



MACHBARKEITSSTUDIE: WASSERSTOFFREGION KIELREGION

ENDBERICHT

Gefördert durch:



Koordiniert durch:



Projektträger:



KielRegion

Auftraggeber

Umweltschutzamt, Landeshauptstadt Kiel

Holstenstraße 104

24103 Kiel

stellvertretend für Kiel, Kreis Plön, Kreis Rendsburg-Eckernförde

Projektleitung

KielRegion GmbH

Martin Kliesow

Fördermittelgeber

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Fördermaßnahme

Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) Phase II, im Rahmen des HyLand-Programms der Kategorie HyExpert, www.hy.land

Auftragnehmerinnen

BBH Consulting AG

Nikolas Beneke, Dr. Hanno Butsch, Shaun Pick, Fabian Rottmann, David Siegler

Becker Büttner Held PartGmbH

Dr. Martin Altrock, Christine Kliem

EMCEL GmbH

Johannes Kuhn, Sarah Brock

GP JOULE Think GmbH & Co. KG

Hendrik Tödter, Maxim Blankschein, Alexander Deredder

motum GmbH

Jule Claussen

INHALTSVERZEICHNIS

1	Abkürzungsverzeichnis	4
2	Präambel	6
3	Einleitung und Aufgabenstellung	7
4	Methodik	8
4.1	Zieldefinition	8
4.2	Projektidentifikation	9
4.3	Regionales Konzept	10
5	Stakeholdermanagement	11
5.1	Zieldefinition	11
5.2	Projektidentifikation	12
5.3	Workshops, Seminare & Vernetzung	13
6	Wasserstofferzeugung	16
6.1	Erzeugung erneuerbarer Energie	16
6.2	Erzeugung erneuerbaren Wasserstoffs	17
6.2.1	Allgemeine Grundlagen	17
6.2.2	Konkrete Anwendungsbeispiele	24
7	Wasserstoffnutzung	29
7.1	Wasserstoffnutzung in Gewerbegebieten	29
7.1.1	Konkrete Anwendungsbeispiel HIP-Wellsee	30
7.1.2	Gewerbegebietsblaupause	35
7.1.3	Gewerbegebietstool	35
7.2	Wasserstoffnutzung im ÖPNV	36
7.2.1	Allgemeine Grundlagen	37
7.2.2	Konkrete Anwendungsbeispiele	40
8	Wasserstoffinfrastruktur	42
8.1	Allgemeine Grundlagen Wasserstofftankstelle	42
8.1.1	Komponenten einer Wasserstofftankstelle	43
8.1.2	Projektierung einer Wasserstofftankstelle	43
8.2	Konkrete Anwendungsbeispiele Wasserstofftankstelle	45
8.2.1	Standortanalyse Wasserstofftankstellen	45
8.3	Allgemeine Grundlagen H ₂ -Transportlogistik	48
8.3.1	Grundlagen Trailertransport	48
8.3.2	Grundlagen H ₂ -Kernnetz	49
8.4	Ableitungen H ₂ -Transportlogistik	50
9	Regionales Projekt	51
10	Handlungsempfehlungen und Roadmap	53
10.1	Kurz- und mittelfristige Handlungsempfehlungen	53
10.2	Langfristige Handlungsempfehlungen	55
11	Anhang	58

1 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BauNVO	Baunutzungsverordnung	GIS	Geografisches Informationssystem
BauO	Bauordnung	H₂	Chemische Formel für molekularen Wasserstoff
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung	HRS	Hydrogen Refueling Station (Wasserstofftankstelle)
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz	HV	Hochvolt
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz	KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
BRD	Bundesrepublik Deutschland	KVG	Kieler Verkehrsgesellschaft
BZ	Brennstoffzelle	KWK	Kraft-Wärme-Kopplung (Prozess zur gleichzeitigen Gewinnung von mechanischer Energie und nutzbarer Wärme)
CNG	Compressed Natural Gas (komprimiertes Erdgas)	LKW	Lastkraftwagen
CO₂	Chemische Formel für Kohlenstoffdioxid	LNF	Leichtes Nutzfahrzeug (3,5–12 t)
CVD	Clean Vehicle Directive	LNG	Liquefied Natural Gas (verflüssigtes Erdgas)
EE	Erneuerbare Energien	LPG	Liquefied Petroleum Gas (Autogas)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz	MHKW	Müllheizkraftwerk
EEG-Umlage	Instrument zur Finanzierung des Ausbaus erneuerbarer Energien, finanziert über einen Anteil der Strombezugskosten für Stromverbraucher	NEP	Netzentwicklungsplan Strom
FAQ	Frequently Asked Questions (Häufig gestellte Fragen)	NO_x	Stickstoffoxide
F&E	Forschung und Entwicklung	ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellen-elektrisches Fahrzeug)	PKW	Personenkraftwagen
		PV	Photovoltaik
		RED	Renewable Energy Directive (Erneuerbare-Energie-Richtlinie der europäischen Erneuerbare-Energien-Politik)

SNF	Schweres Nutzfahrzeug (> 12 t)
StörfallIV	Störfall-Verordnung
THG	Treibhausgas (Gase, die zum Treibhauseffekt [Temperaturerhöhung der Erdoberfläche] beitragen)
VKP	Verkehrsbetriebe Kreis Plön
CNG	Compressed Natural Gas (komprimiertes Erdgas)
CO₂	Chemische Formel für Kohlenstoffdioxid
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEG-Umlage	Instrument zur Finanzierung des Ausbaus erneuerbarer Energien, finanziert über einen Anteil der Strombezugskosten für Stromverbraucher
F&E	Forschung und Entwicklung
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellen-elektrisches Fahrzeug)
H₂	Chemische Formel von molekularem Wasserstoff
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
kW/MW	Kilowatt/Megawatt (Maßeinheit für Leistung)
kWh/MWh	Kilowattstunde/Megawattstunde (Maßeinheit für Energie)

KWK	Kraft-Wärme-Kopplung (Prozess zur gleichzeitigen Gewinnung von mechanischer Energie und nutzbarer Wärme)
LKW	Lastkraftwagen
LPG	Liquefied Petroleum Gas (Autogas)
LNF	Leichtes Nutzfahrzeug (3,5 - 12 t)
LNG	Liquified Natural Gas (verflüssigtes Erdgas)
MHKW	Müllheizkraftwerk
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PKW	Personenkraftwagen
PV	Photovoltaik
RED	Renewable Energy Directive (Erneuerbare-Energie-Richtlinie der europäischen Erneuerbare-Energien-Politik)
SNF	Schweres Nutzfahrzeug (> 12 t)
THG	Treibhausgas (Gase, die zum Treibhauseffekt [Temperaturerhöhung der Erdoberfläche] beitragen)
MHKW	Müllheizkraftwerk
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr

2 PRÄAMBEL

Dieser Endbericht stellt eine kompakte Zusammenfassung der Ergebnisse des HyExperts-Projektes dar. In den einzelnen Kapiteln wird deshalb auf ausführliche und langwierige Darstellungen der spezifischen Sachverhalte verzichtet. Für vertiefende Informationen wird an geeigneter Stelle auf die zugehörigen Anhänge verwiesen, die integraler Bestandteil des Endberichts sind. Dieses Vorgehen soll den gesamten Endbericht für ein breiteres Publikum zugänglich machen und den Lesefluss unterstützen. Zugleich stehen den interessierten Leser*innen mit den entsprechenden Anhängen Informationen zur Verfügung, um tiefer in die Methodik und Hintergründe zu den spezifischen Themen einzusteigen.

