesse



Lösungsansatz: Behördenübergreifende Taskforces

- mit dem Ziel, genehmigungsrechtliche Prozesse unter Einbindung privatwirtschaftlicher Prozesse zu simulieren und bei behördlichen Entscheidungsträgern Konsens zu schaffen
- Verständnis schaffen, angepasste Prozesse



Herausforderung Nr. 7: Fehlende Erfahrung in den Behörden

- Lange Bearbeitungszeit und fehlendes Fachwissen bei behördlichen Entscheidungsträgern
- Übervorsicht bei Verantwortlichen
- Lange Bearbeitungszeiten



Lösungsansatz: Genehmigungsratgeber für Behörden

- Erstellung spezifischer Schulungs- und Arbeitsunterlagen, Fachtrainings für die Entscheidungsebenen
- Aufbau und Austausch von Wissen und Erfahrungen in dafür vorgesehenen Netzwerken



Herausforderung Nr. 8: Unterschiedliche regionale Vorgaben

- wenn ein regionales Vorhaben (z. B. EE-Stromerzeugung, Elektrolyseur & Tankstelle) in mehrere Zuständigkeitsbezirke fällt



Lösungsansatz: Regionenübergreifende Taskforce

- Gegenseitiges Verständnis schaffen
- Unterschiedliche Verordnungen und Regelungen systematisch aufnehmen und proaktiv Dialoge
- mit Behörden schaffen, um gemeinsame Lösungswege zu identifizieren

Abbildung 9: Best Practice: Wirtschaftlichkeit Elektrolyse

Best Practice: Initiale Wirtschaftlichkeitsrechnung Elektrolyse

Berechnung der Wirtschaftlichkeit auf Basis der wesentlichen Projektdaten

Methode

- Business Case Kalkulation auf Grundlage wesentlicher Projektdaten: CAPEX System, Volllaststunden, Output-Elektrolyse, OPEX, Lebensdauer Stacks, Verkaufspreis

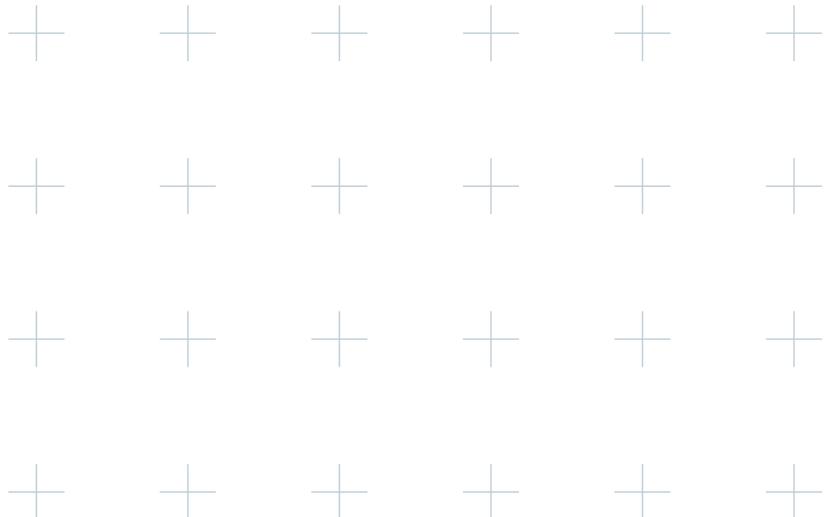
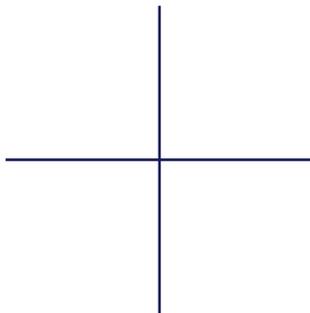
Ergebnis

- Gestehungskosten
- Jährlicher Cash-flow
- Kapitalwert
- Einfluss von Sensitivitäten

Tool

- Excel-basierte Business-Case Berechnung
- LCOH-Kostenrechner, siehe Kapitel 8

HYEXPERTS *Region HyAllgäu*-Bodensee, S.25 ff.*



5.2

Infrastrukturkonzepte

Ziel des Kapitels ist die Erarbeitung von Verteilungskonzepten, welche die H₂-Quellen mit den Bedarfsstellen verbindet und zuverlässig beliefert. Es werden für **die H₂-Verteiloptionen - Pipeline, Tube-Trailer** für flüssigen und gasförmigen Transport und **Trailer-Wechselbrückensysteme (wahlweise auch Wechselcontainer-Modell genannt)** Hilfestellungen für die Technologieauswahl und Konzeptentwicklung im Checklisten-Format formuliert. Eine Übersicht der drei Technologien ist in [Abbildung 10](#) zu finden.

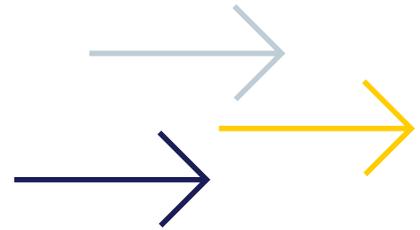
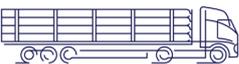
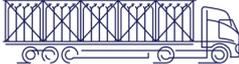


Abbildung 10: Übersicht verfügbarer H₂-Distributionskonzepte

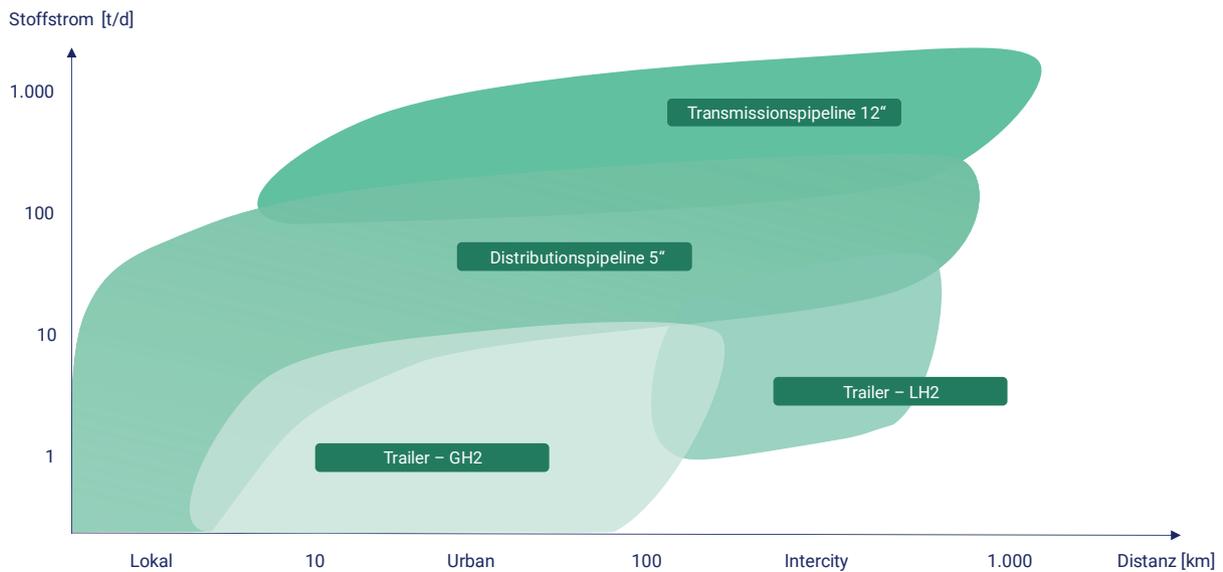
Technologieübersicht der H ₂ -Distributionskonzepte				
Spezifikationen einzelner Technologien: Pipeline, Tube-Trailer, Trailer-Wechselbrückensystem und LH ₂ -Trailer				
	Pipeline	Tube-Trailer	Trailer-Wechselbrückensystem	LH ₂ -Trailer
				
H ₂ -Zustand	gasförmig			flüssig
Beschreibung	Beim leitungsgebundenen Transport wird Wasserstoff mit Drücken unter 100 bar durch Pipelines befördert	Transport kleinerer bis mittlerer Mengen per Lkw in mehreren gebündelten Druckgasflaschen auf sogenannten Tube-Trailern	Wechselbrücken sind eine spezielle Art von Lkw-Anhängern, die schnell und einfach auf- und abgeladen werden können	Transport in kryogenen Trailern bietet eine höhere Energiedichte, erfordert jedoch kostenintensive Verflüssigung von Wasserstoff

Grafikquellen: Pipeline, HyExperts Helmstedt; Trailer-Konzepte, HyExperts Havelland
 Technologiesteckbriefe: HyExperts Havelland

Initial ist die Auswahl der geeigneten Technologie für die Fälle vorzunehmen, in denen keine on-site Elektrolyse vorliegt. Der Technologieauswahl liegen vor allem die regionalen Voraussetzungen, wie **Verfügbarkeit von nahegelegenen Pipelines, Transportdistanzen sowie die Abnahmestrukturen (Druckniveaus, flüssig (LH₂) oder gasförmig und Abnahmemengen und Zyklen)** zu Grunde. Eine eindeutige Technologieauswahl ist deshalb immer im konkreten Anwendungsfall zu prüfen. Eine Hilfestellung für die erste Abschätzung zur Technologieauswahl ist im [HyExperts Reutlingen](#) zu finden, vergleiche [Abbildung 11](#).



Abbildung 11: Vergleich der Transportoptionen nach Stoffstrom und Distanz (Quelle: HyExperts II – Hy-NATuRe Reutlingen, S. 17)

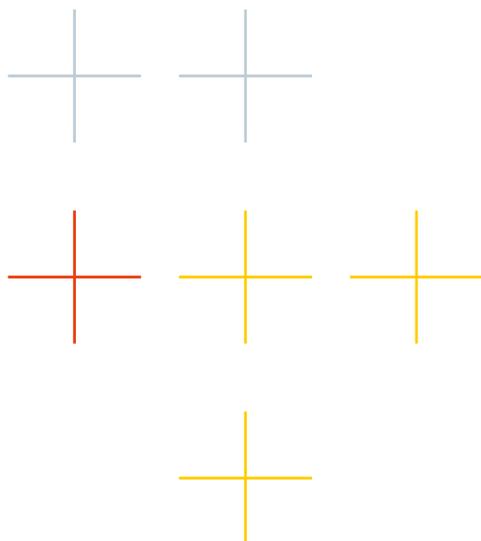


5.3

Pipelinekonzepte

Treiber, Ziele und Parameter

An dieser Stelle erhalten Kommunen und Regionen sowie deren Verwaltungen Einblick in die strategische Planung und Auslegung von H₂-Pipelineinfrastrukturen. Obwohl Netzbetreiber meist die Hauptakteure bei der Umsetzung sind, ist die Einbindung lokaler Behörden und Akteure entscheidend. Mit der voranschreitenden Entwicklung des Wasserstoffkernnetzes und des zugehörigen Rechtsrahmens (EnWG) schafft der Regulierer zunehmend Rechtssicherheit für den Ausbau des Netzes. Der Ausbau von H₂-fähigen Verteilnetzen auf lokaler Ebene gewinnt an Beachtung, da nicht zuletzt ein Großteil der industriellen Abnehmer an Verteilnetze angeschlossen sind. Der Leitfaden unterstützt dabei, mögliche zukünftige Projekte zu identifizieren, notwendige Schritte zu verstehen und vorab initiale Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsrechnungen durchzuführen.



Inputparameter

- H₂-Bedarfsprofil (Lastprofile, Druckanforderungen)
- Perspektivisch Anschluss ans Kernnetz/ Verteilnetz
- Standorte von H₂-Quellen
- Übersicht bestehender Erdgaspipelines auf Transport- und Verteilnetzebene
- Transportdistanzen [km]
- Technische Technologieparameter z. B. Investitionskosten, Verdichter-Technologien
- Methoden der Wirtschaftlichkeitsrechnung, inkl. Abschätzung zukünftiger Netzentgelte

Technologie Deep-Dive: H₂-Pipelinetransport

Basiswissen Pipelinetransport:

Pipelineneubau- bzw. Umstellungskosten sowie die Betriebskosten je nach dem Durchmesser, wie z. B. im [HyExperts II – Landeshauptstadt Mainz, S. 166 ff.](#) (hier: eigene Darstellung):

Tabelle 2: Geschätzte Kosten für den Neubau bzw. die Umwidmung von H₂-Fernleitungen (Quelle: [European Hydrogen Backbone 2022])

	Durchmesser [Zoll/mm]	Niedrige Kosten	Mittlere Kosten	Hohe Kosten
CAPEX Neubau Wasserstoffpipeline [Mio. €/km]	20/500	1.4	1.5	1.8
	36/900	2.0	2.2	2.7
	48/1200	2.5	2.8	3.4
CAPEX Umwidmung Erdgaspipeline [Mio. €/km]	20/500	0.2	0.3	0.5
	36/900	0.2	0.4	0.5
	48/1200	0.3	0.5	0.6
CAPEX Kompressorstation [Mio €/MWel]		2.2	3.4	6.7
Preis für Elektrizität [€/mWh]		40	60	80
Pipeline Betriebs- und Reparaturkosten [€/Jahr als % des CAPEX]		0.8	0.9	1.0
Kompressor Betriebs- und Reparaturkosten [€/Jahr als % des CAPEX]		1.7	1.7	1.7

Aktuelle Technologiesteckbriefe sind im Abschlussbericht [HyExperts II – Landkreis Havelland, S. 166](#) zu finden



Vorgehen bei der Planung und Auslegung

Für die grundlegende Konzeptionierung von Pipelineinfrastruktur kann folgendes Vorgehen definiert werden:

→ Regionalisierung von H₂-Bedarfen und Einspeiseknotenpunkten (siehe auch [Kapitel 4.2](#))

- Abfrage und Verortung regionaler H₂-Bedarfe
- Frühzeitige Übermittlung der Bedarfe und Kommunikation mit dem regionalen Netzbetreiber (Excel Formular des DVGW zur Sammlung von H₂-Bedarfen für Verteilnetze, [H2vorOrt Abfrage H₂-Ausspeisung](#))

→ Analyse der bestehenden Erdgasinfrastruktur und geplante H₂-Infrastruktur

- Erstellung einer Übersicht des Verlaufes des künftigen H₂-Netzes in der Region sowie bestehende Erdgasleitung, welche in Zukunft potenziell auf Wasserstoff umgerüstet werden können [HyExperts II – Region Aachen-PLUS, S. 36 ff.](#)
- Prüfung der grundsätzlichen Anschlussmöglichkeit, etwa durch Stichleitungen oder Verteiler-Hubs, an geplante H₂-Projekte auf Transportnetzebene (in der Regel in Kooperation mit den örtlichen Netzbetreibern)
- Einen Leitfaden für die Transformation von H₂-Verteilnetzen liefert der DVGW im Zuge der Initiative [H2vorOrt](#). Der hier zugängliche Gasnetzgebietstransformationsplan (GTP) ist ein zentrales Planungsinstrument für die Konzeptionierung von H₂-Verteilnetzen

→ Konzeptionierung: Routenplanung für einzelne Pipelinestränge

Identifikation von Anker- und Leuchtturmprojekten sowie von Ausbau und Neubaupotenzialen entlang der möglichen Routenverläufe. Erforderlich sind Kooperationen mit Netzbetreibern, H₂-Einspeisern und H₂-Abnehmern sowie regionalen Institutionen (z. B. IHK und Raumordnungsbehörde) [HyExperts II – H₂Ostwürttemberg, S. 42 ff.](#):

- H₂-Readiness², also Tauglichkeit der Leitung für den H₂-Transport, sowie H₂-Readiness der angeschlossenen Kunden auf technischer, zeitlicher und wirtschaftlicher Ebene
- Notwendigkeit paralleler Verwendung des Erdgasnetzes zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit
- Absprache mit Raumordnungsbehörde über Notwendigkeit des Raumordnungsverfahrens



siehe:

**Herausforderung Nr. 4
(S. 22):**

Netzanbindung



siehe:

**Herausforderung Nr. 4
(S. 22):**

Netzanbindung



siehe:

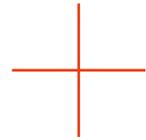
**Herausforderung Nr. 1
(S. 16):**

**Identifikation & Beschaffung
geeigneter Standorte & Flächen**

² Weiterführende Informationen zu H₂-Readiness von Erdgasnetzen sind unter anderem auf den Seiten des DVGW zu finden ([verifHy – H₂ readiness](#))

➔ **Konzeptionierung:
Leitungsdimensionierung**

- Abschätzung des notwendigen Mindestdurchmessers zu Deckung der Bedarfe
- Für detaillierte Planung sind netzhydraulische Berechnungen, Gas-Druck-Regel-Messanlagen und detaillierte Lastprofile erforderlich



➔ **Indikative Wirtschaftlichkeitsrechnung**

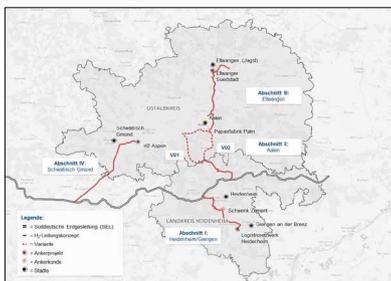
- Indikative Wirtschaftlichkeitsrechnung unter Berücksichtigung von Szenarien hinsichtlich Auslastung der Leitungen und Höhe der Netzentgelte
- Eine indikative Abschätzung bezüglich der zu erwartenden Netzentgelte liefert die Studie [HyExperts II – Landkreis Wartburgkreis, S. 138-139](#)



Abbildung 12: Best Practice: H₂-Pipelinetransport

Best Practice: Konezptentwicklung für leitungsgebundene H₂-Versorgung
Etablierung und Sicherstellung von Skalierungen von Versorgung großer H₂-Mengen

Methode



- Identifikation von Zugangspunkten
- Lokalisierung von Anker- und Leuchtturmprojekte
- Raumwiderstände analysieren
- Ableitung von H₂-Bedarfen zur Dimensionierung der Leitungen

Ergebnis

- Routenplanung und Dimensionierung von Leitungsabschnitten
- Investitionskostenvergleich versch. Varianten



[H2Ostwürttemberg, S.39 ff.](#)

+5.4

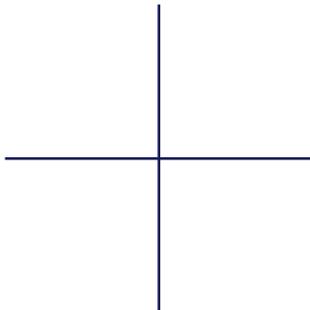
Trailerkonzepte

Treiber, Ziele und Parameter

Der H₂-Transport über Trailer ist für viele H₂-Wertschöpfungsketten im Hochlauf eine mittel- und langfristig wirtschaftliche Möglichkeit für den Transport über kurze bis mittlere Strecken. Der Wasserstofftransport per Trailer bringt höhere Flexibilisierungsmöglichkeiten, einen geringeren CAPEXInvest sowie einen vereinfachten genehmigungsrechtlichen Rahmen mit sich. Die Auslegung von Trailer-Konzepten hat zum Ziel, eine kostenoptimale Abschätzung zur Technologiewahl zwischen unterschiedlichen Trailer-Konzepten, Trailer-Wechselbrückensystemen und Tube-Trailern, durchzuführen. Bei der Entwicklung von Trailerkonzepten sind H₂-Bedarfe, verschiedene Technologieoptionen, Anforderungen an Abfüllstationen und die Wirtschaftlichkeit des Systems zu berücksichtigen.