3 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

„In dem Zeitraum vom November 2019 bis Januar 2021 hat die KielRegion als eine von 9 HyStarter-Regionen den Grundstein für einen erfolgreichen Weg zu einer Wasserstoffregion gelegt. Als Ergebnis liegt eine ausführliche Wasserstoff-Potenzialanalyse vor. Die KielRegion verfügt über große Potenziale der regenerativen Energieerzeugung. Für die KielRegion bieten die Wasserstofftechnologien und -anwendungen daher die Chance, Klima- und Umweltschutz zu realisieren und regionale Wertschöpfungsketten zu schaffen. Dabei ist die Besonderheit der Region, dass insbesondere für die Produktion von grünem Wasserstoff ausreichend Kapazitäten in Form von bereits bestehenden oder noch zu errichtenden Erneuerbare-Energien-Anlagen vorhanden ist. Den verschiedenen Akteur*innen fehlen allerdings Partner*innen entlang der Wertschöpfungskette sowie ein mittel- und langfristiger Planungshorizont, um in dem Feld der Wasserstoffproduktion und -anwendungen aktiv tätig zu werden. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, hat das HyStarter-Kernteam die Lösungsansätze Verbundprojekt und H₂-Plattform entwickelt. Diese gilt es in der HyExperts-Phase zu konkretisieren und weiterzuentwickeln, um schnelle Fortschritte zu machen (vgl. <https://www.kielregion.de/zukunftsregion/wasserstoff/>). Die Untersuchungen im HyStarter-Projekt haben gezeigt, dass es bereits zahlreiche interessierte Akteur*innen in den einzelnen Wertschöpfungsbereichen gibt, die jedoch bisher noch unzureichend vernetzt sind und daher auch noch keine bereichsübergreifenden Projekte entwickelt haben. Mittelfristig muss in der KielRegion also ein eigener Wasserstoffmarkt etabliert werden, der Angebot und Nachfrage der Akteur*innen bedarfsgerecht zusammenführt.“¹

Im Rahmen des HyExperts-Projektes galt es, die im Rahmen von HyStarter entwickelten Konzepte zu überprüfen und, wenn möglich, in die Umsetzung zu führen. Die Überprüfung der Konzepte war essenziell, da sich der

regulatorische Rahmen und die gesamte Energiewirtschaft in der Zwischenzeit drastisch verändert haben. So ist die EEG-Umlage für Strom, der in Elektrolysen verwendet wird, mittlerweile weggefallen, es gibt klare Definitionen zur Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff und die Strombezugskosten haben sich durch den Krieg in der Ukraine und andere marktwirtschaftliche Effekte sehr dynamisch entwickelt. Diese und andere Entwicklungen führen dazu, dass Geschäftsmodelle, die 2021 noch interessant erschienen, neu überdacht werden mussten und 2023 ggf. nicht mehr umsetzbar sind.

Diesen Umständen entsprechend wurde in HyExperts eine erneute Abstimmung mit allen Beteiligten aus HyStarter durchgeführt und deren Projekte auf Aktualität, Umsetzungswahrscheinlichkeit und Erfüllung der Zielparameter hin überprüft. Darauf aufbauend wurden die potenziellen Projekte erneut bewertet, in Zusammenhang gesetzt und allen Akteur*innen das notwendige Wissen zur Projektentwicklung vermittelt.

¹ Leistungsbeschreibung für den Dienstleistungsauftrag: „WasserstoffRegion KielRegion“.

4 METHODIK

Das methodische Vorgehen unterteilt sich im wesentlichen in die drei Schritte Zieldefinition, Projektidentifikation und regionales Konzept. (Abbildung 1).

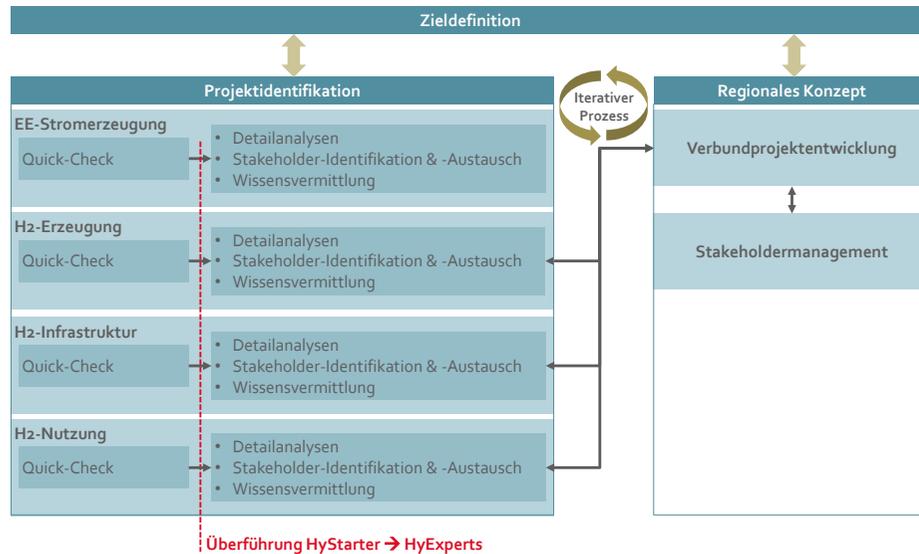


Abbildung 1: Schematische Darstellung des methodischen Vorgehens

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte kompakt dargestellt. Die jeweiligen Ergebnisse sind ab Kapitel 5 dargestellt.

4.1 ZIELDEFINITION

Die Zieldefinition aus der HyStarter-Phase wurde gemeinsam mit allen beteiligten Akteur*innen und dem Auftraggeber nachgeschärft. Im ersten Schritt ging es darum, die tatsächlichen Ziele der Wasserstoffaktivitäten klar herauszuarbeiten. In diesem Zusammenhang wurden die verschiedenen Ziele, die mit Wasserstoff erreicht werden, klar voneinander getrennt. Auf diese Weise entstand ein Zielekanon, der im Weiteren analysiert werden konnte. Ein beispielhafter Zielekanon ist in Abbildung 2 dargestellt. So kann eine einzelne

Aktivität, in diesem Fall der Besuch eines Fitnessstudios, einer Vielzahl von Zielen dienlich sein, z. B., um ein gutes Körpergefühl zu erlangen, um erfolgreiche Sportwettkämpfe zu bestreiten etc. Diese differenzierte Betrachtung der Wasserstoffaktivitäten ist eine wesentliche Grundlage, um einzelne Aktivitäten besser zu beurteilen.



Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Zielekanons inkl. Beispiel

Von besonderer Bedeutung war hierbei, Zielabhängigkeiten zu identifizieren und gegeneinander abzuwägen. So können sich verschiedene Ziele gegenseitig bestärken (komplementär), abschwächen (konkurrierend) oder gar nicht beeinflussen (indifferent) (vgl. Abbildung 3). Durch ein gutes Verständnis der Zielabhängigkeiten und der zeitlichen Verläufe der Ziele können diese fundiert gegenseitig in Beziehung gesetzt und priorisiert werden.

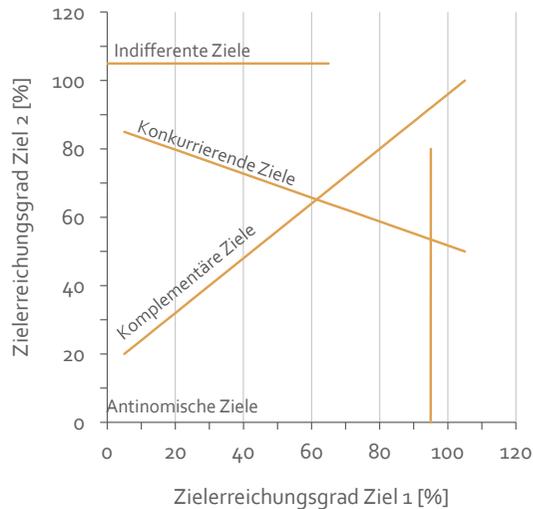


Abbildung 3: Verschiedene Varianten der Abhängigkeiten von Zielen

Durch eine strukturierte Abfrage der Ziele und deren Abhängigkeiten (vgl. Abbildung 4) konnte mit allen beteiligten Akteur*innen ein klarer und in sich kohärenter Zielekanon für das HyExperts-Projekt definiert werden (siehe Kapitel 5.1).