Inputparameter:

- H₂-Bedarfe [t/a]
- Entfernung zwischen den H₂-Erzeugungsstandorten und den H₂-Abnehmern [km]
- Dimensionen und Anzahl vorhandener Infrastruktur wie Speichergroße [m³], Größe der Wechselcontainer und Wechselbrücken [Fuß]
- Druckniveaus an den Belieferungs- und Abnahmestandorten [bar]
- Bedarfsmengenabhängige Belieferungsdauer und benötigte Belieferungszyklen
- Anschaffungskosten einzelner Bestandteile wie Kompressoren und Speicher [€/kg]
- Betriebskosten [€/kg]



Technologie Deep-Dive: Trailer-Konzepte

Basiswissen Trailerkonzepte:

Technologiekennzahlen der Tankstellenbelieferungsoptionen eines Tube-Trailers sowie des Wechselbrücken-Modells, [HyExperts I – H₂PURe Ulm, S. 64 ff.](#) (hier: eigene Darstellung):

Tabelle 3: Vor- und Nachteile der Versorgungsmodelle

	Tube-Trailer	Trailer-Wechselbrückensystem
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Belieferung von mehreren Kunden mit einem Transportspeicher möglich > Potenzial für Routenoptimierungen • Nutzung der bestehenden stationären Speicherinfrastruktur des Kunden (wenn vorhanden) • Flexible Versorgung von Neukunden möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Zeiteinsparungen durch wegfallende Überströmzeiten • Schnelle Verfügbarkeit von hohen H₂-Mengen am Kundenstandort • Schnelle Ablagerung und Abholung der Container möglich • Einsparung eines stationären Pufferspeichers für den Kunden • Kaum teilentleerte Speicher für Rückfahrt
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Kunden/Speicherabhängige Befüllungszeiten für Überströmen • Erschwerte Planungssicherheit für die Versorgung mehrerer Kunden pro Tour aufgrund individueller Speichergrößen und Druckniveaus • Evtl. nur Teilentleerungen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Kapitalkostenintensive Containerlösungen • Planung genügender Container für alle Kundenstandorte • Akzeptanz von Neukunden für solch eine Speicherinfrastruktur • Bindung des Kunden an einen Anbieter

Ein Kostenvergleich beider Belieferungsoptionen wurde in mehreren Abschlussberichten von HyExperts durchgeführt, u. a. im [HyExperts Wartburg-Hainich, S. 53 ff.](#) Eine detaillierte Technologiebeschreibung befindet sich im Abschlussbericht [HyExperts I – H₂PURe Ulm, S. 64 ff.](#)



Vorgehen bei der Planung und Auslegung

→ Ermittlung der H₂-Bedarfe

- Aufnahme der regionalisierten H₂-Bedarfe (siehe [Kapitel 4.2](#))

→ Identifizierung der Erzeugungs- und Abnehmerstandorte lokaler Akteure in der Region

- Verortung von Standorten von H₂-Erzeugern und H₂-Abnehmern (mengenmäßig und Datum der Verfügbarkeit bzw. des Bedarfs), z. B. via H₂-Marktplatz (www.localiser.de)
- Optional: Clusterbildung der Standorte bei einer Vielzahl an Abnehmern bzw. Erzeugern für die initiale Zuordnung. Beispiel für die Clusterbildung basierend auf identifizierten Projektansätzen regionaler Akteure: [HyExperts II – Region HyAlgäu* -Bodensee, S. 9 ff.](#)

→ Identifizierung von Transportstrecken

- Identifizierung der Trailer-Routen und der benötigten Transportmengen zwischen beispielhaften Erzeugungsstandorten und den Abnehmern in der Region
- Modellierung kostenoptimaler Transportrouten zur Minimierung der Trailer-Anzahl und somit der Betriebskosten
- Je nach Komplexität des betrachteten Systems: Einfache Streckenauswahl oder eine Optimierung mehrerer Standorte:
 - Einfache Streckenauswahl: Ermittlung einer Fahrstrecke zwischen projektspezifischen »Quelle-Senke«-Standorten. Beispiel: [HyExperts I – H₂PURe Ulm, S. 63](#), inklusive Visualisierung der Entfernung mittels Karten-Apps
 - Optimierung mehrerer Standorte: Standortanalyse für einen Distributionsstützpunkt zur zentralen Lagerung und bedarfsgesteuerten Verteilung. Standortauswahl basierend auf mehreren technischen und genehmigungsrechtlichen Kriterien mit dem Ziel, Transportwege zu minimieren. Beispiel zu diesem Vorgehen: [HyExperts I – MH₂Regio Frankfurt am Main, S. 77](#)

→ Durchführung von Szenario-basierten Modellierungen

- Berücksichtigung unterschiedlicher Szenario Varianten für die Modelloptimierung
- Festlegung von Randbedingungen für alle Szenarien, wie die vorhandene Infrastruktur einschließlich der Anzahl sowie Größe der Speicher an den Abnehmerstandorten bzw. das H₂-Belieferungs- und Abnahmedruckniveau. Beispiel: [HyExperts I – H₂PURe Ulm, S. 63](#)

→ Bestimmung der Belieferungszyklen und Technologieauswahl

- Ermittlung der Fahrzeiten und der mengen-spezifischen Belieferungsdauer
- Vergleich zwischen Tube-Trailern und Trailer-Wechselbrückensystemen unter Berücksichtigung von benötigten Austauschzeiten, Überströmzeiten, Platzbedarfen und Wirtschaftlichkeit. Beispielhafte Durchführung: [HyExperts I – H₂PURe Ulm, S. 62 ff.](#)



siehe:

Herausforderung Nr. 5 (S. 25):

Identifikation & Einbindung regionaler Akteure

➔ **Anforderungen an Trailer-Abfüllstationen oder Verteil-Hubs in der Region**

- Beispielhafte Auslegung einer Trailer-Abfüllstation an einem Elektrolysestandort für eine kontinuierliche Befüllung mehrerer Trailer: [HyExperts I – IN₂H₂ Ingolstadt, S. 27](#)
- Weitere Modellierungen: [HyExperts I – MH₂Regio Frankfurt am Main, S. 166 ff.](#)
- Weitere Informationen zu den Standortkriterien sowie eine beispielhafte Auswertung gegebener Standorte: [HyExperts I – MH₂Regio Frankfurt am Main, S. 195](#)

➔ **Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

- Investitions- und Betriebskostenermittlung der Trailer-Konzepte und deren Kostenvergleich mit Sensitivitätsanalyse, siehe [Best Practice Abbildung 13](#)

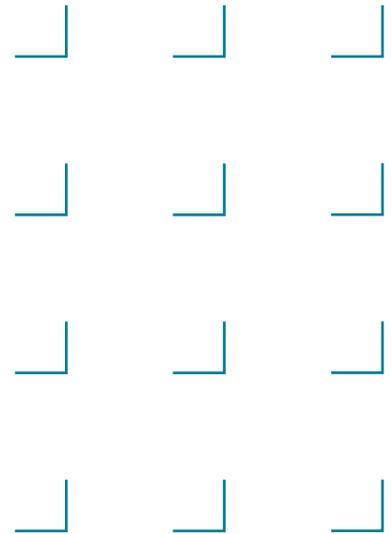


Abbildung 13: Best Practice: H₂-Trailer-Konzepte

Best Practice: Kostenvergleich der Trailerkonzepte mit einer Sensitivitätsanalyse

Berechnung und Vergleich jährlicher Ausgaben sowie spezifischer Kosten je kg H₂ mit Einsparungspotenzialen

Methode

- Bestimmung der Szenariorahmen für beide Trailerkonzepte (H₂-Transportmengen, Trailerrouten, Belieferungszyklen, Speichergrößen, Überströmzeiten etc.)
- Ermittlung der jährlichen CAPEX- und OPEX-Kosten [€/a]
- Ermittlung der spezifischen Kosten je kg H₂ [€/kg]

- Kostenvergleich beider Trailer-Technologien
- Einsparpotenziale mithilfe einer Sensitivitätsanalyse

Trailer-Konzept	spezifische Kosten je kg H ₂ [€/kg]
Trailer-Wechselbrückensysteme	0,75 €
Tube-Trailer	0,84 €

[H2PURE Ulm, S.62 ff.](#)

+5.5 Tankstellen

Treiber, Ziele und Parameter

Die AFIR-Verordnung (siehe auch [Kapitel 6](#)) der EU fordert den zügigen Ausbau eines flächendeckenden Wasserstofftankstellennetzes, um die Verfügbarkeit von Wasserstoff als alternativen Kraftstoff im gesamten europäischen Verkehrssektor sicherzustellen. Darüber hinaus erfordern die Einhaltung von Flottengrenzwerten sowie steigende CO₂-Kosten einen beschleunigten Wandel hin zu emissionsarmer Mobilität. Darüber hinaus ermöglicht die Teilnahme am THG-Quotenhandel einen zusätzlichen Erlös aus der Vermarktung von erneuerbarem Wasserstoff. In Deutschland gibt es bereits mehr als 90 Wasserstofftankstellen, eine Übersicht über Standorte und Verfügbarkeiten bietet die [H2.LIVE: Wasserstoff-tankstellen in Deutschland & Europa](#) von H2Mobility. Eine Nutzung von vorhandenen Wasserstofftankstellen vermeidet Investitionskosten und ist deshalb stets zu prüfen.

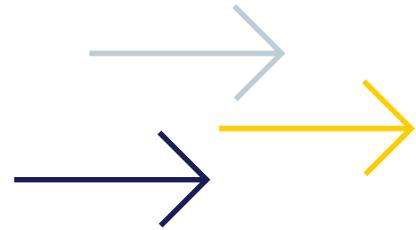
Das folgende Kapitel umfasst die wesentlichen Vorgehensweisen aus den HyExperts Berichten bei der Konzeptionierung von neuen H₂-Tankstellen. Das Kapitel zielt auf die Validierung der H₂-Bedarfe, der Auswahl des richtigen Tankstellenstandortes und einer Vorplanung des wirtschaftlichen Betriebes der H₂-Tankstellen ab.

Inputparameter:

- Abnehmer und H₂-Bedarfe regionalisiert und quantifiziert [z. B. kg/d]
- Regionale Standortfaktoren und Ausprägung an den zu untersuchenden Standorten
- Erste Erkenntnisse zu möglichen H₂-Versorgungsoptionen
- Techno-ökonomische Parameter für die Wirtschaftlichkeitsrechnung

Vorgehen bei der Planung und Auslegung

Nachfolgend werden die wichtigsten Phasen bei der Konzeptionierung einer H₂-Tankstelle vorgestellt. Das Vorgehen kann grundsätzlich in die drei Teilbereiche Abnahmekonzept, Standortauswahl und Detailplanung unterteilt werden.



Technologie Deep-Dive: Tankstellenkonzepte

Basiswissen Tankstellenkonzepte:

Technologiekennzahlen der Tankstellenmodelle – einer stationären und einer mobilen Tankstelle, wie z. B. im [HyExperts II – HyNATuRe Reutlingen, S.19](#):

Tabelle 4: Vergleich einer stationären und mobilen Tankstelle

Typ	Stationäre Tankstelle	Mobile Tankstelle
Investitionskosten (nach Kapazität)	4,5 M€ (350 bar, 1 t _{H₂} /Tag) 5,5 M€ (700 bar; 1 t _{H₂} /Tag)	0,7 M€ (350 bar; 0,25 t _{H₂} /Tag)
Betrieb & Wartung	3-5% CAPEX p. a.	
Abgabemenge	200-1.000 kg _{H₂} /Tag	24-360 kg _{H₂} /Tag
Flächenbedarf	200-800 m ²	15-34 m ²
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> Nachrüsten bestehender Tankstellen und modulare Erweiterung i. d. R. möglich Serielle Betankung mehrerer Fahrzeuge Kombinierte Tankstelle mit 350 bar & 700 bar möglich 	<ul style="list-style-type: none"> Keine/geringe Baumaßnahmen notwendig Schneller Aufbau und Ortswechsel möglich Geringe Investitionskosten
Nachteile	Hohe Investitionskosten bei Neubau	Geringere Kapazität bzw. wenige Tankzyklen möglich

Weitere Entscheidungen hinsichtlich der Auslegung der Tankstelle bzw. der Nutzung von mobilen Speichern oder stationären Speichern, wurden im [HyExperts I – IN2H2 Ingolstadt, S. 29 ff.](#) anhand der Technologieerläuterung und eines TCO-Kostenvergleichs betrachtet.

➔ Abnahmekonzept:

Der erste Schritt der Tankstellenkonzeptionierung ist die Entwicklung eines Abnahmekonzeptes.

- Identifizierung von H₂-Abnehmern, wie Busse vom ÖPNV, Nutzfahrzeuge wie z. B. Müllsammelfahrzeuge, LKWs von Speditionen oder andere Fahrzeuge wie Pkw, Stapler oder Taxis
- Ermittlung der individuellen H₂-Bedarfe ([Kapitel 4.2](#)) für die Skalierung der H₂-Tankstelle ([HyExperts II – Stadt Hagen, S. 19 ff.](#))
- Treffen von verbindlichen Abnahmevereinbarungen mit den Abnehmern
- Ähnliche Beispiele für die Skalierung von H₂-Tankstellen: [Fraunhofer 2021] und [e-mobil BW 2023]

Standortauswahl:

Die Standortauswahl erfolgt auf der Grundlage des Abnahmekonzepts und der ermittelten Tankstellengröße. Bei der Standortauswahl können im ersten Schritt Betreiber von lokalen, konventionellen Tankstellen kontaktiert werden, um das Interesse am Bau einer H₂-Tankstelle zu erfragen. Ist kein Standort vorhanden, muss dieser zunächst anhand diverser Faktoren identifiziert werden:

- Nähe zu den ermittelten H₂-Abnehmern
- Nähe und Preis pro kg (inklusive Lieferung) einer H₂-Quelle (falls vorhanden)
- Verkehrsanbindung und Zugänglichkeit zu Fernverkehrsrouten
- Flächennutzungsplan und öffentliche Gegebenheiten (dauerhafte Lärmemission)
- Tankstellennetz/-redundanz
- Flächengröße für Skalierbarkeit/Langfristplanung
- weitere Einrichtungen an der Tankstelle (Versorgung mit Einkaufsmöglichkeiten, WC, Rastanlagen, Autohof)

Bei beiden Optionen ist der Kontakt zu der Kommune für die Genehmigungsfähigkeit und eventuellen Auflagen zu Emissionen und H₂-Speichermengen frühzeitig zu suchen. Ebenfalls ist der lokale Netzbetreiber zu kontaktieren, um die Anbindung zum Stromnetz oder zum H₂-Netz zu erfragen. Zudem wird empfohlen, den Kontakt zu weiteren H₂-Projekten zu suchen, um Synergien zu schaffen.

➔ **Detailplanung:**

Im Zuge der Detailplanung werden die Technik der Tankstelle bestimmt, Genehmigungen eingeholt sowie der Business Case und die Finanzierung erarbeitet.

- Technologieübersicht Tankstellen: Von der Belieferung von flüssigem oder gasförmigem Wasserstoff via Trailer bis zur Eigenerzeugung via Elektrolyse bestehen diverse Möglichkeiten
- Tankstellenkomponenten und Layout (Lastenheft): Eine Liste von Herstellern ist in [e-mobil BW 2023] auf Seite 100 ff. sowie in [Kapitel 5.8](#) zu finden



siehe: **Herausforderung Nr. 3 (S. 21):**
Unterschiedliche technologische Reifegrade der Wertschöpfungsstufen

Abbildung 14: Übersicht von Betreibermodellen von H₂-Tankstellen (Quelle: [e-mobil BW 2023])

	Eigentum Flotte	Eigentum HRS	H ₂ -Verkauf	H ₂ -Erzeugung
Spediteur	(x)*			
Spediteur mit Betriebshof	x	x		
HRS-Betreibergemeinschaft		x	x	
Energieerzeuger		x	x	x
Pay-per-use-Kooperationen	x	x	x	x

* Geleast oder Eigentum des Spediteurs

➔ **Wirtschaftlichkeit und Finanzierung**

- Exemplarische Komponenten eines H₂-Tankstellen Lastenheftes:
 - Trailer Entladebuchten mit flexiblem Schlauch inkl. Abreißkupplung, Erdungsverbindung, Benutzeroberflächenpanel
 - Kompressoren einschließlich Wärmetauscher
 - Wasserstoffspeicher
 - Dispenser mit Vorkühler, Druck- und Temperaturmessung, Durchflussmengenregelung, Hochdruckbetankungsschlauch, Abreißkupplung, Befüllkupplung, Erdungsverbindung, Steuerungs- und Anzeigeeinheit mit Bedienoberfläche

Im Anhang des Abschlussberichtes der »HyExpert I – MH₂Regio Frankfurt am Main« sind die einzelnen Tankstellenkomponenten in der [Übersicht Auslegungsparameter Hauptkomponenten](#) aufgelistet. Die Vorgehensweise von der Projektdefinition bis zum Ausschreibungsprozedere ist im Anhang der »HyExpert I – H₂-Lastverkehr Nordost-Niedersachsen« mit einem beispielhaften [Lastenheft](#) für eine Wasserstoff-tankstelle beschrieben.

- Definition von Betankungsprotokollen unter Berücksichtigung von Betankungsnormen zur Abbildung des Betankungsprozesses und grundlegendes Anlagenlayout, siehe [e-mobil BW 2023, S. 24ff.]. Die Betankungsprotokolle dienen als wichtiges Bindeglied zwischen Fahrzeug, Tankstelle und den Umgebungsbedingungen.

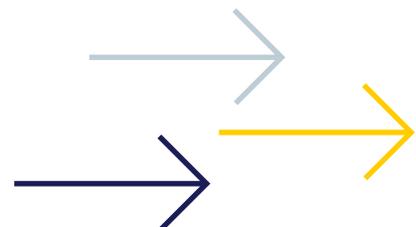
ZIEL IST ES, ALLE KOSTEN ZU ERFASSEN UND AUF EINE VERGLEICHBARE GRÖSSE WIE Z. B. €/KG HERUNTERZUBRECHEN, UM DIE VERGLEICHBARKEIT ZU ANDEREN PROJEKTEN ODER KONVENTIONELLEN ANTRIEBSVARIANTEN HERZUSTELLEN.

Wesentliche Bestandteile der TCO-Rechnung sind:

- Investitionskosten umlegen auf die (gesamte) Lebensdauer der Anlage bzw. des Fahrzeugs
- Identifikation der Betriebskosten unter Einbeziehung aller anfallenden Kosten für den Betrieb (z. B. H₂-, Energie-, Personal-, Gemeinkosten, etc.) sowie Erhalt (Wartung, Ersatzteile, etc.) und zusätzlichen Erlösquellen beispielsweise aus dem [THG-Quotenhandel](#)
- Einbeziehung von Effizienzverlusten über die Lebensdauer
- Zusammenfassung der Kosten und Gegenrechnung einer geeigneten Größe wie z. B. den vertankten Wasserstoff (€/kg)
- Durchführung von Sensitivitätsanalysen variabler Einflussfaktoren (wie z. B. Strompreis, Effizienz von Kompressoren, Investitionskosten, etc.), siehe dazu auch [HyExpert I – HYWHEELS Fulda, S. 60 ff.](#)

Ein Beispiel einer TCO-Rechnung ist in der Studie [Ifeu 2022] und im [HyExpert I – IN₂H₂ Ingolstadt, S. 30](#) zu finden.

Factsheet zu diesem Thema siehe nächste Seite.





THG-Quotenhandel gemäß der Umsetzung der RED III



Die Quote zur Minderung von Treibhausgasemissionen – kurz: THG-Quote – ist ein marktbasiertes Klimaschutzinstrument, das dazu beitragen soll, europäische und nationale Klimaschutzziele im Verkehrssektor zu erreichen. Inverkehrbringer von fossilen Diesel- und Ottokraftstoffen sind dazu verpflichtet, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren, die durch die Verwendung ihres Kraftstoffs entstehen. Damit einher geht ein THG-Quotenhandelsystem, das die Option bietet, die Pflicht zur Erfüllung der Quote auf Dritte zu übertragen. Wer ein klimafreundliches Fahrzeug besitzt oder Tank- und Ladeinfrastruktur für diese anbietet, kann unter Umständen am Quotenhandel teilnehmen und so Einnahmen erzielen.

Wie ist die THG-Quote geregelt?

Die THG-Quote wird im Bundes-Immissionsschutzgesetz unter §37a [BlmSchG](#) als Umsetzung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie II der EU (RED II) festgelegt. Hieraus ergeben sich jährlich steigende THG-Quoten für die Inverkehrbringer von fossilen Diesel- und Ottokraftstoffen. Für 2024 liegt die erforderliche Treibhausgasreduzierung bei 9,25 Prozent gegenüber dem Referenzwert – bis 2030 soll sie 25 Prozent erreichen.

Bei den Verhandlungen über die nun anstehende Umsetzung der RED III in nationales Recht wird über eine weitere Erhöhung der Quotenvorgaben diskutiert.

Den quotenverpflichteten Unternehmen stehen verschiedene Optionen zur Verfügung, um ihre THG-Quote zu erfüllen:

1. Sie bringen selbst Biokraftstoff, grünen Wasserstoff oder Fahrstrom in Verkehr (Eigenerfüllung).
2. Sie übertragen die Erfüllung der Quotenverpflichtung auf Dritte (THG-Quotenhandel).

Damit ein Anreiz besteht, mehr klimafreundliche Erfüllungsoptionen in Verkehr zu bringen, werden THG-Minderungsmengen für Fahrstrom sowie für strombasierte Kraftstoffe, einschließlich grünem Wasserstoff, dreifach angerechnet. Letztere werden als Renewable Fuels of Non-Biological Origin (RFNBOs) bezeichnet. Kommen die quotenverpflichteten Unternehmen ihrer Verpflichtung nicht nach, ist eine Strafzahlung in Höhe von aktuell 600 € pro Tonne CO₂-Äquivalent zu leisten.

Für den Handel mit THG-Quoten schließen der Verkäufer (Anbieter der Erfüllungsoptionen) und der quotenverpflichtete Käufer einen Quotenhandelsvertrag ab. Der ausgehandelte Preis wird durch Angebot und Nachfrage bestimmt.



Wie wird grüner Wasserstoff angerechnet?

Die Anrechnung von RFNBOs, wie beispielsweise Wasserstoff, ist in Teil 2 §3 ff. der [37. BImSchV](#) geregelt. Die spezifischen THG-Emissionen werden entsprechend der Herkunft des strombasierten Kraftstoffs ermittelt.

Nach der 37. BImSchV gilt der Tankstellenbetreiber bei Wasserstoff als quotenberechtigt. Damit wird ein zusätzlicher Anreiz für Betreiber geschaffen, Wasserstofftankstellen zu errichten. Spätestens wenn ausreichend Wettbewerb unter den Tankstellenbetreibern herrscht, ist zu erwarten, dass die Quotenerlöse durch einen reduzierten Wasserstoffpreis an die Kundschaft weitergegeben werden.



Zum Herunterladen des Factsheets in voller Länge bitte den QR-Code scannen.

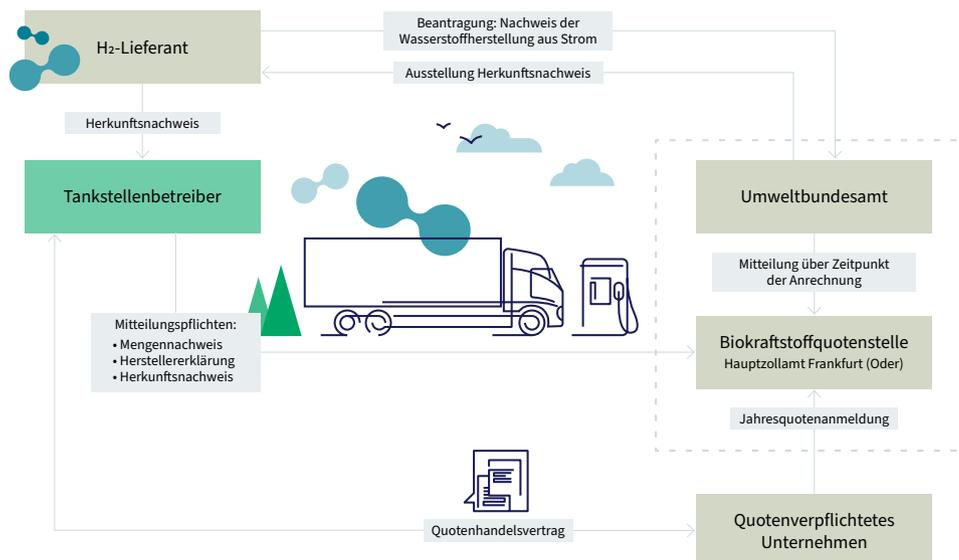
So geht's: Wie Wasserstofftankstellen am Quotenhandel teilnehmen

- Wasserstofftankstellenbetreiber können über eine geeignete B2B-Handelsplattform, über einen Zwischenhändler oder direkt mit den Quotenverpflichteten in Kontakt treten.
- Der Herkunftsnachweis für den abgegebenen Wasserstoff muss vom Lieferanten erbracht werden. Dieser lässt die abgegebenen Wasserstoffmengen und die damit verbundenen THG-Emissionen vom UBA bescheinigen. Nach der Preisbildung schließt der Tankstellenbetreiber einen Quotenhandelsvertrag mit dem quotenverpflichteten Unternehmen.
- Die bescheinigten Kraftstoffmengen sowie der Herkunftsnachweis und der Quotenhandelsvertrag werden dann bei der Biokraftstoffquotenstelle beim Hauptzollamt Frankfurt (Oder) eingereicht.

Hinweis:

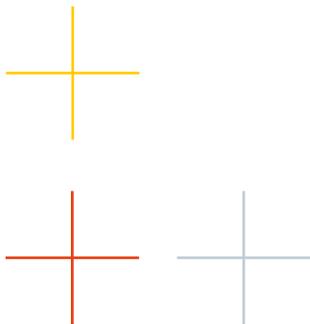
Teilmengen des in Verkehr gebrachten Wasserstoffs können unterjährig gehandelt werden.

Nachweispflichten beim THG-Quotenhandel mit grünem Wasserstoff (übliche Konstellationen)



➔ **Genehmigungen einholen**

Abschließend steht das Thema der Genehmigungen an. Je nach Größe und Belieferungskonzept müssen verschiedene Gesetze und Verordnungen beachtet werden (z. B. BetrSichV, BimschG, BauO), diese werden in [Kapitel 6](#) ausführlich dargestellt.



siehe:

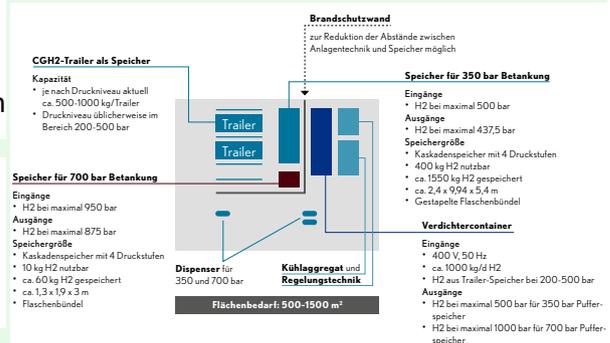
- Herausforderung Nr. 6 (S. 33):**
Unterschiedliche Behörden
- Herausforderung Nr. 7 (S. 33):**
Fehlende Erfahrung in den Behörden
- Herausforderung Nr. 8 (S. 33):**
Unterschiedliche regionale Vorgaben

Abbildung 15: Best Practice: Tankstellenlayout

Best Practice: Dimensionierung Tankstelle

Erstellung eines Tankstellenlayouts mit Komponentenspezifikation

 Methode	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Identifikation der Randbedingungen <input type="checkbox"/> Ableitung der Anforderungen <input type="checkbox"/> Grobkonzeption Tankstellenlayout <input type="checkbox"/> Definition der Komponentenspezifikation
 Ergebnis	<ul style="list-style-type: none"> • Tankstellenlayout • Platzbedarfe • Dimensionierung der Komponenten
 Tool	<ul style="list-style-type: none"> • Konzeptionsfragebogen



+ 5.6

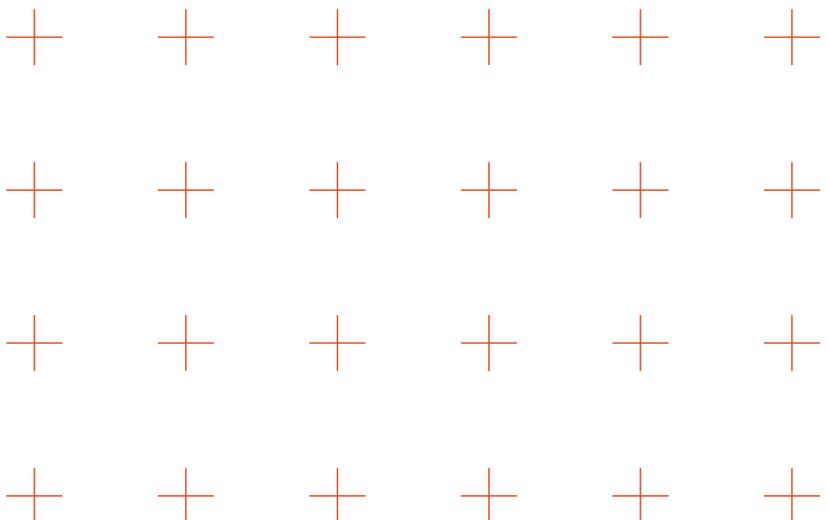
Mobilitätsanwendungen

Treiber, Ziele und Parameter

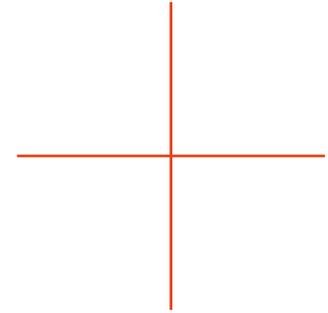
Der Mobilitätssektor und insbesondere Flottenbetreiber erfahren steigenden Transformations- und Dekarbonisierungsdruck durch nationale und europäische Klimaziele. Dies erfordert eine Umstellung auf emissionsarme Kraftstoffe wie Batterie, Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe, um die CO₂-Emissionen zu reduzieren. Die Wahl der richtigen Technologie erfordert eine fundierte Abwägung, da jede Option unterschiedliche Vor- und Nachteile hinsichtlich Infrastruktur, Reichweite und insbesondere der jährlichen Kosten mit sich bringt. Ein Vergleich verschiedener Technologien auf Basis einer Total Cost of Ownership (TCO) Rechnung ermöglicht es, die langfristigen wirtschaftlichen Auswirkungen, einschließlich Anschaffungs- und Betriebskosten sowie regulatorischen Entwicklungen wie etwa temporäre Steuererleichterung (beispielsweise Mautbefreiung), genau zu bewerten. Dies hilft Flottenbetreibern, fundierte Entscheidungen hinsichtlich der kostengünstigsten Technologieauswahl zur Flottendekarbonisierung zu treffen.

Inputparameter:

- Techno-ökonomische Fahrzeugparameter wie CAPEX, OPEX und Betriebsdaten
- Informationen für Vergleich mit Diesel oder anderen Optionen



Nachfolgend wird der Transformationsdruck im Verkehrssektor anhand eines Fallbeispiels beschrieben, welches die Motivation branchentypischer Akteure, bedingt durch Dekarbonisierungstreiber (siehe [Tabelle 9](#)), kontextualisiert.



Fallbeispiel: Transformationsdruck eines regionalen Spediteurs

Unternehmensprofil:

Die Spedition mit dem Namen Transporte GmbH ist ein mittelständisches Unternehmen mit Sitz in einer ländlichen Region Deutschlands. Das Unternehmen betreibt eine Flotte von 50 Lkw und bietet Transportdienstleistungen für Kunden im regionalen Raum an.

Die Transporte GmbH hat den Dekarbonisierungsdruck erkannt und ist bereit, entsprechende Maßnahmen zu ergreifen.

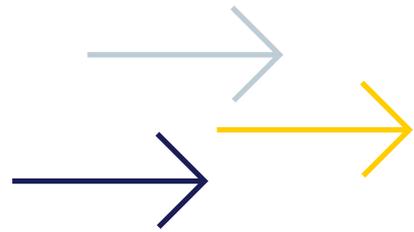
Herausforderungen und Dekarbonisierungstreiber:

- Wertschöpfung und Wettbewerbsfähigkeit: Die Investition in emissionsfreie Lkw senkt die Transportemissionen der Transporte GmbH und ermöglicht die Wahrung von Environmental, Social und Governance (ESG)-Anforderungen und Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD)-Pflichten. Dies verschafft ihr einen Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Flottenbetreibern mit Diesel-Lkw, da den Auftraggebern von Lieferketten eine möglichst CO₂-arme Transportdienstleistung wichtig ist.
- Wettbewerbsfähige Kosten: Für einen ökonomischen Business Case sind angemessene Kosten hinsichtlich Anschaffungspreisen für die Fahrzeuge sowie deren Betriebskosten zentral. Als Maßstab kann ein dieselparitätlicher Kostenvergleich herangezogen werden.