Perspektive	Beschreibung des Ziels	Zeitschiene	Wertschöpfung	Gewichtung
Gesellschaftlich oder Akteur spezifisch	Bitte beschreiben Sie ein übergeordnetes Ziel, zu dem die Anwendung von H ₂ einen Beitrag leisten soll. Prüfen Sie, ob es ein echtes Ziel oder eher ein Bewertungskriterium ist.	Bitte ankreuzen Wann soll ein Beitrag erlangt sein?	Bitte ankreuzen Mehrfachnennung möglich	Bitte ankreuzen 10 = Sehr wichtig 0 = nicht relevant
<input type="checkbox"/> Gesellschaftlich <input type="checkbox"/> Akteurs spezifisch Anders:	Indifferent Z: _____ Z: _____ Z: _____ Komplementär Konkurrierend Z: _____	<input type="checkbox"/> < 4 Jahre <input type="checkbox"/> > 4 bis <10 Jahre <input type="checkbox"/> > 10 bis < 20 Jahre <input type="checkbox"/> > 20 Jahre	<input type="checkbox"/> EE-Erzeugung <input type="checkbox"/> H ₂ -Erzeugung <input type="checkbox"/> Verteilung-Phy. <input type="checkbox"/> Verteilung-Bil. <input type="checkbox"/> H ₂ -Nutzung	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 <input type="checkbox"/> 8 <input type="checkbox"/> 9 <input type="checkbox"/> 10

Abbildung 4: Beispielhafter Steckbrief zur Entwicklung des Zielekanons

4.2 PROJEKTIDENTIFIKATION

Wie im vorherigen Kapitel bereits erwähnt, galt es in HyExperts die Projektansätze aus der HyStarter-Phase durch einen „Quick-Check“ auf Herz und Nieren zu überprüfen und, wenn möglich, in die HyExperts-Phase zu überführen. Zu diesem Zweck wurden alle Akteur*innen der HyStarter-Phase sowie weitere Akteur*innen aus der KielRegion anhand einer digitalen Umfrage ausführlich zum aktuellen Projektstand und deren anstehenden Bedarfen befragt. Die Umfrage berücksichtigte weiterhin den Beitrag zur Zielerreichung zu dem zuvor definierten Zielekanon. Anhand einer Balanced Scorecard (vgl. Abbildung 5) und der Umfrageergebnisse konnten die Projekte in den verschiedenen Wertschöpfungsstufen Stromerzeugung, H₂-Erzeugung, H₂-Infrastruktur und H₂-Nutzung neu bewertet und priorisiert werden.

	Zielparameter 1: Wettbewerbsfähigkeit			Zielparameter 2: Klimaschutz		Zielparameter 3: Umsetzung			Zielparameter 4: Strategie		SCORE
	Kriterium 1.1: Ökonomische Wirkungen	Kriterium 1.2: Wachstumspotenzial	Kriterium 1.3: Bedeutung für die Region	Kriterium 2.1: Einsparung THG-Emissionen	Kriterium 2.2: weitere Nachhaltigkeitskriterien	Kriterium 3.1: Wirtschaftliche Bewertung	Kriterium 3.2: Regulatorik der Technologie im Projekt	Kriterium 3.3: Erfolgsaussichten bis 2027	Kriterium 4.1: Relevanz für Regionskonzept	Kriterium 4.2: Anstoßeffekte	
	Punkte 0 bis 10	Punkte 0 bis 10	Punkte 0 bis 10	Punkte 0 bis 10	Punkte 0 bis 10	Punkte 0 bis 10	Punkte 0 bis 10	Punkte 0 bis 10	Punkte 0 bis 10	Punkte 0 bis 10	
1											0
2											0
3											0
4											0
5											0
6											0
7											0
8											0
9											0
10											0

Abbildung 5: Balanced Scorecard für die Projektidentifikation

Für die identifizierten Projekte wurden anschließend Detailanalysen durchgeführt, anhand derer Lösungskonzepte für typische Anwendungsszenarien entwickelt wurden. Weiterhin wurde in themenspezifischen Workshops Tiefenwissen vermittelt, dass die beteiligten Akteur*innen dazu befähigen sollte, die Projekte eigenständig weiterzuentwickeln und ggf. Investitionsentscheidungen zu treffen.

4.3 REGIONALES KONZEPT

Im dritten Teilschritt des methodischen Vorgehens wurden die identifizierten Einzelprojekte systemisch betrachtet. Ziel dieser Betrachtung war es, Synergien zwischen den Projekten als auch für die KielRegion als Ganzes zu identifizieren und konkrete Ansätze zu entwickeln. Diese konnten technischer, rechtlicher oder auch wirtschaftlicher Natur sein.

Ein weiterer Aspekt der Entwicklung eines regionalen Konzeptes war das Stakeholdermanagement. In diesem Zusammenhang ging es zum einen darum, eine breite Wissensbasis zu vermitteln und Akteur*innen, die bisher nicht auf dem Level eines HyExperts-Projektes waren, zu befähigen, eigene Konzeptideen auf einer soliden Wissensbasis zu entwickeln. Zum anderen war es wichtig, alle regionalen Wasserstoffaktivitäten miteinander zu vernetzen und in Einklang zu bringen, sodass in der Region alle Aktivitäten bestmöglich ineinandergreifen und den höchsten regionalen Mehrwert erzeugen können.

5 STAKEHOLDERMANAGEMENT

Das Stakeholdermanagement fasst alle Aktivitäten und Ergebnisse zusammen, die in einem partizipativen Prozess mit allen Akteur*innen entwickelt wurden. Hierzu zählen die Zieldefinition, die Projektidentifikation als auch die Vermittlung von allgemeinem Tiefenwissen im Bereich Wasserstoff. Alle Ergebnisse, die den spezifischen Wertschöpfungsstufen Erzeugung, Infrastruktur und Nutzung als auch dem regionalen Verbundprojekt zuzuordnen sind, werden in den jeweiligen Kapiteln beschrieben.

5.1 ZIELDEFINITION

Gemeinsam mit ca. 40 Akteur*innen wurde zum offiziellen Projektauftritt am 14.09.2022 die Definition des Zielekanons für die HyExperts-Phase erarbeitet. Anhand der zuvor beschriebenen Methodik wurde der in Abbildung 6 dargestellte Zielekanon abgeleitet. Die Ziele der HyStarter-Phase von Klima- und Umweltschutz als auch regionaler Wertschöpfung wurden in der Weiterentwicklung dezidiert dargestellt und zueinander priorisiert.



Abbildung 6: Zielekanon der HyExperts KielRegion

WETTBEWERBSFÄHIGKEIT

- ▶ Priorisierung: 1
- ▶ Inhalt:
 - Durch die Projekte soll die KielRegion wettbewerbsfähig bleiben.
 - Die Projekte müssen daher eine nachhaltige Perspektive für bestehende wirtschaftliche Tätigkeiten bieten.
 - oder neue Wertschöpfungsstufen in der Region schaffen.

KLIMASCHUTZ

- ▶ Priorisierung: 2
- ▶ Inhalt:
 - Alle Projekte sollen bis 2027 einen messbaren Beitrag zur Einsparung von THG leisten.
 - In den Projekten müssen bestehende THG-Emissionen substituiert werden.
 - Es gilt das Credo der Technologieoffenheit, d. h., H₂-Technologien müssen gegenüber anderen Technologien Vorteile besitzen.