- Lkw-Maut: Da emissionsfreie Lkw temporär von der Lkw-Mautpflicht befreit sind, sieht die Transporte GmbH hier einen Hebel, um seine Betriebskosten zu reduzieren. Weiterhin fördern CO₂-Mautaufschläge das Erreichen von Kostenparität zwischen den fossilen und alternativen Antriebsvarianten.
- Kfz-Steuer: Neben der temporären Befreiung von der Lkw-Maut bietet der temporäre Erlass der Kfz-Steuer für emissionsfreie Fahrzeuge ebenfalls einen finanziellen Anreiz zur Investition in batterieelektrische Fahrzeuge, um von dieser erheblichen Steuererleichterung zu profitieren.
- Lade- bzw. H₂-Infrastruktur: Die Anschaffung von emissionsfreien Fahrzeugen ist primär abhängig von der Versorgungssicherheit mit der jeweiligen Antriebsenergie, also einer angemessenen Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Lkw bzw. einer H₂-Tankstelleninfrastruktur für Brennstoffzellen-Fahrzeuge.
- Umweltzonen: Die Einführung von Umweltzonen in deutschen Städten zwingt die Transporte GmbH dazu, ihre älteren Diesel-Lkw zu ersetzen oder nachzurüsten, um die erforderlichen Abgasstandards einzuhalten. Dies verursacht zusätzliche Kosten und Investitionen.
- EU-Flottenverordnung: Die Europäische Union setzt strenge CO₂-Emissionsgrenzwerte für die Herstellung neuer Fahrzeuge fest. Die Transporte GmbH erfährt durch den sich verändernden Markt einen Anreiz ihre Flotte modernisieren.
- THG-Minderungsquote: Die THG-Minderungsquote hat einen indirekten Einfluss auf die Transporte GmbH. Durch die Gewinne aus dem Quotenhandel (siehe Seite 50/51) werden emissionsfreie Kraftstoffe wie grüner Wasserstoff sowie Ladestrom perspektivisch günstiger.

Factsheet zu diesem Thema siehe nächste Seite.



Fazit:

Die Transporte GmbH steht vor erheblichem Transformationsdruck, hervorgerufen durch regulatorische und marktwirtschaftliche Dekarbonisierungstreiber. Um wettbewerbsfähig zu bleiben und den gesetzlichen Anforderungen gerecht zu werden, investiert die Spedition frühzeitig in emissionsfreie Fahrzeuge und passt seine Betriebsabläufe an die neuen Antriebskonzepte sowie deren Tank- bzw. Ladeinfrastruktur an. Dies erfordert sorgfältige Planung und finanzielle Ressourcen, bietet jedoch gleichzeitig Chancen für langfristige Kosteneinsparungen, eine verbesserte Umweltbilanz und sichert der Transporte GmbH zahlreiche Speditionsaufträge.

Die Ziele einzelner Akteure im Verkehrssektor können nur erreicht werden, wenn die **Kommunen die lokalen Rahmenbedingungen, etwa durch den Ausbau von Tank- und Ladeinfrastruktur oder verbindlichen Transformationsplänen, schaffen.**

Lkw-Maut: Was bedeutet sie für klimafreundliche Nutzfahrzeuge?



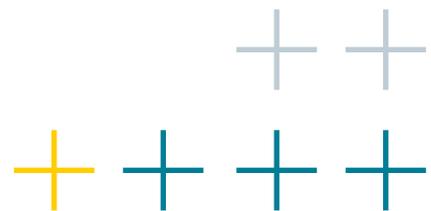
Die Lkw-Maut ist eine streckenbezogene Straßenbenutzungsgebühr und gilt für bestimmte Nutzfahrzeuge auf deutschen Bundesautobahnen und Bundesstraßen. Die Mauteinnahmen fließen zur Hälfte in den Erhalt und Ausbau des Straßennetzes und zur Hälfte in andere Mobilitätsmaßnahmen.

Die Höhe der Maut ist abhängig von der tzGm, der Achsenanzahl, der Schadstoffklasse und der CO₂-Emissionsklasse eines Fahrzeugs. Bei Fahrzeugkombinationen werden tzGm und Achsenanzahl aus der Summe der tzGm und Achsen der Einzelfahrzeuge berechnet. Aktuelle Mautsätze finden Sie unter: www.toll-collect.de

Seit dem 01.07.2024 sind laut Bundesfernstraßenmautgesetz (BFStrMG) alle Fahrzeuge mautpflichtig, die für den Gütertransport bestimmt sind oder verwendet werden und deren technisch zulässige Gesamtmasse (tzGm) mehr als 3,5 t beträgt. Von der Maut ausgenommen sind z. B. Fahrzeuge der Streitkräfte, der Polizei oder der Notdienste sowie Kraftomnibusse, land- und forstwirtschaftliche Fahrzeuge und Fahrzeuge unter 7,5 t tzGm die zur Ausübung eines Handwerks oder vergleichbaren Berufs genutzt werden (unter bestimmten Voraussetzungen).

→ **Tipp:** Über den CO₂-Emissionsklassenfinder von Toll Collect kann anhand der spezifischen CO₂-Emissionsangaben des Fahrzeugs (laut Zulassungsbescheinigung Teil 1) die Emissionsklasse bestimmt werden. Diese bildet die Grundlage für die Berechnung der Mautsätze für verkehrsbedingte CO₂-Emissionen.

Das deutsche Mautsystem berechnet und erhebt die Gebühren streckenabhängig. Die Lkw-Maut besteht aus einer Gebühr für Infrastrukturkosten und einer Gebühr für externe Kosten, die sich wiederum in drei Teilsätze gliedert:



Wie sind klimafreundliche Fahrzeuge von der Maut betroffen?



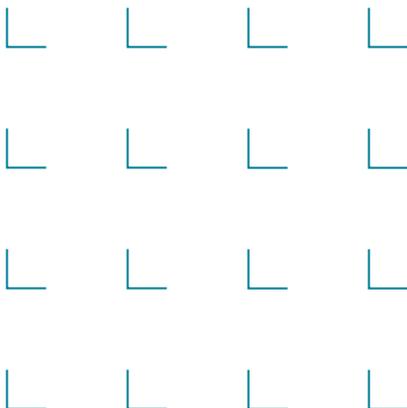
Mit der Differenzierung der Mautsätze nach dem Schadstoff- und CO₂-Ausstoß der Fahrzeuge bieten die Mautvorschriften einen Anreiz, klimafreundliche Fahrzeuge einzusetzen. Für sogenannte emissionsfreie schwere Nutzfahrzeuge sieht das BFStrMG eine Mautbefreiung bis Ende 2025 vor, um den Markthochlauf dieser Fahrzeuge zu unterstützen. Emissionsfreie Fahrzeuge mit einer tZGm von bis zu 4,25 t sind sogar dauerhaft befreit. Ab 2026 wird für emissionsfreie Fahrzeuge ein um 75% reduzierter Mautteilsatz für Infrastrukturkosten fällig, ergänzt von den jeweiligen Mautteilsätzen für Luftverschmutzung und Lärmbelastung. Der Mautteilsatz für CO₂-Emissionen beträgt null und entfällt dementsprechend.

→ Ab 2026:

Bei einer mautpflichtigen Fahrleistung von 100.000 km pro Jahr können schwere Nutzfahrzeuge über eine Halte-dauer von fünf Jahren kumuliert bis zu 160.000 EUR an Mautkosten einsparen.



Zum Herunterladen des Factsheets in voller Länge bitte den QR-Code scannen.



Emissionsfreie schwere Nutzfahrzeuge sind in der EU-Verordnung 2019/1242 zu den CO₂-Emissionsnormen definiert. Nach der kürzlich erfolgten Änderung durch die EU-Verordnung 2024/1610 lautet die Definition wie folgt:

+ Schwere Kraftfahrzeuge mit Emissionen von nicht mehr als 3 g CO₂/tkm oder 1 g CO₂/pkm gemäß der EU-Zertifizierungs-Verordnung 2017/2400 (ermittelt mit Hilfe des Vehicle Energy Consumption Calculation Tool – VECTO),

+ bzw. 1 g CO₂/kWh, bzw. 1 g CO₂/km nach Typ-genehmigungsvorschriften, wenn kein Wert gemäß der EU-Zertifizierungs-Verordnung 2017/2400 ermittelt wurde.

Nicht als emissionsfrei gelten Fahrzeuge, die mit (fortschrittlichen) Biokraftstoffen oder E-Fuels betrieben werden. Entscheidend sind die Emissionen, die während des Betriebs ausgestoßen werden.

Neben batterie- und brennstoffzellenbetrie-benen schweren Nutzfahrzeugen, die lokal keine Emissionen haben, können oben genannte Werte von bestimmten schweren Nutzfahr-zeugen mit Wasserstoffverbrennungsmotor erreicht werden. Diese gelten somit auch als emissionsfrei.

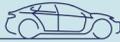
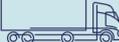


Technologie Deep-Dive: Brennstoffzellenfahrzeuge

Basiswissen Brennstoffzellenfahrzeuge:

Technologische Parameter H₂ betriebener Personen- sowie Nutzfahrzeugen, wie z. B. im [HyExperts II – HyNATuRe Reutlingen, S. 21:](#)

Tabelle 5: Technische Parameter von Brennstoffzellenfahrzeugen (Quelle: HyExperts II – HyNATuRe Reutlingen, S. 21, [NOW 2023])

Fahrzeugtyp	Pkw	LNF*	Bus	Lkw	ASF
					
Reichweite [km]	400-650	350-450	350-450	400-1.2000	ca. 500-600
Druckniveau [bar]	700	700	350	350, später 700/flüssig	350/700
Tankvolumen [kg]	4-6	4-5	35-40	>35	nach Wunsch
Tankzeit [min]	3-5	3-5	8-15	8-15	8-15
Verbrauch [kg/100 km]	ca. 1	1-1,8	6-10	7-9	Abh. von Betriebsweise
Investitionskosten [€]	64-79	50-80	550-650	350-600	700-900

* LNF = Leichte Nutzfahrzeuge, ASF = Abfallsammelfahrzeuge

Technologiesteckbriefe sowie eine Marktübersicht verfügbarer Brennstoffzellenfahrzeuge im Abschlussbericht von [HyExperts II – HyNATuRe Reutlingen \(Anhang, S. 52 ff.\)](#) sowie auf der Seite www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de der NOW beschrieben.



Vorgehen beim Vergleich von Fahrzeugoptionen (TCO)

Bei der TCO-Berechnung werden alle anfallenden Kosten bei der Nutzung von Fahrzeugen über die gesamte Lebenszeit umgelegt und auf eine Vergleichsgröße heruntergebrochen. In der Regel wird hierfür €/km als Vergleichsmaß genutzt. Beispiele für eine gelungene TCO Betrachtung für H₂-Busse und -Züge sind in [HyExperts II – AachenPLUS, S. 81 ff.](#) und [HyExperts I – WUN H₂ Wunsiedel im Fichtelgebirge, S. 46 ff.](#) bzw. [ifeu 2022] zu finden.

→ CAPEX

Im ersten Schritt werden die Investitionskosten betrachtet, welche gemäß der jährlichen Abschreibung in die jährliche TCO-Betrachtung aufgenommen werden. Siehe unter anderem [HyExperts I – WUN H₂ Wunsiedel im Fichtelgebirge, S. 46 ff.](#)

→ OPEX

Zu den OPEX gehören alle operativen Kosten. Dazu zählen u. a. Kraftstoffkosten (inkl. Steuern und Abgaben) Stromkosten, Betriebsmittel, Mitarbeiterkosten, Instandhaltung (oftmals als Prozent von CAPEX) und Treibstoffkosten.

→ Förderung und regulatorische Elemente

Ergänzend sind etwaige Förderungen und deren Entwicklungen, wie beispielsweise Maut- und Energiesteuerbefreiungen in die Rechnung zu inkludieren.



Herausforderung Nr. 9: Zweckbindung/Fördermittelverwendung

- Sowie vereinzelt lange Rückmeldezeiten zu Förderbescheiden
- z. B. kann ein Elektrolyseur, der im Zusammenhang mit einer bestimmten Mobilitätsanwendung gefördert wurde, nicht für andere Zwecke eingesetzt werden.



Lösungsansatz: Detaillierung der Anwendungs- & Nutzungsbereiche des Wasserstoffs

- bereits in der Planungsphase
- Flexibilität des Förderzwecks bei Antragsstellung mitbeachten und ggf. Rücksprache mit dem Fördermittelgeber halten

→ Vergleich und Sensitivitätsanalyse

- Die Kosten werden auf Basis z. B. eines Jahres zusammengetragen und durch die Jahresfahrleistung der Fahrzeuge geteilt
- Über eine Betrachtung des gesamten Fahrzeuglebenszyklus können Kostenentwicklungen, wie etwa steigende CO₂-Bepreisung in die TCO-Rechnung mit aufgenommen werden
- Anwendung der gleichen Vorgehensweise z. B. auf Dieselfahrzeuge zur Vergleichbarkeit

5.7

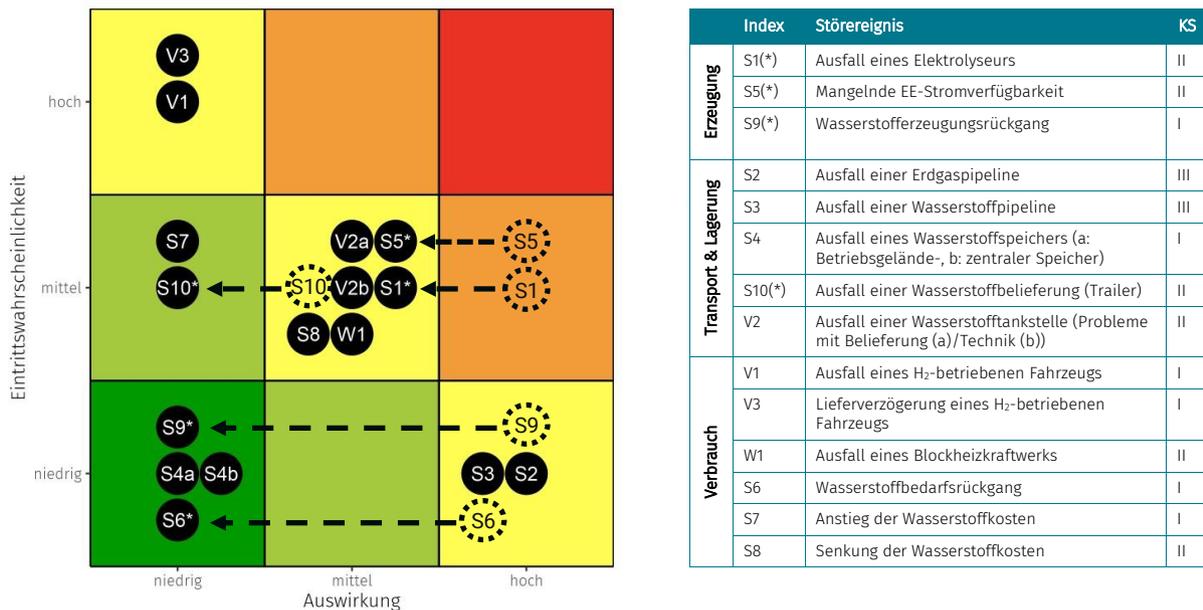
Gesamtkonzepte, Sektorenkopplung und Digitalisierung

Bei der Konzeptionierung von H₂-Projekten sind die Einbettung in das regionale Gesamtsystem sowie vernetzende Aspekte zu berücksichtigen. In diesem Kapitel werden Beispiele aus den HyExperts Studien genannt, in denen explizit Gesamtbetrachtungen, Maßnahmen der Sektorenkopplung oder Digitalisierungskonzepte entlang der Wertschöpfungskette entwickelt wurden.

Ziele und Vorgehen – Gesamtsystemanalyse Risiken und Sensitivitäten

Die Modellierung komplexer H₂-Versorgungskonzepte mit einer Vielzahl an Stakeholdern bringt Herausforderungen in Bezug auf die organisatorische Struktur sowie die technischen Aspekte der Versorgungssicherheit mit sich. Die wesentlichen Risiken und Einflussfaktoren auf das jeweilige konzeptionierte System sind dabei zu berücksichtigen. Eine ausführliche Analyse von Risiken, wie etwa Störereignissen bei der H₂-Erzeugung oder der Einfluss der H₂-Importpreise auf die regionale Erzeugung, wurde im Rahmen des [HyExperts II – Landeshauptstadt Mainz, S. 238 ff.](#) durchgeführt (siehe [Abbildung 16](#)).

Abbildung 16: Exemplarische Auswertung Störereignis-Analyse (Quelle: HyExperts II – Landeshauptstadt Mainz, S. 248)



KS-Kategorie der Schadenshöhe, nähere Erläuterungen im HyExperts II – Landeshauptstadt Mainz, S. 243

Ziele und Vorgehen – Betreibermodelle für Gesamtkonzepte

Der Aufbau komplexer H₂-Versorgungskonzepte erfordert auch eine Analyse aller relevanten Stakeholder und der jeweiligen Erlös- und Betreiberkonzepte. Eine initiale Betrachtung von Betreibermodellen für die gesamte H₂-Wertschöpfungskette ist im [HyExperts I – MH₂Regio Frankfurt am Main, S. 119 ff.](#) zu finden (siehe [Abbildung 17](#)).

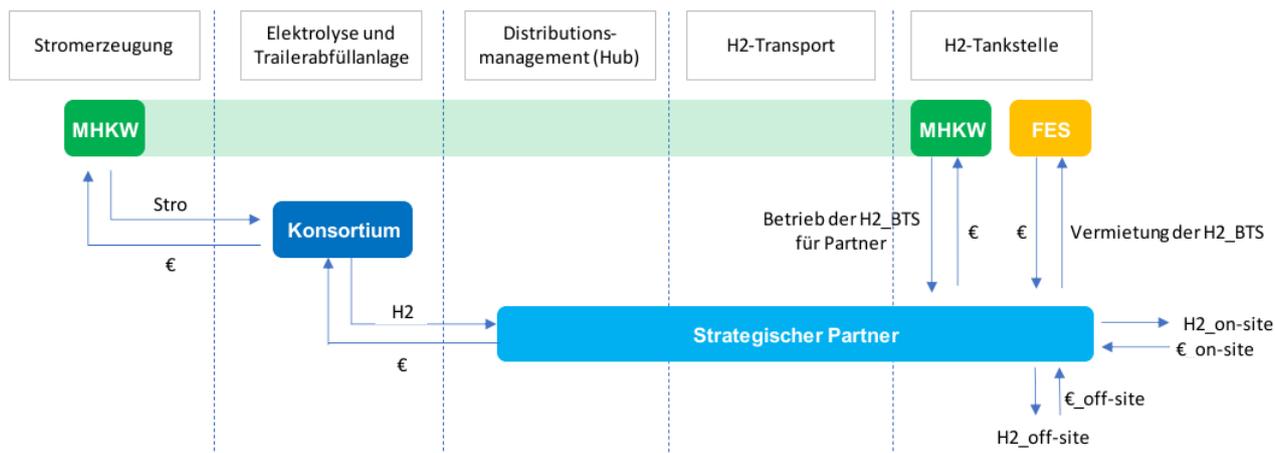
Die Konzeptionierung von regionalen Vertriebsgesellschaften bietet den Vorteil einer regional abgestimmten H₂-Beschaffung bei verringertem Risiko für Einzelakteure. Der Aufbau und die Aufgabenbereiche einer solchen Gesellschaft werden beispielhaft im [HyStarter – Wasserstoff-Roadmap Lausitz, S. 57 ff.](#) beschrieben.

Ziele und Vorgehen – Digitalisierungskonzepte

Eine abgestimmte Erzeugung, Speicherung und Nutzung von Wasserstoff ist essenziell für den Aufbau wirtschaftlich sinnvoller H₂-Gesamtkonzepte. Wenig Beachtung bei der Konzeptionierung finden dabei jedoch häufig die Vernetzung und intelligente Steuerung von Anlagen und Systemen. Dabei spielt auch die Simulation von realen Input-Parametern wie Day-Ahead Strompreise eine wesentliche Rolle. Die exemplarische Erschließung eines H₂-basierten Smart-Grid-Konzeptes ist in [HyExperts II – Region Nordhessen, S. 111 ff.](#) umfänglich skizziert.



Abbildung 17: Beispiel Betreibermodelle (Quelle: HyExperts I – MH₂Regio Frankfurt am Main, S. 121)



+5.8

Technologielieferanten

→ **Erzeugung**

- [Markübersicht Elektrolyseure C.A.R.M.E.N. e.V.](#)
- [Technologieübersicht Elektrolyseure, HyExperts II – Region Chemnitz, S. 12 ff.](#)

→ **Anwendung Mobilität**

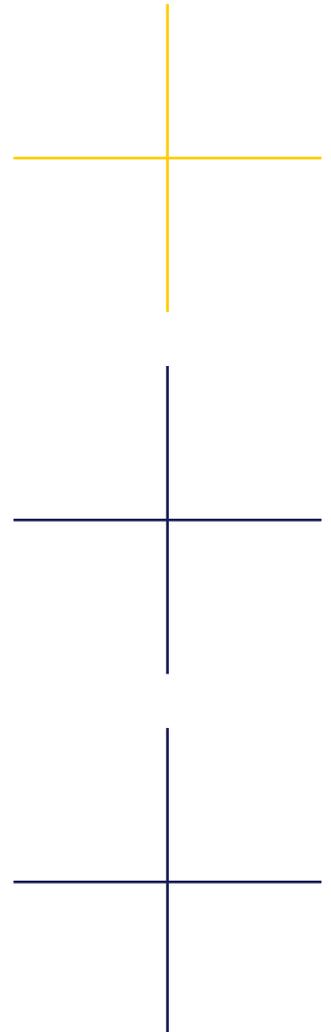
- [Fahrzeugdatenbank – Klimafreundliche Nutzfahrzeuge \(klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de\)](#)
- [Technologieübersicht Entwicklungsstand BZ-Fahrzeuge, HyExperts II – Region Chemnitz, S. 12 ff.](#)
- [Technologiesteckbriefe H₂-Fahrzeuge, HyExperts II – HyNATuRe Reutlingen \(Anhang, S. 52 ff.\)](#)
- [Anwendungen in der Intralogistik – Clean Intralogistics Net](#)
- [Beispielhaftes Lastenheft H₂-Tankstellen, HyExperts I – H₂-Lastverkehr Nordost-Niedersachsen, S. 114](#)
- [H₂-Tankstellen funktionale Beschreibung, \[NOW 2020\]](#)
- [Zulieferer Betankungskomponenten \[e-mobil BW 2023\], S. 100 ff.](#)
- [Anwendungsbeispiele für stationäre Brennstoffzellen – clean power net](#)

→ **Firmenverzeichnisse**

- [Brennstoffzellen Branchenführer Deutschland 2024 \[VDMA AG Brennstoffzelle 2024\]](#)
- [HZwei Hefte Archiv – Aktuell bis 2015 – Hydrogeit Verlag | HZwei Blog & Magazin](#)

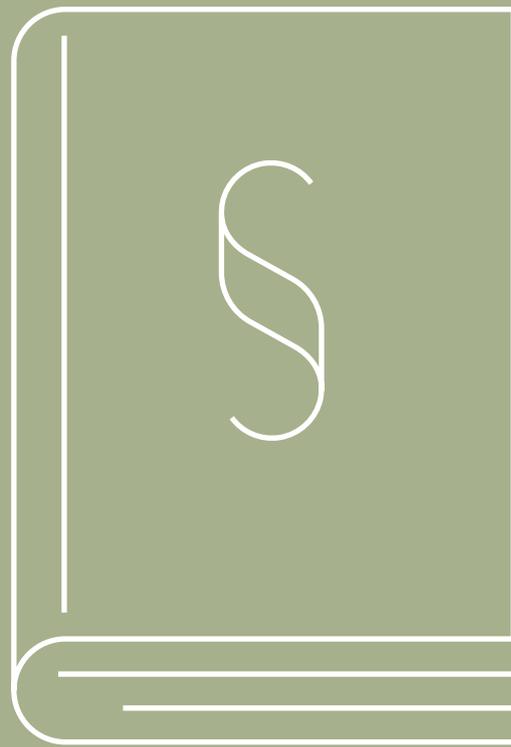
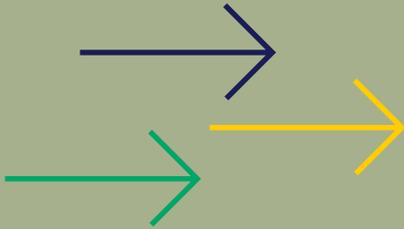
→ **Marktanalysen**

- [The Fuel Cell Industry Review 2022 \(erm.com\)](#)



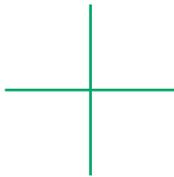


Genehmigungen und Regulatorik



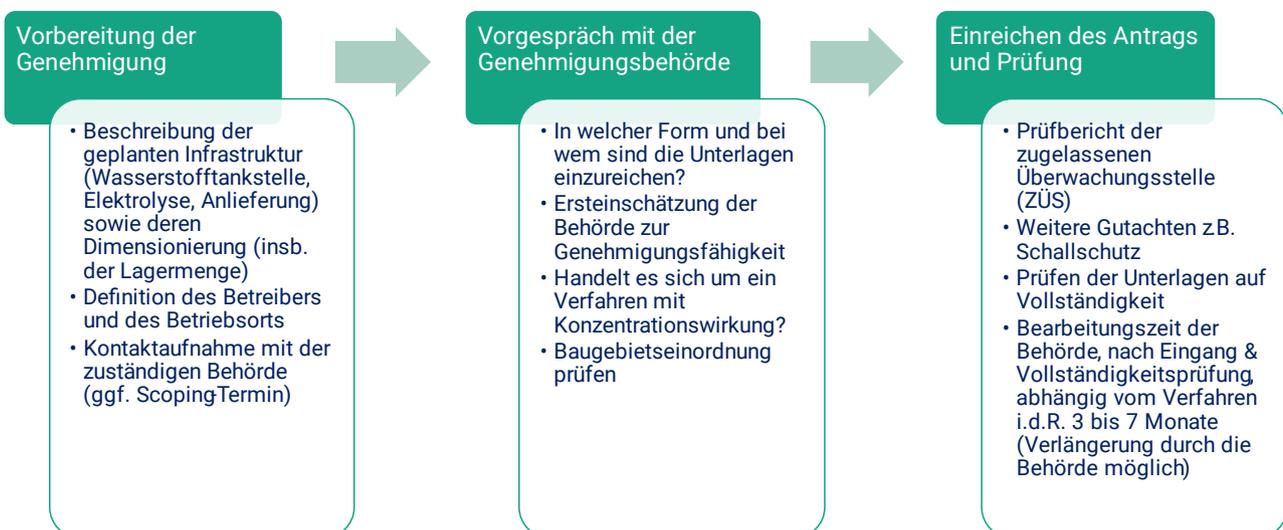
6.1

Genehmigungsverfahren entlang der H₂-Wertschöpfungskette



Die Genehmigung von Anlagen im Bereich der H₂-Erzeugung oder H₂-Infrastruktur ist ein Vorgang mit verschiedenen Verantwortlichkeiten auf Seiten der Behörden, der aufgrund mangelnder Erfahrungswerte auf Seite der Antragssteller und/oder der genehmigenden Behörden ein umfangreicher Prozess sein kann. Grundsätzlich kann der Ablauf von Genehmigungsverfahren, wie in [Abbildung 18](#) gezeigt, allgemein beschrieben werden.

Abbildung 18: Generischer Ablauf eines Genehmigungsverfahrens (Quelle: HyExperts II – HyNATuRe Reutlingen, Anhang, S. 68)



Der zeitliche Aufwand für Vorbereitung der Genehmigung und Vorgespräch mit der Genehmigungsbehörde ist schwer abzuschätzen, da hier mehrere Faktoren, beispielsweise interne und externe Personalverfügbarkeit oder eventuelle Störgrößen, häufig nicht bekannt sind. Für die Einreichung und Prüfung des Antrags werden zwischen drei und sieben Monate veranschlagt. Die Genehmigungsverfahren unterscheiden sich zwischen H₂-Erzeugungsanlagen, -Leitungen, -Speichern und -Tankstellen. [Tabelle 6](#) zeigt eine Übersicht. Eine detaillierte Beschreibung der Verfahren ist zudem im [HyExperts II – Landeshauptstadt Mainz, S. 141 ff.](#) inklusive Checklisten zu finden.

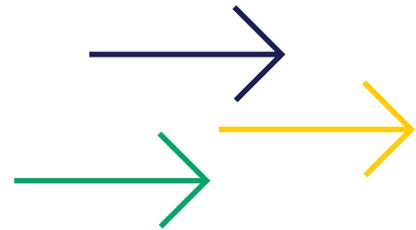


Tabelle 6: Übersicht über die Genehmigungsverfahren für H₂-Anlagen (Quelle: HyExperts II – Region Chemnitz S. 35 ff.)

Erzeugungsanlagen	Leitungen	Speicher	Tankstellen
<p>Planfeststellung/ Plangenehmigung Großvorhaben zur Verbindung von Infrastrukturen, UVP-pflichtig, mit Ortsbegehung</p>	<p>Raumordnungsverfahren Neubau mit DN > 300 mm, die raumbedeutsam ist</p>	<p>Immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren vereinfacht: oberirdische Speicherung > 3 t formell: oberirdische Speicherung > 30 t, ggf. UVP mit Ortsbegehung</p>	<p>Planfeststellung nach §18 Allgemeines Eisenbahngesetz, Eisenbahntankstelle</p>
<p>Immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren Erzeugung im »industriellen Umfang«, ggf. UVP formelles Verfahren mit Ortsbegehung</p>	<p>Planfeststellung Neubau mit DN > 800 mm, UVP-pflichtig, mit Ortsbegehung</p>	<p>Erlaubnis nach Betriebs-sicherheitsverordnung und Baugenehmigung oberirdische Speicherung < 3 t</p>	<p>Immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren H₂-Station – Gasfüllanlage mit eigener Produktion des Wasserstoffs vor Ort, Speicherung > 3t</p>
<p>Erlaubnis nach Betriebs-sicherheitsverordnung keine Erzeugung im »industriellen Umfang«, Forschungsanlage</p>	<p>Fakultat. Planfeststellung Neubau mit DN < 300 mm</p>	<p>Bergrechtliches Genehmigungsverfahren unterirdische Speicherung</p>	<p>Erlaubnis nach Betriebs-sicherheitsverordnung und Baugenehmigung H₂-Liefertankstelle – Gasfüllanlage ohne eigene Produktion des Wasserstoffs vor Ort, Speicherung < 3 t</p>
<p>Baugenehmigung sehr kleine Anlagen, Forschungsanlage</p>	<p>Sicherheitstechnisches Anzeigeverfahren Umstellung Erdgasleitung</p>		
	<p>Energierrechtliches Anzeigeverfahren Umstellung Erdgasleitung und unwesentliche bauliche/technische Änderungen/Erweiterungen</p>		<p>Störfallverordnung Ab 5 t anwesende Menge Gefahrstoffe ist ein Störfallprotokoll zu erarbeiten</p>

Die grundlegenden Zuständigkeiten entlang der allgemeinen Verfahrensschritte sind in [Tabelle 7](#) dargestellt. Aufgrund der generell langen Bearbeitungsdauer eines Antrags, empfiehlt es sich, zu Beginn einer Vorbereitung bereits auf die relevanten Stakeholder zuzugehen, um die Einhaltung der Projektfrist zu unterstützen.

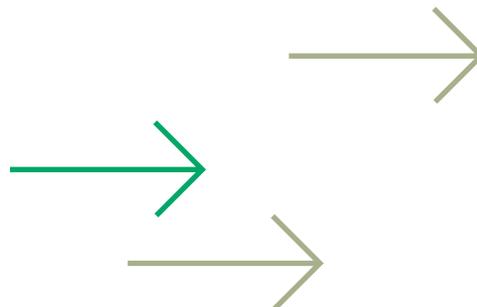


Tabelle 7: Beteiligte Stakeholder für die jeweiligen Schritte im Genehmigungsverfahren (Quelle: [ikem 2023])

Stakeholder	Antragsteller	Behörden	Sachverständige	Öffentlichkeit & Dritte
Verfahrensschritt	Konzepterarbeitung	<ul style="list-style-type: none"> • Beratung mit Antragsteller • Prüfung Antrag auf Mängel und Vollständigkeit • Einleitung Behördenbeteiligung • Abgabe Stellungnahme • Prüfung und Entscheidung über Antrag 	Ggf. Beteiligung Ggf. Gutachten	Ggf. Beteiligung

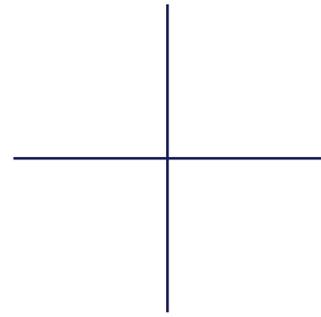
Weitere Details zum Genehmigungsverfahren, wie etwa zu erwartende Dauer der Verfahren, Kosten für Gutachten und Zuständigkeiten sind im Bericht und zugehörigen Anhang des [HyExperts II – HyNATuRe Reutlingen Anhang, S. 64 ff.](#) zu finden. Die Genehmigungsverfahren (teils landesspezifisch) zum leitungsgebundenen Gastransport sowie zur Speicherung sind dem [HyExperts II – Region Chemnitz, S. 44 ff.](#) zu entnehmen. Die NOW GmbH veröffentlichte einen umfangreichen [Genehmigungsleitfaden](#) für Wasserstofftankstellen im Bereich der Betriebsschutzverordnung (BetrSichV).

Mit dem Entwurf des (20/11899) Wasserstoffbeschleunigungsgesetzes will die Bundesregierung den Markthochlauf von Wasserstoff bis 2030 erheblich beschleunigen [Bundesregierung 2024].