UMSETZUNG

- ▶ Priorisierung: 2
- ▶ Inhalt:
 - Die Vorplanung von drei Projekten für regionale Akteur*innen wird abgeschlossen sein.
 - Dazu gehören technische, wirtschaftliche und regulatorische Aspekte.
 - Die Ergebnisse sollen als Grundlage zur Investitionsentscheidung und konkreten Umsetzung der Projekte dienen.

STRATEGIE

- ▶ Priorisierung: 2

- ▶ Inhalt:
 - Im Rahmen des Projektes soll eine strategische Untersuchung durchgeführt werden.
 - Diese soll Perspektiven für konkrete Umsetzungsprojekte nach 2027 liefern.

Eine interessante Entwicklung im Diskurs war die Bedeutung der Wettbewerbssicherheit. Im Kontext des völkerrechtswidrigen Angriffskrieges auf die Ukraine und der damit einhergehenden Energiekrise wurden Themen wie Resilienz und Sicherung von Arbeitsplätzen deutlich höher bewertet, als dies noch in der HyStarter-Phase der Fall war. So wurde die Wettbewerbsfähigkeit noch vor dem Klimaschutz am höchsten priorisiert. Hinzu kamen die beiden Aspekte Umsetzung und Strategie.

Der gemeinsam mit allen Akteur*innen erarbeitete Zielekanon diente im weiteren Projektverlauf als Grundlage für die Projektidentifikation und Priorisierung.



Abbildung 7: Impression des Workshops zur Zieldefinition (Quelle: KielRegion GmbH)

5.2 PROJEKTIDENTIFIKATION

Zur Identifikation aller Projekte in der KielRegion wurde eine breit angelegte Unternehmensumfrage gestartet. Als Grundlage für die Umfrage diente die Netzwerkdatenbank aus der HyStarter-Phase, welche um neue Teilnehmer ergänzt wurde. Insgesamt wurden ca. 76 Unternehmen aus der KielRegion angeschrieben und zur Teilnahme an der Umfrage aufgefordert. Im Rahmen der Umfrage wurden die Projekte entlang der Wertschöpfungskette einsortiert, nach dem aktuellen Entwicklungsstand, technischen Spezifikationen, geschätztem Investitionsvolumen, Umsetzungshindernissen, nach spezifischen Bedarfen und vielem mehr gefragt. Ziel war es, ein gutes Bild über

alle H₂-Aktivitäten in der Region zu erhalten, das als Grundlage für die weiteren Planungen über HyExperts hinaus dienen sollte.

Im Ergebnis haben 12 Unternehmen an der Umfrage teilgenommen, die im Weiteren anhand der Balanced Scorecard bewertet und in Steckbriefen dargestellt wurden (vgl. Abbildung 8/Abbildung 8).



The screenshot shows a project dashboard with the following elements:

- Logo:** Placeholder for the project logo.
- Kategorie:** Erzeugung (Hydrogen icon), Infrastruktur (Building icon), Nutzung (Bus icon).
- Projektstatus:** A progress bar with stages: Idee, in Planung, in Umsetzung, umgesetzt.
- Score:** 4,4/2,0. A sub-scorecard shows:
 - Klimaschutz: 4/2 (Green progress)
 - Wettbewerbsfähigkeit: 4/2 (Yellow progress)
 - Umsetzung: 4/2 (Orange progress)
 - Strategie: 4/2 (Grey progress)
- Realisierung:** XX.XX.XXXX
- Kurzbeschreibung:** Projektpartner: ...

Abbildung 8: Beispielhafte Darstellung der Projektsteckbriefe und Bewertung nach Balanced Scorecard

Es stellte sich heraus, dass insgesamt fünf Projekte einen ausreichend hohen Score erzielten. Diese Projekte definierten somit die Fokusthemen des weiteren Vorgehens in der HyExperts-Phase. Die fünf Projekte ordneten sich in der Wertschöpfungskette in den Bereichen der Wasserstoffherzeugung und in der Wasserstoffnutzung ein. Bei der Wasserstoffnutzung konnte nochmals in die Themengebiete öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV) und Gewerbegebiete unterschieden werden. Das Thema Infrastruktur, im Sinne einer öffentlichen Tankstelleninfrastruktur oder H₂-Pipelines, wurde indes nicht adressiert. Für ein vollständiges Verständnis der KielRegion wurden diese beiden Themen jedoch, auch unabhängig von konkreten Aktivitäten und Interessen der Akteur*innen vor Ort, beleuchtet und diskutiert. Die konkreten Ergebnisse der Fokusthemen Wasserstoffnutzung in Gewerbegebieten und ÖPNV als auch der Wasserstoffherzeugung und -infrastruktur werden in den folgenden Kapiteln ausführlich dargelegt.

5.3 WORKSHOPS, SEMINARE & VERNETZUNG

Im Verlauf des HyExperts-Projektes wurden eine Vielzahl an Workshops zu den Fokusthemen, Seminare zur allgemeinen Wissensvermittlung als auch Einzelgespräche geführt. Ziel dieses Vorgehens war es, alle Aktivitäten zum Thema Wasserstoff in der Region miteinander zu vernetzen, die Planungen von strukturelevanten Akteur*innen (z. B. Stadtwerke und MHKWs) in die Konzepte einzubeziehen und allgemein die Akteur*innen in der Region mit dem notwendigen Wissen auszustatten, sodass diese ihre Projekte möglichst selbstständig weiterentwickeln können.

Eine Erkenntnis der Unternehmensumfrage war, dass noch ein großer Wissensbedarf hinsichtlich der Wasserstoffwirtschaft bei den Akteur*innen der KielRegion bestand. Gerade in einem sehr dynamischen Feld wie Wasserstoff sind die Unsicherheiten groß und es bedarf einer fundierten Aufklärung über die aktuelle regulatorische, technische und wirtschaftliche Rahmenbedingung, damit Akteur*innen Entscheidungen in diesem Feld treffen können. Dementsprechend fand am 05.04.2023 ein Wasserstoff-Seminar statt (vgl. Abbildung 9), das allen Akteur*innen der KielRegion offenstand. Mit ca. 50 Teilnehmenden war der Workshop sehr gut besucht und bestätigte die Erkenntnis des Wissensbedarfs im Bereich Wasserstoff. Dies betrifft vor allem kleine und mittlere Unternehmen (KMU), die nicht ausreichend eigene Kapazitäten besitzen, um bei diesen Themen immer auf dem neusten Stand zu bleiben.

Für das Fokusthema Wasserstoffnutzung im ÖPNV fanden zwei Workshops statt. Im Rahmen der Workshops wurden die wesentlichen technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen im ÖPNV diskutiert. Hierzu gehörten auch Themen zu Betriebsabläufen, Ertüchtigung der Werkstätten zur Instandhaltung der Busse als auch die notwendige Betankungsinfrastruktur. Da im Zusammenhang der Nutzung von Wasserstoff im ÖPNV auch die Eigenerzeugung von Wasserstoff ein relevantes Thema ist, wurden in diesem Kontext auch typische Wasserstoffherzeugungskonzepte dargestellt und

diskutiert. Die konkreten Ergebnisse der Workshops sind in Kapitel 7.2 dargestellt.



Abbildung 9: Impressionen des Workshops zum Basiswissen Wasserstoff (Quelle: KielRegion GmbH)

In der Bestrebung, die allgemeinen Ansätze im Bereich der Wasserstoffnutzung in Industrie- und Gewerbegebieten zu vertiefen, wurde ein Online-Workshop mit Akteur*innen aus dem Handels- und Industriepark Kiel-Wellsee durchgeführt. Der Workshop versammelte eine breite Palette von Teilnehmenden, darunter Vertreter einer Großwäscherei und einer Großbäckerei sowie eines Herstellers von Abwehr- und Sicherheitselektronik. Darüber hinaus waren Vertreter der Landeshauptstadt Kiel und des HIP Kiel-Wellsee e. V. anwesend.