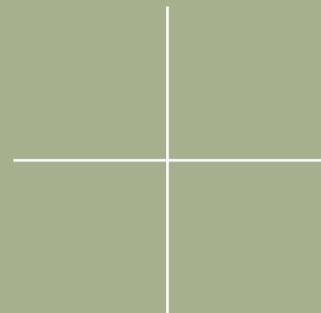
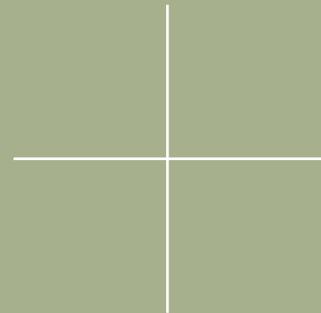
Die wichtigsten Punkte des gebilligten Entwurfs sind:

- Zuerkennung des überragenden öffentlichen Interesses und Wahrung der öffentlichen Sicherheit
- Erleichterung der Planungs-, Genehmigungs- und Vergabeverfahren zur Erzeugung, Speicherung und dem Import von Wasserstoff
- Erleichterung des vorzeitigen Maßnahmenbeginns
- Verkürzung der Instanzenwege
- Beschleunigung der Eilverfahren und Vereinfachung von Prüfverfahren für Elektrolyseure



Die 1. Lesung der Vorlage des Wasserstoffbeschleunigungsgesetzes erfolgte am 28. Juni 2024. Der Vorschlag wurde danach an den Ausschuss für Klimaschutz und Energie zur Weiterberatung überwiesen [Hausding 2024]. Das Inkrafttreten des Gesetzes sowie die folgende Umsetzung in den Ämtern kann aktuell nicht sicher festgelegt werden, jedoch wird er von Brancheninsidern auf Anfang des Jahres 2025 prognostiziert.

Eine Abschätzung des Einflusses des Wasserstoffbeschleunigungsgesetzes auf die Verfahren und eventuelle geänderte Zuständigkeiten kann nicht abgegeben werden, da noch keine finale Form vorliegt. Ebenso ist eine generelle Abschätzung der Kosten aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren nicht möglich.



+ 6.1.1

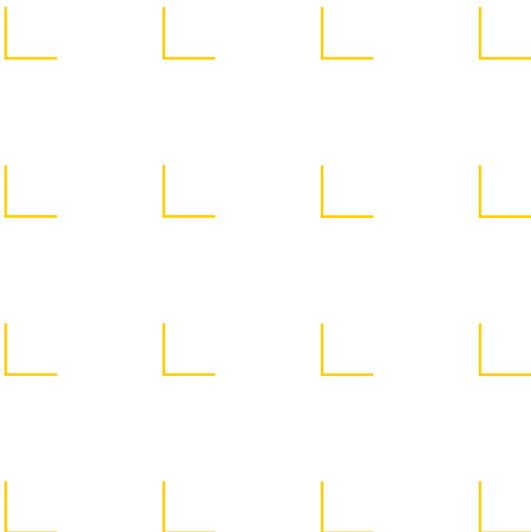
Genehmigungsverfahren H₂-Erzeugung

Die regulatorischen Anforderungen zu H₂-Erzeugungsanlagen ergeben sich aus dem vorangegangenen [Kapitel 6.1](#). Besonderheiten für Erzeugungsanlagen sind hier gesondert dargestellt. Neben der Identifikation des führenden Genehmigungsverfahrens bei der Errichtung einer Elektrolyseanlage bleiben noch weitere Verfahren und Pflichten zu prüfen. Dazu gehört die Umweltverträglichkeitsprüfungspflicht (UVP-Pflicht) inklusive Vorprüfung nach dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP-G), die maßgeblich abhängig ist von H₂-Lagermengen (>3 t). Hierauf wird gesondert im [Kapitel 6.2](#) eingegangen, da dort hohe, dedizierte Speichermengen erwartet werden. Zur detaillierteren Betrachtung wurde im [HyExperts II – Landkreis Havelland \(Genehmigungsleitfaden S. 10\)](#) ein Genehmigungsleitfaden herausgearbeitet, welcher auch dediziert auf die Begrifflichkeiten sowie einen idealen Ablauf eingeht. [ikem2023]



ERWARTETE VERBESSERUNGEN FÜR DIE H₂-ERZEUGUNG DURCH DAS »WASSER- STOFFBESCHLEUNIGUNGSGESETZ«

Mit der Novellierung der 4. BImSchV sollen die Elektrolyseanlagen zukünftig unter Anhang 1 10.26 »Anlagen zur Herstellung von Wasserstoff durch die Elektrolyse von Wasser« geführt werden [BMUV 2023]. In der Novellierung wird zwischen Elektrolyseuren mit einer Nennleistung über 5 MW (10.26.2) und über 68 MW (50 t H₂-Produktion pro Tag, 10.26.1) unterschieden. Somit fallen Anlagen unter 5 MW nicht mehr unter die emissionsrechtliche Genehmigungspflicht nach BImSchG. Anlagen zwischen 5 und 68 MW sollen ein vereinfachtes Verfahren und erst Anlagen über 68 MW in ein förmliches Verfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung fallen. Dies ist nur der Fall, wenn die übrigen Anlagenteile der Gesamtanlage nicht in ein höherrangiges Verfahren fallen.

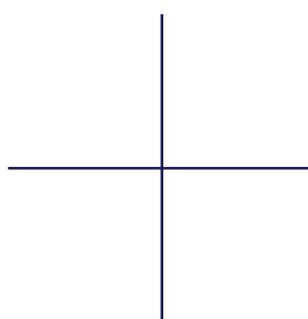


Gemäß dem Entwurf des Wasserstoffbeschleunigungsgesetzes steht die Errichtung und Betrieb im überragenden öffentlichen Interesse, wenn ein Großteil der Stromversorgung aus EE-Quellen (Inbetriebnahme bis Ende 2029, Grenzwert von 80% EE-Strom) stammt.

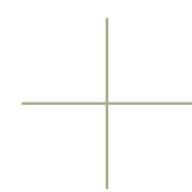


Abbildung 19: Baugenehmigungsverfahren für eine H₂-Tankstelle mit und ohne vor-Ort-Elektrolyse (Quelle: HyExperts II – HyNATuRe Reutlingen, S. 33)

H ₂ -Lagermenge	< 3 t			Ab 3 t			Ab 5 t		
H₂-Tankstelle	Baugenehmigungsverfahren Erlaubnis-Verfahren nach § 18 BetrSichV			Baugenehmigungsverfahren Erlaubnis-Verfahren nach § 18 BetrSichV			Baugenehmigungsverfahren Erlaubnis-Verfahren nach § 18 BetrSichV		
				Vereinfachtes Verfahren nach § 19 BImSchG inkl. standortbezogene Vorprüfung nach UVPG			Vereinfachtes Verfahren nach § 19 BImSchG inkl. standortbezogene Vorprüfung nach UVPG		
							Störfallverordnung 12. BImSchV		
+ Elektrolyseur	Förmliches Verfahren nach § 10 BImSchG inkl. allgemeine Vorprüfung nach UVPG			Förmliches Verfahren nach § 10 BImSchG inkl. allgemeine Vorprüfung nach UVPG			Förmliches Verfahren nach § 10 BImSchG inkl. allgemeine Vorprüfung nach UVPG		



Innerhalb der HyExperts Studien werden die regulatorischen Herausforderungen im Zusammenhang mit der RED II/III bzw. 37. BImSchV diskutiert. Eine Übersicht Anforderungen an den Strombezug ist in [Kapitel 4.1](#) sowie im Anhang und auf den Seiten der [NOW Factsheet RED III](#) zu finden.



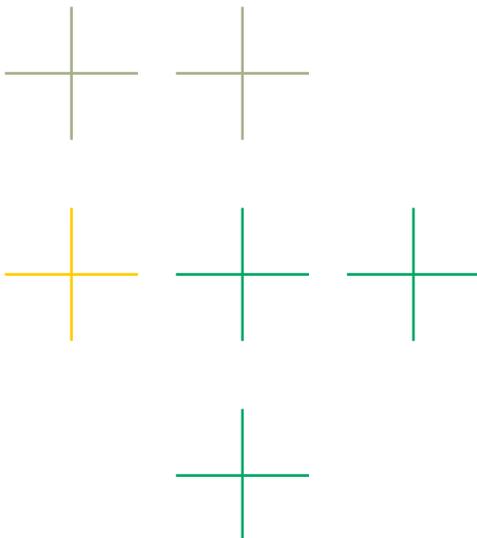
6.1.2

Genehmigungsverfahren H₂-Infrastruktur

Die Genehmigungsverfahren für die Errichtung und den Betrieb von H₂-Speichern (alternativ Speicheranlagen) sind abhängig von der vorhandenen regionalen oder überregionalen Anforderungen. Die Errichtung und den Betrieb von H₂-Speichern (alternativ Speicheranlagen) ist abhängig von der vorhandenen Lagermenge an Wasserstoff, der Art der Speicherung und ob zu einem Elektrolyseur im industriellen Maßstab im Sinne der IED-Richtlinie ein räumlicher und betriebstechnischer Zusammenhang besteht. Zudem ist zu unterscheiden, ob es sich um oberirdische Speicher, unterirdische Speicher oder die Umnutzung von Erdgasspeichern handelt.

Für H₂-Speicher und -leitungsgebundene Infrastruktur wird auf den [HyExperts II – Region Chemnitz, S. 44 ff.](#) verwiesen.

Die Errichtung einer Trailer Abfüllanlage fällt grundsätzlich unter Gasabfüllanlagen, worunter auch H₂-Tankstellen fallen. Dies wird ausführlich in [Kapitel 6.1.1](#) behandelt, weshalb hier nicht weiter darauf eingegangen wird.



+6.2

Regulatorische und marktwirtschaftliche Treiber entlang der H₂-Wertschöpfungskette

An dieser Stelle werden ausgewählte Dekarbonisierungstreiber für die H₂-Erzeugung, H₂-Infrastruktur sowie für den Verkehrssektor in [Tabelle 9](#) aufgelistet. Dabei werden jeweils zwischen regulatorischen und marktwirtschaftlichen Treibern unterschieden, Adressaten benannt und die einzelnen Treiber beschrieben.

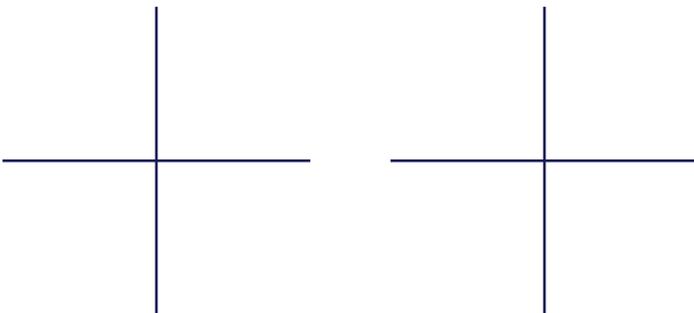
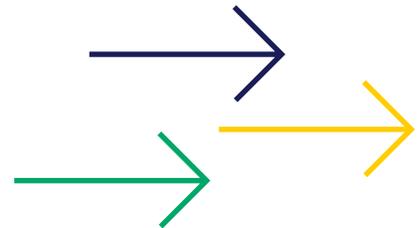


Tabelle 8: Regulatorische und marktwirtschaftliche Dekarbonisierungstreiber für die H₂-Erzeugung und H₂-Infrastruktur

Regulatorische Treiber	Adressat	Kurzbeschreibung
Wasserstoffbeschleunigungsgesetz	Energieunternehmen/ Industrieunternehmen/ Infrastrukturbetreiber	Das Wasserstoffbeschleunigungsgesetz zielt auf den beschleunigten Ausbau der H ₂ -Infrastruktur ab. Es vereinfacht Planungs-, Genehmigungs- und Vergabeverfahren für die Erzeugung, Speicherung und den Import von Wasserstoff. Es soll den Markthochlauf bis 2030 fördern
Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)	Energieunternehmen	Das EEG regelt die Einspeisung von erneuerbaren Energien in das Stromnetz. Es schafft einen Rahmen für Ausbauziele, Ausschreibungsmengen und Vergütungen von Erneuerbaren, welche durch die Länder und Kommunen umgesetzt werden.
Marktwirtschaftliche Treiber	Adressat	Kurzbeschreibung
Energiepreisstabilität	Energieunternehmen	Die Minimierung der Schwankungen der Energiepreise trägt für Unternehmen und schließlich auch für Verbraucher zur Planungssicherheit bei.
EE-Ressourcenverfügbarkeit	Energieunternehmen	Die Verfügbarkeit von EE in ausreichender Menge ist ein entscheidender Standortvorteil für die H ₂ -Erzeugung. Regionen mit reichlich Wind- oder Solarenergie können grünen Wasserstoff kosteneffizient erzeugen, was die Attraktivität für Investitionen in lokale H ₂ -Projekte erhöht.
Versorgungssicherheit	Energieunternehmen	Versorgungssicherheit durch Dezentralisierung und Diversifizierung reduziert die Abhängigkeit einzelner Energiequellen und -lieferanten. Der Ausbau dezentraler Energieerzeugung (z.B. durch EE) und die Diversifizierung der Energiequellen minimiert das Risiko für Versorgungsengpässe und stärkt die Resilienz der Energiesysteme.
Resilienz ggü. Energiekrisen	Energieunternehmen/ Regierung	Die Diversifizierung der Energiequellen, der Ausbau von EE und die Schaffung von strategischen Reserven sind Maßnahmen, um die Wirtschaft vor den Auswirkungen von Energiekrisen zu schützen. Es gilt, die Abhängigkeit von einzelnen Energiequellen zu reduzieren und die Stabilität der eigenen Energieversorgung zu gewährleisten.
Netzdienlichkeit	Energieunternehmen/ Stromnetzbetreiber	Elektrolyseure fördern die Integration erneuerbarer Energien, indem sie Überschussstrom nutzen und so Netzüberlastungen vermeiden. Als flexible Verbraucher unterstützen sie das Lastmanagement durch gezielte Steuerung ihrer Betriebszeiten und können zusätzlich am Markt für Regelleistung partizipieren, um Frequenzschwankungen auszugleichen.

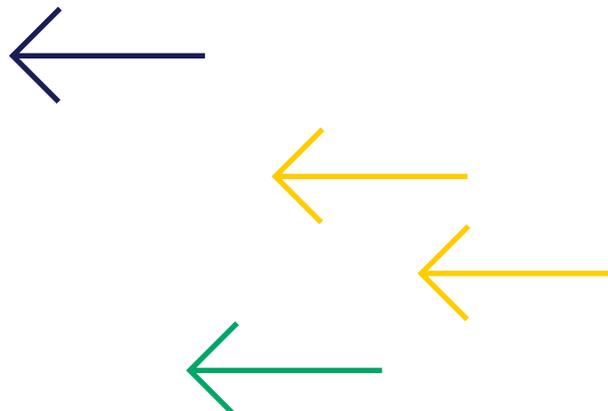
Nachfolgend sind die Treiber zur Förderung von Wasserstoff im Verkehrssektor dargestellt

Tabelle 9: Regulatorische und marktwirtschaftliche Dekarbonisierungstreiber im Mobilitätssektor (Quelle: HyExperts II – HyNATuRe Reutlingen, S. 27 ff.)

Regulatorische Treiber	Adressat	Kurzbeschreibung
CO ₂ -Flottengrenzwerte	Fahrzeughersteller	Die EU legt Grenzwerte für CO ₂ -Emissionen für die Herstellung von Fahrzeugen fest. Diese sehen für Pkw eine Reduktion von 37,5% bis 2030 vor. Für Lkw (zunächst nur Schwerlastverkehr) werden Grenzwerte der CO ₂ -Emissionen für Flotten ab 2025 um 15% Reduktion im Vergleich zur Periode Juli 2019/Juni 2020 festgelegt; ab 2030 liegt die Reduktion im Vergleich zur Periode Juli 2019/Juni 2020 bei 30%.
Clean Vehicle Directive/ SaubFahrzeug BeschG	Fahrzeugbetreiber/öffentliche Auftraggeber	Die Richtlinie legt Mindestziele für die Fahrzeugbeschaffung von Pkw, LNF und SNF durch öffentliche Behörden und Unternehmen fest. Die Beschaffungsquote liegt bspw. für Busse ab August 2021 bei 45% für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben, ab 2026 liegt die Beschaffungsquote bei 65%. Die Hälfte davon muss komplett emissionsfrei sein (nur Batterie oder BZ-Fahrzeuge).
Alternative Fuel Infrastructure Regulation (AFIR)	Öffentliche Auftraggeber	Bis 2030 sind H ₂ -Tankstellen zu errichten, die folgende Bedingungen und Anforderungen erfüllen: <ul style="list-style-type: none"> • Mindestens eine öffentlich zugängliche H₂-Tankstelle an jedem »städtischen Knoten« • Mindestens eine öffentlich zugängliche H₂-Tankstelle im TEN V Gesamtnetz (alle Bundesautobahnen) alle 200 km, innerhalb einer Fahrdistanz von maximal 10 km von der Abfahrt • Mindestkapazität von 1 t/d und mindestens eine 700 bar-Zapfsäule • Die Tankstellen sollen für leichte und schwere Nutzfahrzeuge ausgelegt sein
Umweltzonen & Fahrverbotszonen	Fahrzeugbetreiber	Umweltzonen sind urbane Gebiete, in die nur Fahrzeuge einfahren dürfen, die bestimmte Abgasstandards erfüllen. Fahrzeuge müssen mit einer Umweltplakette gekennzeichnet sein, die ihre Schadstoffklasse anzeigt. Ziel ist die Luftreinhaltung, indem emissionsstarke Fahrzeuge aus den Umweltzonen ausgeschlossen werden.