Der primäre Zweck des Workshops bestand darin, ein tieferes Verständnis für die individuellen Bedarfe der Akteur*innen in Bezug auf Wärme – sowohl Raumwärme als auch Prozesswärme – sowie Mobilität zu gewinnen. Dabei wurde ein besonderer Fokus auf die Antriebe und Beweggründe der Akteur*innen zur Dekarbonisierung gelegt. Indem man die Perspektiven und Anforderungen der einzelnen Akteur*innen ergründete, strebte man an, eine fundierte Basis für die Weiterentwicklung spezifischer Initiativen zu schaffen.

Nachdem die verschiedenen Inputs gesammelt wurden, nahm das Beratungskonsortium die Aufgabe in Angriff, Analysen durchzuführen und konkrete Ableitungen für die KielRegion in diesen Bereichen zu entwickeln. Die Ergebnisse aus diesen Analysen sowie die entsprechenden Handlungsempfehlungen sind jeweils in den Kapiteln 7 und 10 zu finden.

In einer ähnlichen Initiative wurde ein weiterer Workshop im Bereich der erneuerbaren Wasserstofferzeugung mit ausgewählten Akteur*innen durchgeführt, die konkrete Potenziale in der Region aufweisen. Der Workshop zielte darauf ab, die Akteur*innen für die regulatorischen und wirtschaftlichen Treiber bei der Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff zu sensibilisieren. Dies sollte ein tieferes Verständnis und Bewusstsein für die Komplexitäten und Anforderungen in diesem Sektor fördern.

Nach einer Informationsphase wurden die Teilnehmenden bei der Ausarbeitung einer Matrix zur Wasserstoff-Wertschöpfungskette angeleitet (vgl. Abbildung 10). Dieses Instrument diente dazu, zentrale Chancen und Risiken innerhalb der Region zu identifizieren. Dabei ging es insbesondere darum, ein umfassendes Bild der verschiedenen Faktoren zu zeichnen, die den Erfolg oder Misserfolg potenzieller Projekte beeinflussen könnten.



verschiedenen Akteur*innen und ihre jeweiligen Potenziale synergistisch nutzt, um eine kohärente und tragfähige Wasserstoffwirtschaft zu schaffen.

Abbildung 10: Erarbeitete Matrix der Chancen und Risiken der Wasserstoffwirtschaft in der KielRegion

In der Folge wurden die gesammelten Inputs genutzt, um Referenzen für die Machbarkeit der ausgewählten Projekte zu liefern. Die daraus resultierenden Erkenntnisse sind in Kapitel 6 festgehalten.

Darüber hinaus bildeten die im Workshop gewonnenen Einblicke die Grundlage für ein regionales Konzept, das in Kapitel 9 weiterentwickelt wurde. Dieses Kapitel zielt darauf ab, die erarbeiteten Strategien und Lösungen in einen größeren regionalen Rahmen zu stellen, um eine nachhaltige und integrierte Entwicklung des Wasserstoffsektors in der KielRegion zu fördern. Es unterstreicht die Bedeutung einer koordinierten Vorgehensweise, die die

6 WASSERSTOFFERZEUGUNG

In der heutigen Zeit ist der Klimawandel eine der dringlichsten Herausforderungen unserer Zeit, und das Land Schleswig-Holstein hat sich ambitionierte Ziele gesetzt, um dem entgegenzuwirken. Diese Ziele zur Treibhausgasminde- rung bis 2050 sowie der Ausbau der erneuerbaren Energien bis 2025 werden durch die gesetzliche Grundlage des Energiewende- und Klimaschutzgesetzes (EWKG) Schleswig-Holstein gestützt. Das Land Schleswig-Holstein hat sich vorgenommen, bis 2030 eine Stromerzeugung aus Erneuerbare-Energien-Anlagen an Land von mindestens 34 bis 38 TWh zu erreichen.² Hierbei steht die Sektorenkopplung als Schlüsseltechnologie im Mittelpunkt, um die verschiedenen Energiebereiche effizient miteinander zu verbinden.

In diesem Kontext hat das Land Schleswig-Holstein frühzeitig Initiativen zur Umsetzung von Wasserstoffpotenzialen ergriffen. Bereits im Mai 2019 haben die norddeutschen Länder als Pioniere die „Eckpunkte einer Norddeutschen Wasserstoffstrategie“ veröffentlicht. Diese Strategie, die in Zusammenarbeit mit den anderen norddeutschen Bundesländern – Bremen, Hamburg, Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern – verfolgt wird, hat das ehrgeizige Ziel, bis 2025 mindestens eine Elektrolyseleistung von 500 Megawatt und bis 2030 von mindestens fünf Gigawatt in Norddeutschland zu etablieren.³ Im Jahr 2022 wurde diese als eine landeseigene Strategie mit besonderem Fokus auf die Entwicklungen in Schleswig-Holstein fortgeschrieben. Die neuesten Schätzungen innerhalb dieser erneuerten Strategie gehen davon aus, dass bis 2025 rund 200 Megawatt Elektrolysekapazität benötigt werden, um den H₂-Bedarf Schleswig-Holsteins zu decken. Darüber hinaus wird prognostiziert, dass im Jahr 2030 mindestens

1,8 Terawattstunden CO₂-neutraler Wasserstoff allein in Schleswig-Holstein benötigt werden.⁴

Die Stadt Kiel hat sich diesem Prozess nicht nur angeschlossen, sondern führt ihn mit ihrem „Masterplan 100 % Klimaschutz“ an, der bis 2045 eine Klimaneutralität anstrebt und stetig ambitioniertere Ziele setzt. In diesem dynamischen und hoch ambitionierten Kontext stellt sich die drängende Frage, welche Rolle die KielRegion bei der Umsetzung dieser Wasserstoffstrategie und der Erreichung der festgelegten Ziele spielen kann. Um diese Frage zu beantworten, ist es unerlässlich, die Haupttriebkkräfte – sowohl regulatorischer als auch wirtschaftlicher Natur – der erneuerbaren Wasserstoff-erzeugung zu erforschen und zu verstehen.

In diesem Kapitel wird diese Fragestellung unter den Leitziele- n des Projektes – Wettbewerbsfähigkeit, Klimaschutz und Umsetzung – analysiert. Durch eine eingehende Betrachtung der wirtschaftlichen sowie regulatorischen Rahmenbedingungen wird ein fundiertes Verständnis für die Potenziale und Herausforderungen in der Region geschaffen. Dabei werden konkrete Beispiele aus der Region herangezogen, um eine praktische Perspektive zu bieten und die Theorie in praxisnahe Lösungen zu übersetzen.

6.1 ERZEUGUNG ERNEUERBARER ENERGIE

Die nachhaltige Erzeugung erneuerbarer Energien stellt eine essenzielle Grundlage für die Produktion von erneuerbarem Wasserstoff durch Elektrolyse dar. In diesem Kontext kommt dem Bundesland Schleswig-Holstein eine zentrale Rolle zu, da es über erhebliche Kapazitäten und Ambitionen im Bereich der erneuerbaren Energien verfügt, die den Bedarf an erneuerbarem Wasserstoff in der Zukunft decken können.

² Energiewende- und Klimaschutzgesetz Schleswig-Holstein 2017.

³ Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer (2019): Norddeutsche Wasserstoffstrategie, [online] <https://norddeutschewasserstoffstrategie.de/wp-content/uploads/2020/11/norddt-H2-Strategie-final.pdf> [abgerufen am 19 Sep. 2023].

⁴ Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung (2022): Wasserstoffstrategie.SH, [online] https://wasserstoffwirtschaft.sh/file/h2-strategie_broschuere.pdf [abgerufen am 19 Sep. 2023].