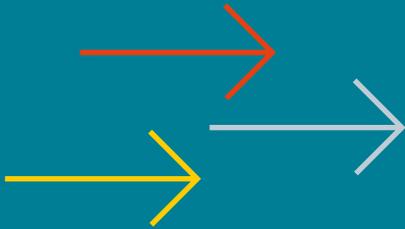
Tabelle 9: Regulatorische und marktwirtschaftliche Dekarbonisierungstreiber im Mobilitätssektor (Quelle: HyExperts II – HyNATuRe Reutlingen, S. 27 ff.)

Marktwirtschaftliche Treiber	Adressat	Kurzbeschreibung
Ausweitung EU-Emissionshandel (EHS) auf Verkehr	Kraftstoffbezieher	Im April 2023 haben sich das EU-Parlament und der Rat der EU über eine Überarbeitung des EHS geeinigt. Hier soll u. a. ein separates EHS für die Sektoren Gebäude und Verkehr entwickelt werden, welches den Emissionshandel in den beiden Sektoren beschreibt und dazu führen soll, die Reduzierung von CO ₂ -Emissionen in den Sektoren schneller voranzubringen. Die genaue Umsetzung dieser Ausweitung ist noch nicht ausgearbeitet. Es kann davon ausgegangen werden, dass es einen Gesamtkostenvorteil für CO ₂ -freie Antriebe geben wird.
THG-Minderungsquote (BlmSchG)	Kraftstoffinverkehrbringer	Die Treibhausgas-Minderungs-Quote (THG-Quote) verpflichtet Unternehmen, die Kraftstoff in Verkehr bringen, die beim Verbrennen dieser Kraftstoffe entstehenden Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Die THG-Quote wird bis 2030 auf 25 % ansteigen.
Erlass der Kfz-Steuer	Fahrzeugbetreiber	Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) oder andere schadstofffreie Fahrzeuge (wie H ₂ -Fahrzeuge) sind für einen bestimmten Zeitraum von der Kfz-Steuer befreit. In Deutschland gilt dies bei erstmaliger Zulassung bis Ende 2025 für maximal zehn Jahre. Dies fördert den Kauf und die Zulassung emissionsfreier Fahrzeuge.
Befreiung von der Lkw-Maut	Fahrzeugbetreiber	Für bestimmte emissionsfreie Fahrzeuge (BEV und H ₂ -Lkw) gilt eine Befreiung von der Lkw-Mautpflicht bis Ende 2025, um den Einsatz umweltfreundlicher Technologien im Güterverkehr zu fördern und CO ₂ -Emissionen zu reduzieren. Nach 2025 gilt eine Mautbegünstigung (siehe Factsheet Lkw-Maut S. 56)



+⁷

Fördermöglichkeiten



Die (Teil-)Finanzierung von Wasserstoffvorhaben kann durch die Inanspruchnahme von öffentlichen Fördergeldern erfolgen. Hierzu stehen eine Vielzahl von Förderoptionen auf europäischer, nationaler sowie regionaler oder lokaler Ebene zur Verfügung. Die Vergabe von öffentlichen Fördermitteln unterliegt in jedem Fall den Regeln des europäischen Binnenmarktes, welcher Wettbewerbsverzerrungen durch nationale fiskalpolitische Maßnahmen ausschließt. Eine weitere Einordnung der Grundsätze und Spielräume von Förderprogrammen können Sie dem [HyStarter II Abschlussbericht, S. 36 ff.](#) entnehmen.

Nachfolgend werden Pfade aufgezeigt, Fördermöglichkeiten für das eigene H₂-Vorhaben zu identifizieren. Dies umfasst Websites, Beratungsangebote und Datenbanken, welche bei der Suche nach geeigneten Förderinstrumenten unterstützen können.

Beratungsangebote:

- [Die Lotsenstelle Wasserstoff](#) ist ein Serviceangebot der Bundesregierung. Förderinteressierte Unternehmen und Institutionen können sich hier telefonisch oder per Mail an erfahrene Förderexperten wenden und sich hinsichtlich eigener Vorhaben gezielt zur Förderung von Innovationen und Investitionen im H₂-Bereich beraten lassen.
- [Der Förderfinder der NOW](#) zeigt aktuelle Förderrichtlinien auf und informiert bei neuen Förderaufrufen. Zusätzlich bietet die NOW Beratungsangebote zu von ihnen betreuten Förderprogrammen an, die Kontaktdaten der Ansprechpartner finden Sie in den jeweiligen Links.



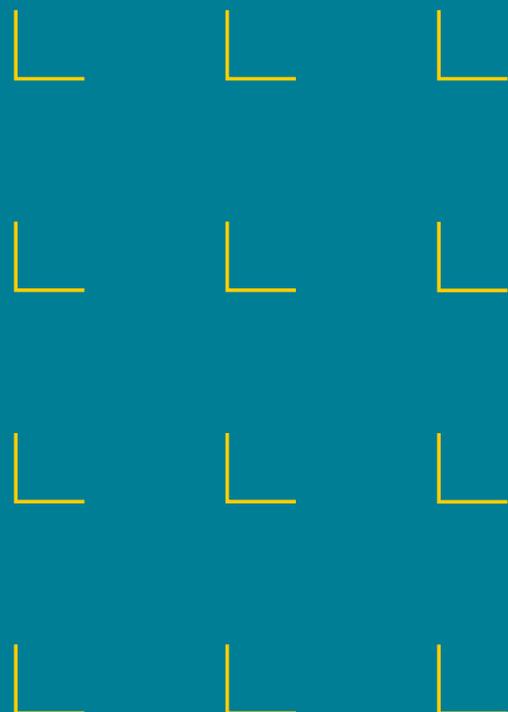
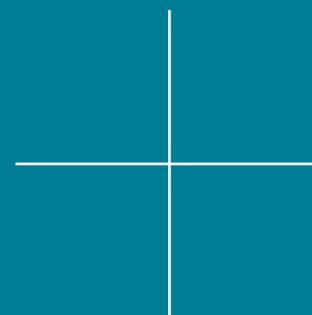
Förderdatenbanken:

- [Der Projektfinder der NOW](#) fungiert als Datenbank mit Suchfunktion, in welcher man nach zahlreichen Förderprogrammen, Fördergegenständen, Sektoren, Anwendungsbereichen und Energieträgern filtern kann – darunter auch Wasserstoff.
- [EnArgus](#) ist ein Internetportal des BMWK, das über laufende und abgeschlossene Vorhaben zur Energieforschung informiert. Über den Reiter »Förderdaten« können Themen im Energieforschungsprogramm des Bundes, Projektförderungen, institutionelle Förderungen sowie begleitende Maßnahmen recherchiert werden, die als Blaupause für eigene Vorhaben dienen können.
- [Der Überblick der DIHK über Bundesförderprogramme zum Wasserstoff](#) enthält eine Auflistung und die Eckdaten allgemeiner Programme. Detaillierte Informationen finden sich dazu in der [Förderdatenbank des Bundes](#).
- [Der Hydrogen Public Funding Compass der EU-Kommission](#) ist ein weiterer Online Leitfaden, um öffentliche Finanzierungsquellen für H₂-Projekte zu ermitteln. Hier finden sich EU Finanzierungsprogramme und -Fonds und nationale Förderprogramme auf EU-Länderebene.
- [Die Webseite des Innovation Funds](#) ist ein in zentraler Zugangspunkt zu Fördermöglichkeiten und Informationen zu laufenden Projekten auf EU-Ebene. Der Innovation Fund speist sich aus den Mitteln des europäischen Emissionshandels.



Förderprogramme:

- [Das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie \(NIP\)](#) des BMDV richtet sich an Forschung und Entwicklung und insbesondere seit seiner Fortführung 2016 auch an Projekte und Vorhaben, die die Markteinführung unterstützen. Dieses Bundesförderprogramm des BMDV verfolgt das Ziel, die H₂-Mobilität zur Marktreife zu bringen. Der Regionenwettbewerb [HyLand – Wasserstoffregionen in Deutschland](#) ist ein vom BMDV ausgerichteter Wettbewerb, welcher aus dem NIP II mittlerweile in der zweiten Runde Regionen dabei unterstützt, Konzepte mit H₂-Bezug zu initiieren und umzusetzen.
- [Das Horizon Europe Programme der EU-Kommission](#) ist ein weiteres Förderprogramm der EU für Forschung und Innovation. Über das [EU Funding & Tenders Portal](#) werden zahlreiche Förderaufrufe ausgeschrieben und die Inhalte der einzureichenden Förderanträge beschrieben.
- Über die [Connecting Europe Facility \(CEF\)](#) wird die Entwicklung von Transportinfrastrukturen unterstützt. Ein Fokus liegt hier auf grenzübergreifenden Infrastrukturen, darunter auch Wasserstoff-Infrastrukturprojekte.





Links, Datengrundlagen und Tools



Erzeugungs- und Versorgungspotenziale:

- Marktstammdatenregister (aktuelle EE-Leistung): [MaStR](#)
- Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt), 2023. Emissionshandelspflichtige Anlagen in Deutschland 2022, [Anlagenliste](#) (abgerufen am 11.07.2024)

Erzeugungskonzepte und Gesteungskosten:

- EWI Global PtX Cost Tool: [EWI H₂-Import Kosten tool](#) (abgerufen am 12.08.2024)
- AGORA, umlaut energy (Part of Accenture) LCOH tool: [Levelised Cost of Hydrogen Calculator \(agora-energie-wende.org\)](#) (abgerufen am 12.08.2024)
- Übersicht Gesteungskosten-Tools: [HyExperts II – Landkreis Wartburgkreis, S. 16 f.](#)
- EEX Wasserstoffpreisindex: [EEX Index](#)

Infrastrukturkonzepte:

- Prognose Pipeline-Netzentgelte: [HyExperts Wartburg – Hainich, S. 139](#)

H₂-Tankstellen und Mobilitätsanwendungen:

- NOW Tool für die Technologieauswahl bei Bussen für den ÖPNV: [E-Bustool](#)
- Marktentwicklungen klimafreundliche Nutzfahrzeuge, [www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de](#)
- NOW Einführung H₂-Busse im ÖPNV, 2021: [Broschüre Wasserstoffbusse](#) (abgerufen am 12.08.2024)

Regulatorik:

- NOW Gesetzeskarte Wasserstoff (2023): [NOW_Gesetzeskarte-Wasserstoff.pdf \(now-gmbh.de\)](#) (abgerufen am 12.08.2024)
- Bundesnetzagentur Wasserstoff: [Bundesnetzagentur – Wasserstoff](#)
- Nationale Wasserstoffstrategie: [Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie](#)
- DIHK-Faktenpapier Wasserstoff: [2020_DIHK_Broschüre_Wasserstoff_A4_final.indd](#) (abgerufen am 12.08.2024)
- EU-KOM Definition erneuerbarer Wasserstoff: [EU-Kommission legt Definition von erneuerbarem Wasserstoff vor – Europäische Kommission \(europa.eu\)](#)
- Stellungnahmen [Nationaler Wasserstoffrat](#)



+ Anhang



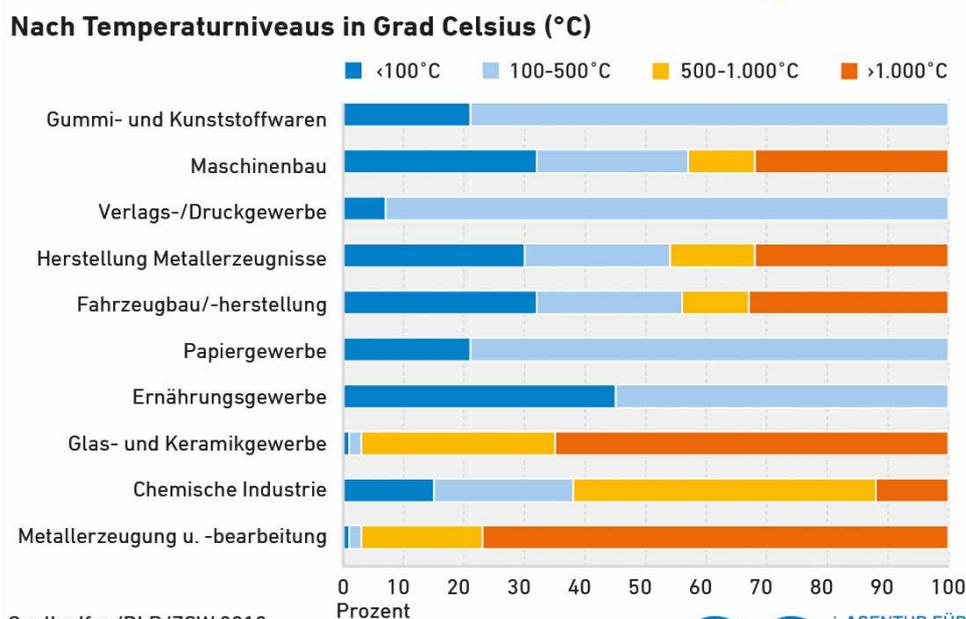


Bedarfe in der Industrie

Im Folgenden werden zwei Methoden zur Prognose von H₂-Bedarfen in der Industrie präsentiert: Der quantitative Top Down Pfad und der qualitative Bottom Up Pfad. Vor der Beschreibung der beiden Methoden wird zunächst ein theoretischer Rahmen für die Bedarfsprognose beschrieben.

Bei Industrieprozessen ist im Wesentlichen das jeweilige Temperaturniveau ausschlaggebend für den H₂-Einsatz, da Hochtemperaturprozesse aufgrund hoher Leistungsdichten nicht – oder nur unter hohem Aufwand – elektrifizierbar sind. Daher wird nach der Identifikation der Unternehmen empfohlen, diese nach deren Branchen zu kategorisieren, da der industrielle Wärmebedarf gemäß [Abbildung 20](#) nach Wirtschaftszweigen variiert [Agentur für Erneuerbare Energien 2017]. Zudem müssen nur die Energieanteile durch Wasserstoff ersetzt werden, welche auf fossilen Brennstoffen basieren. [HyExperts II – Region AachenPLUS, S. 45 ff.](#)

Abbildung 20: Industrieller Wärmebedarf nach Wirtschaftszweigen (Quelle: [Agentur für Erneuerbare Energien 2017])



Quelle: Ifeu/DLR/ZSW 2010
 Stand: 6/2017
 © 2017 Agentur für Erneuerbare Energien e.V.



Vorgehen bei der Prognose von H₂-Bedarfen in der Industrie

Schaffung der Datenbasis:

- Erfassung von Unternehmen über Registerlisten (z. B. über die regionalen IHKs)
- Identifikation größter CO₂-Emittenten (z. B. Liste emissionshandelspflichtiger Anlagen)

In der Industrie eignet sich Wasserstoff – neben stofflichem Einsatz – primär zur Bereitstellung von Prozesswärme. Dabei sind die Prozesswärmeanteile für die Substitution durch Wasserstoff zu fokussieren, welche durch fossile Energieträger, wie etwa Erdgas, entstehen. Es bietet sich an, die größten CO₂-Emittenten zu identifizieren, da hier die größten Dekarbonisierungspotenziale vorliegen. Diese sind beispielsweise in der Liste emissionshandelspflichtige Anlagen in Deutschland 2022 aufgeführt [DEHSt 2023].

- Einteilung der Unternehmen in Industriezweige (z. B. Papier-, Glas- oder Stahlindustrie)

Prognose der H₂-Bedarfe:

- Ermittlung des potenziellen H₂-Bedarfs zur Substitution der fossilen Energieanteile:
Fossile Anteile des betriebsabhängigen Energiemix, z. B. Erdgas und Kohle.
- Erstellung einer Hochlaufprognose für H₂-Bedarfe nach Stützjahren

Top Down Pfad:

Hier erfolgt die quantitative Prognose der H₂-Bedarfe. Es wird angenommen, dass diese den zu substituierenden (fossilen) Energiebedarfen entsprechen, welche wiederum abhängen von:

- Dem genutzten Prozesswärmeniveau
- Dem jeweiligen CO₂-Ausstoß
- Den Defossilisierungszielen der Bundesregierung [Umweltbundesamt 2023]³

- Differenzierung der jeweiligen Industriezweige nach Prozesswärmeniveaus

Siehe unterschiedliche Wärmebedarfe nach Industriezweigen [Agentur für Erneuerbare Energien 2017].

- Ermittlung der fossilen Energiebedarfe bzw. Energieanteile

aus der aktuellen Liste emissionshandelspflichtiger Anlagen in Deutschland [Umweltbundesamt 2023].



³ Zur Ableitung der mit der Zeit steigenden H₂-Bedarfe, welche sich aus der Senkung der THG Emissionen ergeben.

Bottom Up Pfad:

Hier erfolgt die qualitative Befragung regionaler Stakeholder. Der Pfad kann ergänzend zum Top Down Pfad (bspw. als Validierung der quantitativen Bedarfsprognosen) oder als alleinige Methode durchgeführt werden. [HyExperts I – Region Nordhessen, S. 91 ff.](#)

- ➔ **Erstellung eines Online Fragebogens zur Abfrage erforderlicher Daten [HyExperts II – Landkreis Wartburgkreis, S. 184](#)**

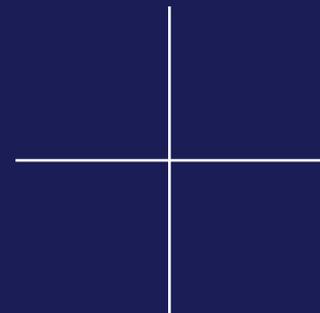
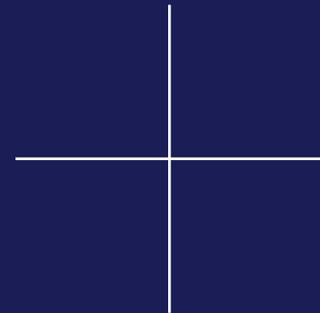
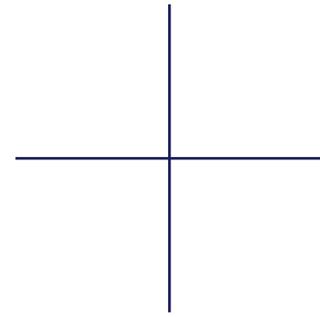
z. B. Energie- und Wärmebedarfe, Energiemix, Anteil fossiler Brennstoffe im Gesamtenergieverbrauch, ...