Bis 2030 verfolgt Schleswig-Holstein das Ziel, eine Stromerzeugung aus Anlagen für erneuerbare Energien an Land von mindestens 34 TWh zu erreichen. Diese Bandbreite könnte sogar bis zu 38 TWh erweitert werden, wenn EU- und bundesweit die Ziele zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen und zum Ausbau der erneuerbaren Energien erhöht werden und infolgedessen mehr Strom für die Sektorenkopplung genutzt wird. Ein weiteres Ziel der Landesregierung ist es, bis 2025 eine installierte Leistung von Windenergie an Land von 10 Gigawatt zu erzielen. Zum aktuellen Zeitpunkt sind bereits 7,9 GW an Windkapazität an Land und 1,7 GW an PV-Kapazität installiert, was die starke Position des Landes im Bereich der erneuerbaren Energien unterstreicht.

Im Rahmen des HyExperts-Projektes wurde besonderes Augenmerk auf die regionale Wertschöpfung gelegt. Die Identifizierung der Potenziale der Energieerzeugung in erreichbarer Nähe der KielRegion erfolgte durch Stakeholder-Interviews und Zusammenarbeit mit privaten und öffentlichen Akteuren. Die Evaluation ergab ein Potenzial von über 300 MW, wobei mehr als 200 MW aus Windenergie und über 100 MW aus PV-Erzeugung stammen. Darüber hinaus befinden sich weitere Projekte in Planung, darunter ein PV-Park auf einer Deponie, die das Energiepotenzial in der Region in Zukunft noch erweitern könnten. Dies stellt einen bedeutenden Schritt in Richtung einer nachhaltigen und eigenständigen Energieversorgung dar, die die Basis für eine grüne Wasserstoffwirtschaft legt.

6.2 ERZEUGUNG ERNEUERBAREN WASSERSTOFFS

Die Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff ist ein komplexes Thema, das durch einen vielschichtigen regulatorischen Rahmen, sich rasch entwickelnde Technologien und dynamische wirtschaftliche Faktoren gekennzeichnet ist. Die Erzeugung steht am Schnittpunkt technischer Innovationen und politischer Anforderungen, wobei die wirtschaftliche Rentabilität immer mehr in den Vordergrund rückt.

Der nachfolgende Abschnitt untersucht die Hauptantriebskräfte hinter der Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff und wendet diese auf konkrete

Anwendungsbeispiele in der KielRegion an. Dabei wird nicht nur die theoretische Basis beleuchtet, sondern es werden auch praxisnahe Beispiele und Szenarien vorgestellt, um ein ganzheitliches Bild des Potenzials und der Herausforderungen in der Region zu zeichnen.

6.2.1 Allgemeine Grundlagen

Die Ausarbeitung der allgemeinen Grundlagen für die Erzeugung erneuerbaren Wasserstoffs erfordert eine präzise Auseinandersetzung mit den geltenden regulatorischen Rahmenbedingungen. Diese sind von essenzieller Bedeutung, da sie nicht nur den rechtlichen Rahmen abstecken, innerhalb dessen Projekte konzipiert und realisiert werden können, sondern auch die Wirtschaftlichkeit solcher Projekte maßgeblich beeinflussen.

Im folgenden Abschnitt wird zunächst ein Überblick über die relevanten regulatorischen Rahmenbedingungen für die Produktion von erneuerbarem Wasserstoff gegeben. Anschließend werden die wirtschaftlichen Implikationen dieser Vorgaben analysiert, um einen tiefgehenden Einblick in die gegenwärtigen Herausforderungen und Möglichkeiten im Bereich der Erzeugung zu bieten.

6.2.1.a Aktuelle regulatorische Rahmenbedingungen

Die regulatorischen Rahmenbedingungen auf nationaler und europäischer Ebene fungieren als Katalysator für die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der erneuerbaren Wasserstoffproduktion. Momentan existieren zwei festgelegte Pfade zur Generierung erneuerbaren Wasserstoffs: der aus biogenem Ursprung (RFBO gemäß Artikel 29 der RED II) und der aus nicht-biogenem Ursprung (RFNBO nach dem Delegierten Rechtsakt zu Artikel 27 der RED II). Beide Pfade sind maßgeblich für die Zertifizierung und insbesondere für diverse Fördermechanismen nach europäischem und nationalem Recht.

Die Spezifikationen für RFNBOs sind im Delegierten Rechtsakt zu Artikel 27 RED II klar definiert (vgl. Abbildung 11). Demnach darf erneuerbarer Wasserstoff nur aus erneuerbaren Energien nach EU-Definition erzeugt

werden, wobei hauptsächlich Wind-, Wasser- und PV-Anlagen als akzeptable Quellen gelten. Die EU legt zudem Beschränkungen bezüglich der Inbetriebnahme, der Erzeugung und der Geografie beider Anlagen fest.

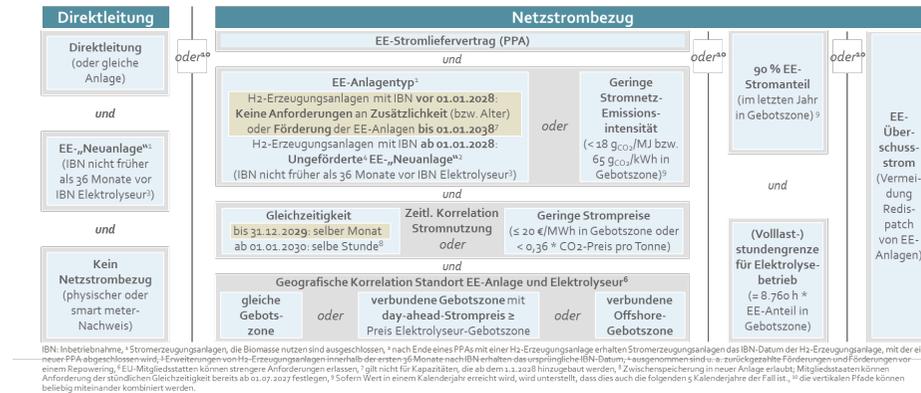


Abbildung 11: Anforderungen an die Erzeugung erneuerbaren Wasserstoffs nach dem Delegierten Rechtsakt zu Artikel 27 RED II

Wenn eine Wasserstoffherstellungsanlage durch eine Direktleitung mit der EE-Anlage verbunden ist, darf die Inbetriebnahme der EE-Anlage nicht früher als 36 Monate vor dem Inbetriebnahmedatum des Elektrolyseurs erfolgt sein. Ebenso darf die Wasserstoffherstellungsanlage keinen zusätzlichen Strom aus dem öffentlichen Netz beziehen.

Im Falle einer Stromversorgung des Elektrolyseurs über das öffentliche Netz muss dies über einen Stromkaufvertrag (Power Purchase Agreement, PPA) geschehen. Ebenfalls existieren Beschränkungen bezüglich der Inbetriebnahme beider Anlagen. Wenn der Elektrolyseur vor 2028 in Betrieb genommen wird, besteht bis 2038 keine geforderte Korrelation bezüglich der Inbetriebnahmedaten beider Anlagen. Für danach errichtete Anlagen darf die Inbetriebnahme der Erneuerbare-Energie-Anlage nicht früher als 36 Monate vor der Inbetriebnahme des Elektrolyseurs erfolgt sein. Darüber hinaus müssen Strom und Wasserstoff bis Ende 2029 im gleichen Monat erzeugt werden. Ab dem Jahr 2030 müssen beide innerhalb derselben Stunde erzeugt werden.

Schließlich müssen beide Anlagen in der gleichen Gebotszone gelegen sein. Für Deutschland besteht eine einzelne Gebotszone, die auch Luxemburg einschließt.

Während RFNBOs bereits klar definiert sind, wird die Definition von RFBOs momentan national im Rahmen der 37. und 38. BImSchV diskutiert. Ihre Relevanz liegt derzeit vor allem im Kontext der sogenannten THG-Quoten.

Gemäß RED II sind spezifische Vorgaben für den Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch im Verkehrssektor festgelegt, mit einem festen Ziel von 14 % bis 2030. Zur Umsetzung dieser Vorgabe verabschiedete der Bundestag am 20. Mai 2021 ein Gesetz zur Weiterentwicklung der THG-Minderungsquote, das in § 37a des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) sowie der 37. und 38. BImSchV realisiert wird. Diesel- und Ottokraftstoff-Hersteller haben demzufolge zwei Möglichkeiten zur Erfüllung dieser Quote: den Einsatz emissionsarmer/-freier Zwischenprodukte bei der Produktion konventioneller Kraftstoffe oder die Übertragung der Verpflichtung auf Dritte durch THG-Quotenhandel.

Im Falle einer Nichteinhaltung müssen die Inverkehrbringer eine Strafe von 600 €/tCO₂ entrichten, was einen Markt rund um die Quoten geschaffen hat. Erneuerbarer Wasserstoff und Strom bieten durch gewisse Multiplikatoren, die derzeit sogar eine Aufwertung erfahren könnten, attraktive zusätzliche Einnahmen für Betreiber von Tankstellen. Dieses dynamische Umfeld birgt Chancen und Herausforderungen, die in der unten stehenden Grafik dargelegt werden, und unterstreicht die zentrale Rolle des regulatorischen Rahmens bei der Gestaltung der Zukunft der erneuerbaren Wasserstoffproduktion (vgl. Abbildung 12).

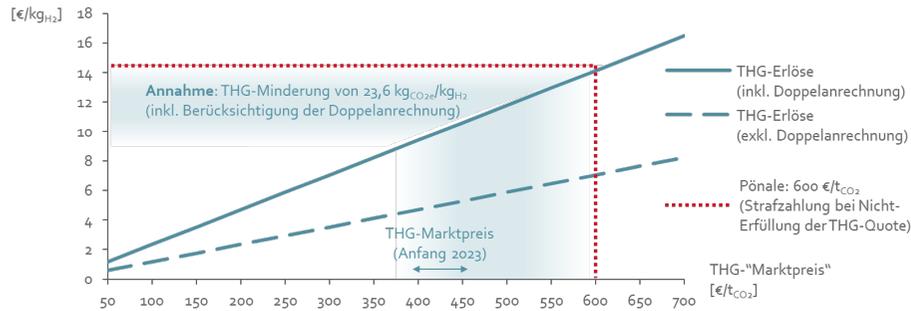


Abbildung 12: THG-Erlöse durch grünen H2 aus Sicht eines Tankstellenbetreibers (2023)

6.2.1.b Aktuelle wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Aus den regulatorischen Richtlinien ergeben sich vier wesentliche Parameter, die die ökonomische Tragfähigkeit der H₂-Produktion beeinflussen. Diese Parameter sind von entscheidender Bedeutung für die Umsetzung und den Betrieb von Projekten im Bereich der erneuerbaren Wasserstoffproduktion.

Basierend auf den Definitionen für RFNBOs und RFBOs ist festgelegt, dass erneuerbarer Wasserstoff entweder durch Direktleitung zu einer EE-Anlage oder über das öffentliche Netz erzeugt werden kann. Diese Regelungen begrenzen die potenziellen erneuerbaren Energiequellen, indem sie sie entweder volatiler (hauptsächlich Wind und Photovoltaik) oder konstanter (hauptsächlich biologische Quellen, wie in §§ 37 und 38 BImSchV definiert) Stromerzeugung zuordnet.

Bei der Untersuchung des ersten Parameters, dem Verbindungstyp, zeigt sich, dass die Stromkosten sich aus den Strombezugskosten und den Stromnebenkosten zusammensetzen. Die Nebenkosten umfassen alle Abgaben und Umlagen, die derzeit die Stromsteuer und netzentgeltgekoppelte Abgaben involvieren. Aktuell profitiert die Elektrolyse in Deutschland von einer Reduzierung der Netzentgelte auf 0 €ct für zwei Jahrzehnte gemäß § 118 Abs. 6 S. 1 und 7 EnWG.

Innerhalb des Rahmens der Stromsteuer bestehen Möglichkeiten für Entlastungen und Befreiungen für Elektrolyse. Die Stromsteuerentlastung kann für Unternehmen des produzierenden Gewerbes in Anspruch genommen werden, wobei die steuerlichen Entlastungen auf den für die Elektrolyse genutzten Strom beschränkt werden. In diesem Fall wird die Stromsteuer für den in der Elektrolyse verbrauchten Strom im folgenden Jahr vom Hauptzollamt erstattet. Bei direkten Leitungen besteht zudem die Chance einer Stromsteuerbefreiung unter der Voraussetzung, dass keine Energie aus dem Netz gezogen wird und eine räumliche Nähe beider Anlagen besteht. Hier ist keine Stromsteuer zu bezahlen.

Bei netzgekoppelten Abgaben ist eine Reduzierung auf 0 €ct nur bei Nicht-Netz-Nutzung, d. h. bei direkter Verbindung der Elektrolyseure mit EE-Erzeugungsanlagen, realisierbar.

Der zweite Parameter, die Art der Stromerzeugung, trägt erheblich zur Wirtschaftlichkeit der erneuerbaren Wasserstofferzeugung bei. Die kontinuierliche Stromzufuhr zum Elektrolyseur ermöglicht einen Grenzkostenbetrieb, wobei die Betriebsentscheidung auf den Preissignalen der Energiebörse basiert (vgl. Abbildung 13). Diese Betriebsweise erfordert eine konstante Stromerzeugung, um ausreichend Volllaststunden des Elektrolyseurs zu gewährleisten, was mit Photovoltaik und Windenergie eine Herausforderung darstellt.

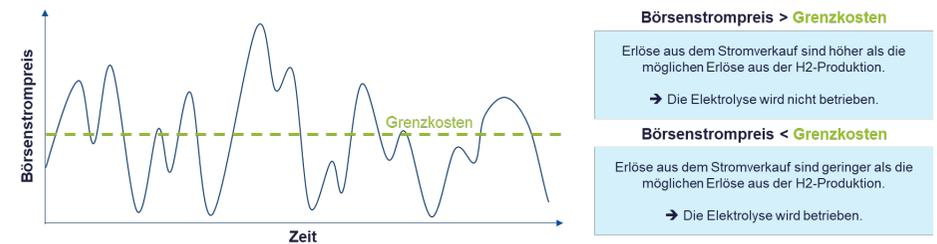


Abbildung 13: Logik des Grenzkostenbetriebs eines Elektrolyseurs

Zusammenfassend eröffnet die Untersuchung eine klare Perspektive auf die optimalen Konfigurationen zur Produktion von erneuerbarem Wasserstoff (vgl.

Abbildung 14). Eine konstante Stromversorgung in Verbindung mit einer Direktleitung zeichnet sich als die effizienteste Lösung ab. In diesem Szenario können Strom zu vergleichsweise geringen Kosten bezogen und zusätzliche Stromnebenkosten auf 0 €ct reduziert werden, was eine signifikante Senkung der Produktionskosten ermöglicht. Am anderen Ende des Spektrums steht die Verbindung zu volatilen Stromerzeugungsquellen über das öffentliche Netz, welche die Produktion von erneuerbarem Wasserstoff vergleichsweise einschränkt. Diese Konfiguration zieht in der Regel höhere Strompreise nach sich, die aus den gesteigerten Strombezugskosten und Stromnebenkosten resultieren.