- ➔ **Kontaktierung der infrage kommenden Stakeholder:**

Verteilung der Online Fragebögen

- ➔ **Auswertung der Fragebögen:**

z. B. Produkte, Produktionsprozesse und -volumina





Entwicklung von Vision und Roadmap

Die Entwicklung großer H₂-Projekte, wie etwa der Initiierung einer H₂-Region, beginnt bei der Einrichtung eines koordinierenden Netzwerkmanagements, beispielsweise in Form eines Konsortiums. Dieses wirbt engagierte Stakeholder, etabliert ein regionales Akteursnetzwerk und koordiniert sämtliche Prozesse, darunter die Formulierung einer gemeinsamen Vision. Die Vision bildet die Basis und das Zielbild für alle Diskussionen und Aktivitäten des Akteursnetzwerks und ist somit Ziel und Zweck der Roadmap, welcher als operativer Zeitplan zur Erreichung des Gesamtziels unter Erreichung von Meilensteinen verstanden wird [HyStarter Ergebnisbericht, S. 52 & 54-55](#).

→ **Schaffung einer Ausgangsbasis: Konsens über Wissen, Motivation & Projekte**

Für die Entwicklung der gemeinsamen Vision ist es von zentraler Bedeutung, die Ausgangslage im regionalen Kontext zu verstehen. Das Verständnis über diese Einflussfaktoren kann über vertiefte Interviews mit den Stakeholdern geschaffen werden. Zentrale Aspekte der Interviews können dem [HyStarter Ergebnisbericht, S. 52](#) entnommen werden, u. a.:

- Regionale Strukturdaten erheben und interpretieren
- Politische Beschlüsse und Ziele kennen
- Die regionale Expertise (Interessen, Erfahrungen, Aktivitäten und Handlungsdruck im Akteursnetzwerk) verstehen
- Identifikation bereits vorhandener Projekte und Ideen



→ **Formulierung der Vision**

Auf Grundlage der erarbeiteten Ausgangsbasis können die Vision – und die damit einhergehenden Ziele – in einem oder mehreren Workshops ausgearbeitet und prägnant zu einem Vision Statement formuliert werden. Leitfragen finden sich hierzu in [HyStarter Ergebnisbericht, S. 53](#).

→ **Ableitung der strategischen Ziele**

Basierend auf der Vision werden die gemeinsamen strategischen Ziele abgeleitet. Diese sind in kurz-, mittel- und langfristig zu unterteilen [HyExperts I – H₂-Modellregion Saarland \(Wasserstoffstrategie, S. 7\)](#). Besonders gewichtige Zwischenziele werden als Meilensteine bezeichnet und in der Roadmap gesondert hervorgehoben.

→ **Zuordnung der Ziele zu Handlungsfeldern**

Die strategischen Ziele werden inhaltlichen Kategorien (sog. Handlungsfeldern) zugeordnet, wie Erzeugung, Infrastruktur oder Nachfrage. Daraus werden wiederum konkrete Umsetzungsmaßnahmen abgeleitet. Die Handlungsfelder variieren je nach Ausrichtung und Schwerpunkt des regionalen H₂-Ökosystems. [HyExperts I – HyExperts I – H₂-Modellregion Saarland \(Wasserstoffstrategie, S. 8\)](#). Für die Definition der Handlungsfelder wird auf Leitfragen in [HyStarter Ergebnisbericht, S. 53](#) verwiesen.

➔ **Entwicklung konkreter Maßnahmen**

Um die strategischen Ziele der Handlungsfelder zu erreichen, müssen konkrete Maßnahmen entwickelt werden. Diese gilt es, analog zu den jeweiligen Zielen, in kurz-, mittel- und langfristig zu gliedern. [HyExperts I – HyExperts I – H2-Modellregion Saarland \(Wasserstoffstrategie, S. 9 ff.\)](#)

➔ **Bewertung der Maßnahmen**

Die definierten Maßnahmen müssen zur Sicherung der Qualität und Wirksamkeit nach ökonomischen und ökologischen Kennwerten validiert werden [HyExperts I – HyExperts I – H2-Modellregion Saarland \(Wasserstoffstrategie, S. 13\)](#). Diese sind, je nach Projekt, individuell und werden im Akteursnetzwerk festgelegt.

➔ **Skizzierung der regionalen Roadmap**

In der Roadmap werden Schritte zur Umsetzung der Ziele in der Zeit bis zur Zielerreichung beschrieben und Verantwortlichkeiten festgelegt. Beachtet werden dafür:

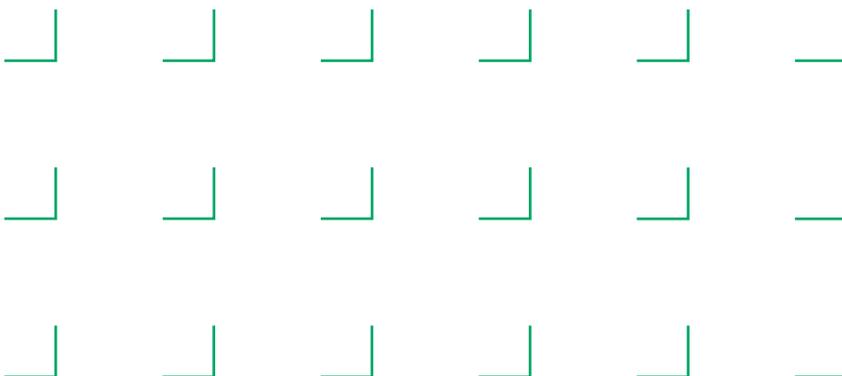
- Die Marktverfügbarkeit der geplanten Technologien
- Die Annahmen und Erfahrungen der Akteure zur Dauer der Planungs- und Genehmigungszeit
- Die erwarteten Förderaufrufe
- Die gegenseitigen Abhängigkeiten der Initialprojekte

Bei der Entwicklung der Roadmap sind die Schritte, Projekte und Meilensteine zu priorisieren, welche hinsichtlich des Gesamtkonzeptes bzw. der Vision besonderes relevant sind:

- Die Bedürfnisse und der Handlungsdruck der Akteure
- Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit als relevanter Akzeptanzfaktor

Die Roadmap quantifiziert Meilensteine und Umsetzungspläne und benennt diese ausreichend konkret, um Fortschritte während der Umsetzung überprüfen zu können.

Die Erarbeitung der Roadmap dient der gegenseitigen Versicherung der Stakeholder, sich gemeinsam an der Umsetzung und Zielerreichung zu beteiligen. [HyStarter Ergebnisbericht, S. 54-55](#). Aus Komplexitäts- bzw. Übersichtsgründen bietet es sich an, neben einer übergreifenden Gesamt-Roadmap, detaillierte Teil Roadmaps für die einzelnen Handlungsfelder zu erstellen, wie z. B. bei [HyExperts II – AachenPLUS, S. 108 ff.](#)



Abkürzungsverzeichnis

AEM	Anionenaustauschmembran Elektrolyse	IHK	Industrie- und Handelskammer
AEL	Alkalische Elektrolyse	Kfz	Kraftfahrzeug
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen	LCOH	Levelized Cost of Hydrogen (Kalkulation der H ₂ -Gestehungskosten)
BauO	Bauordnung	Lkw	Lastkraftwagen
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz	LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung	MWel	Megawatt elektrisch
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz	NFZ	Nutzfahrzeug
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes	O&M	Operations and maintenance
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr	OPEX	Operational Expenditures (Betriebskosten)
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz	ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
BZ	Brennstoffzelle	PEM	Protonenaustauschmembran Elektrolyse
CAPEX	Capital Expenditures (Investitionskosten)	Pkw	Personenkraftwagen
DEHSt	Deutsche Emissionshandelsstelle	PPA	Power Purchase Agreement (Stromkaufvereinbarung)
dena	Deutsche Energieagentur	PV	Photovoltaik
DIHK	Deutsche Industrie- und Handelskammer	SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
DN	Nennweite	TCO	Total Cost of Ownership (Gesamtkosten eines Produkts während des Lebenszyklus)
EE	Erneuerbare Energien	TEN-V	Transeuropäische Netze – Verkehr
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz	THG	Treibhausgas
EHS	Emissionshandelssystem	UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
GIS	Geo-Informationen-System	UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeits- prüfung
SOFC	Hochtemperaturelektrolyse		
IED	Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen		



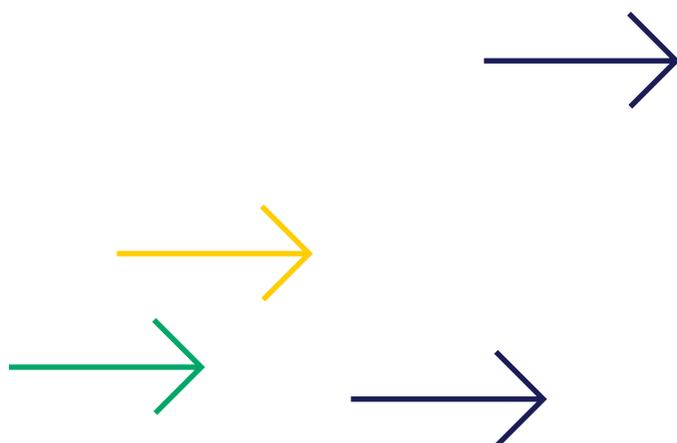
Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: HyLand-Kategorien im Überblick	8
Abbildung 2: Inhaltliche Fokussierung der HyStarter und HyExperts Projekte	9
Abbildung 3: Marktwirtschaftliche und regulatorische Treiber entlang der H ₂ -Wertschöpfungskette	12
Abbildung 4: Beispiele von Technologie Deep-Dives, Best Practice Beispielen und Herausforderungen inkl. Lösungsansätzen	18
Abbildung 5: Best Practice: PV-Erzeugungskapazitäten	23
Abbildung 6: Icons mit H ₂ -Mobilitätsanwendungen	25
Abbildung 7: Durchschnittliche H ₂ -Verbräuche nach Fahrzeugklassen (Quelle: [NOW 2023])	27
Abbildung 8: Best Practice: Berechnung H ₂ -Bedarfe in der Mobilität	33
Abbildung 9: Beispielhafte H ₂ -Gestehungskosten in der Wasserelektrolyse (Quelle: HyExperts II – HyNATuRe Reutlingen, S. 60)	35
Abbildung 10: Best Practice: Wirtschaftlichkeit Elektrolyse	36
Abbildung 11: Übersicht verfügbarer H ₂ -Distributionstechnologien	37
Abbildung 12: Vergleich der Transportoptionen nach Stoffstrom und Distanz (Quelle: HyExperts II – HyNATuRe Reutlingen, S. 17)	41
Abbildung 13: Best Practice: H ₂ -Pipelinetransport	45
Abbildung 14: Best Practice: H ₂ -Trailer Konzepte	48
Abbildung 15: Übersicht von Betreibermodellen von H ₂ -Tankstellen (Quelle: [e-mobil BW 2023])	52
Abbildung 16: Best Practice: Tankstellenlayout	59
Abbildung 17: Exemplarische Auswertung Störereignis-Analyse (Quelle: HyExperts II – Landeshauptstadt Mainz, S. 248)	60
Abbildung 18: Beispiel Betreibermodelle (Quelle: HyExperts I – MH ₂ Regio Frankfurt am Main, S. 121)	63
Abbildung 19: Generischer Ablauf eines Genehmigungsverfahrens (Quelle: HyExperts II – HyNATuRe Reutlingen, Anhang, S. 68)	68
Abbildung 20: Baugenehmigungsverfahren für eine H ₂ -Tankstelle mit und ohne vor-Ort-Elektrolyse (Quelle: HyExperts II – HyNATuRe Reutlingen, S. 33)	79



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der verfügbaren Elektrolysetechnologien nach aktuellem Stand der Technik	30
Tabelle 2: Geschätzte Kosten für den Neubau bzw. die Umwidmung von H ₂ -Fernleitungen (Quelle: [European Hydrogen Backbone 2022])	39
Tabelle 3: Vor- und Nachteile der Versorgungsmodelle	43
Tabelle 4: Vergleich einer stationären und mobilen Tankstelle	47
Tabelle 5: Technische Parameter von Brennstoffzellenfahrzeugen (Quelle: HyExperts II – HyNATuRe Reutlingen, S. 21, [NOW 2023])	57
Tabelle 6: Übersicht über die Genehmigungsverfahren für H ₂ -Anlagen (Quelle: HyExperts II – Region Chemnitz S. 35 ff.)	64
Tabelle 7: Beteiligte Stakeholder für die jeweiligen Schritte im Genehmigungsverfahren (Quelle: [ikem 2023])	65
Tabelle 8: Regulatorische und marktwirtschaftliche Dekarbonisierungstreiber für die H ₂ -Erzeugung und H ₂ -Infrastruktur	71
Tabelle 9: Regulatorische und marktwirtschaftliche Dekarbonisierungstreiber im Mobilitätssektor (Quelle: HyExperts II – HyNATuRe Reutlingen, S. 27 ff.)	72



Literaturverzeichnis

- Agentur für Erneuerbare Energien e. V., 2017** Industrieller Wärmebedarf nach Wirtschaftszweigen, <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/industrieller-waermebedarf-nach-wirtschaftszweigen>, abgerufen am 12.08.2024.
- BMUV, 2023.** Referentenentwurf des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Dritte Verordnung zur Änderung der Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/20._Lp/4_bimschv_elektrolyseure/Entwurf/4bimschv_elektrolyseure_refe_bf.pdf, abgerufen am 14.08.2024
- Bundesregierung, 2024.** 20/11899 – Gesetzentwurf: Entwurf eines Gesetzes zur Beschleunigung der Verfügbarkeit von Wasserstoff und zur Änderung weiterer rechtlicher Rahmenbedingungen für den Wasserstoffhochlauf sowie zur Änderung weiterer energierechtlicher Vorschriften, Status: 21.06.2024. <https://dserver.bundestag.de/btd/20/118/2011899.pdf>, abgerufen am 14.08.2024
- dena, 2023.** STUDIE: Geschäftsmodelle für dezentrale Wasserstoffkonzepte – Zeit zum Nachsteuern, Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena), 2023. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2023/STUDIE_Geschaeftsmodelle_fuer_dezentrale_Wasserstoffkonzepte_-_Zeit_zum_Nachsteuern.pdf, abgerufen am 14.08.2024
- Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt), 2023** Emissionshandelspflichtige Anlagen in Deutschland 2022, https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/anlagenlisten/2021-2030/2022.pdf?__blob=publicationFile&v=2, abgerufen am 12.08.2024.
- e-mobil BW, 2023.** H₂-Infrastruktur für Nutzfahrzeuge im Fernverkehr. Aktueller Entwicklungsstand und Perspektiven, e-mobil BW, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), DLR, 2023. https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Studie_H2_Infrastruktur_fuer_Nutzfahrzeuge_im_Fernverkehr.pdf, abgerufen am 14.08.2024
- European Hydrogen Backbone, 2022.** European Hydrogen Backbone. A European hydrogen infra-structure vision covering 28 countries, ehb, April 2022. <https://ehb.eu/files/downloads/ehb-report-220428-17h00-interactive-1.pdf>, abgerufen am 14.08.2024
- Fraunhofer, 2021.** Wasserstoff-Masterplan für Ostdeutschland, Fraunhofer IKTS, Fraunhofer IEG, Fraunhofer ISI, 2021. <https://www.ieg.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/2021/wasserstoff-masterplan-ostdeutschland.html>, abgerufen am 14.08.2024
- Hausding, 2024.** Beschleunigungsgesetz für den Wasserstoffhochlauf beraten, <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2024/kw26-de-wasserstoff-1008410>, abgerufen am 12.08.2024.
- ifeu, 2022.** Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030, ifeu, PTV Transport Consult, 2022. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2022-02-04_-_My_eRoads_-_Potentiale_Lkw-Antriebs-technologien_-_final_01.pdf, abgerufen am 14.08.2024
- ikem, 2023.** HyExpert – H₂VL: Genehmigungsleitfaden für Wasserstoffherzeugungsanlagen, Eschweiler J., ikem, 2023. https://usercontent.one/wp/www.ikem.de/wp-content/uploads/2023/10/HyExpert_H2VL_Genehmigungsleitfaden-1.pdf?media=1723128043, abgerufen am 14.08.2024
- LBST, 2023.** Maritime Wasserstoffanwender und ihr Anteil am H₂-Bedarf Deutschlands, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Ingenieurbüro für Schiffstechnik – Beratende Ingenieure (IfS), 2023. <https://dmz-maritim.de/wp-content/uploads/2023/08/Studie-Wasserstoffanwender-2023.pdf>, abgerufen am 14.08.2024
- NOW, 2023.** Factsheet HyLand, https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2023/08/NOW_Factsheet-HyLand-I.pdf, abgerufen am 12.08.2024.
- Umweltbundesamt, 2023.** Treibhausgas-minderungsziele Deutschlands, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-minderungsziele-deutschlands>, abgerufen am 12.08.2024.

now-gmbh.de