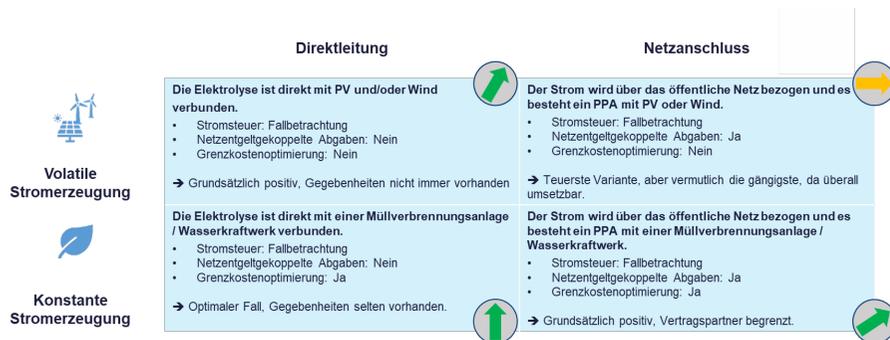


Abbildung 14: Matrix der Parameter für die wirtschaftliche Erzeugung erneuerbaren Wasserstoffs

Weiterhin gelten für alle Konfigurationen bestimmte ökonomische Regeln. Sowohl die Investitionskosten als auch die Stromkosten sind die hauptsächlichen Einflussfaktoren für die Rentabilität der Wasserstoffproduktion. Diese Komponenten bilden die zentralen Säulen der wirtschaftlichen Betrachtung und bestimmen weitgehend die Wirtschaftlichkeit des gesamten Vorhabens.

In Bezug auf die Investitionskosten ist festzuhalten, dass Elektrolyseure typischerweise mindestens 3.000 Volllaststunden erreichen müssen, um rentabel zu sein. Grundsätzlich gilt hierbei: Je mehr, desto besser, da so die Investitionskosten auf eine höhere Produktionsmenge verteilt werden können.

Dies ermöglicht eine effizientere Amortisation der anfänglichen Kapitalausgaben und begünstigt eine höhere Rentabilität des Projektes.

Es ist jedoch zu erwarten, dass sich diese Mindestanzahl an Volllaststunden in der Zukunft ändern wird, da die Kapitalkosten durch Serienproduktion und Weiterentwicklung erheblich sinken werden. Beispielsweise ist bis 2030 eine Kostensenkung von 25 % der Kapitalkosten wahrscheinlich (Cost-Forecast-Kostenprognose-PEM-Alkaline-Electrolysis-Elektrolyse, ISE-CATF, 2021). Dies deutet auf eine dynamische Entwicklung der Wirtschaftlichkeitsparameter hin.

Entscheidend für die Anzahl der Volllaststunden, die ein Elektrolyseur erreichen kann, ist die angeschlossene Stromquelle. Hier muss die installierte Elektrolysekapazität mit der installierten Wind- oder PV-Kapazität korrelieren (vgl. Abbildung 15). Bei der Nutzung von Wind- und PV-Anlagen in Deutschland zeigt sich, dass etwa die doppelte installierte Windkapazität im Vergleich zur Elektrolysekapazität dem Elektrolyseur mehr als 4.000 Volllaststunden ermöglichen kann. Die alleinige Nutzung von PV in Deutschland reicht generell nicht aus, um genügend Volllaststunden für einen rentablen Betrieb eines Elektrolyseurs im aktuellen Umfeld zu gewährleisten. Die Kombination beider Energiequellen kann jedoch die durch Wind erzeugten Volllaststunden geringfügig erhöhen, wobei der zusätzliche Effekt oft nur marginal ist.

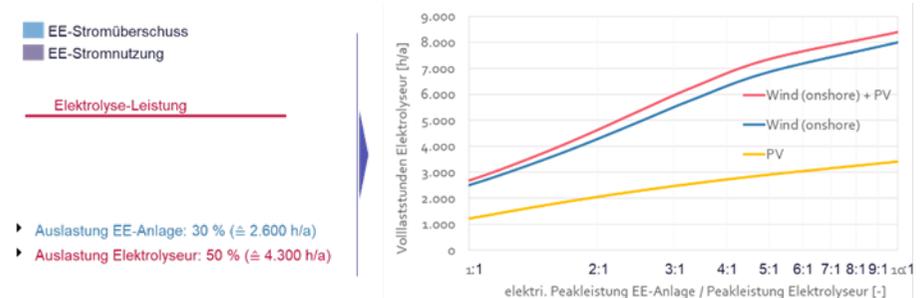


Abbildung 15: Volllaststunden eines Elektrolyseurs bei unterschiedlichen EE-Anlagengrößen

Die daraus resultierenden Stromkosten bilden den größten Anteil an den Wasserstoffherstellungskosten. Generell gilt, dass mit jedem Cent pro Kilowattstunde, um den die Stromkosten steigen, der Wasserstoffpreis entsprechend um 0,55 Cent pro Kilogramm ansteigt. Daher sind niedrige Stromkosten essenziell für geringe Wasserstoffproduktionskosten, was die Auswahl der Stromquelle zu einem kritischen Faktor in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung macht.

Marktpreisprognosen für den Strommarkt basierend auf den aktuellen Futures-Preisen für Lieferungen bis 2032 sehen die Preise für Basisprodukte bei etwa 90 €/MWh. Aus diesem Preis lässt sich der Marktwert erneuerbarer Energiequellen für die erneuerbare Wasserstoffherzeugung ableiten und somit die potenziellen Strompreise für die Erzeugung. Eine Extrapolation der relativen Jahresmarktwerte von PV- und Windstrom zeigt, dass sie 2021 beide etwa 80 % des durchschnittlichen Spotmarktpreises (Baseload) betragen. Daher können wir annehmen, dass die Stromkosten für auf Wind oder PV basierende Projekte etwa 80 % des Baseload-Preises oder etwa 72 €/MWh betragen werden, da dies die Opportunitätskosten im Spotmarkt darstellt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Rentabilität von Projekten zur Erzeugung erneuerbaren Wasserstoffs von den ursprünglichen vier Parametern bestimmt wird (vgl. Abbildung 16). Unter Berücksichtigung der weiteren genannten wirtschaftlichen Faktoren ergeben sich für die optimale Konfiguration – einer konstanten Stromversorgung kombiniert mit einer Direktleitung – Kosten von 6,03 €/kgH₂. Im Gegensatz dazu resultieren aus der am wenigsten optimalen Konfiguration, nämlich einer Anbindung an das Stromnetz gepaart mit einer volatilen Stromversorgung, Kosten von 8,79 €/kgH₂.

Daraus wird ersichtlich, dass die Konfiguration des Projektes zu einer Preissenkung bei der Wasserstoffherzeugung um 30 % führen kann. Dies unterstreicht die erhebliche wirtschaftliche Bedeutung der sorgfältigen Auswahl und Abstimmung der technischen Parameter und der Stromquelle in Projekten zur erneuerbaren Wasserstoffherzeugung. Die Integration optimaler Praktiken in Bezug auf die Stromerzeugung und -übertragung kann demnach als zentraler

Hebel zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit und zur Kostensenkung in der erneuerbaren Wasserstoffproduktion betrachtet werden.



Abbildung 16: Matrix der Parameter für die wirtschaftliche Erzeugung erneuerbaren Wasserstoffs mit Gestehungskosten

6.2.1.c Planerische und genehmigungsrechtliche Aspekte der erneuerbaren Wasserstoffherzeugung

Die Planung und Genehmigung von Elektrolyseanlagen ist ein Prozess, der sowohl zeit- als auch ressourcenintensiv ist. Ein entscheidender Faktor dabei ist die Gebietseinteilung, die gemäß der BauNVO regelt, welche Nutzungen in einem Baugebiet zulässig sind. Die folgende Abbildung 17 gibt einen Überblick über die derzeit zulässigen Flächen für den Bau einer Elektrolyseanlage.

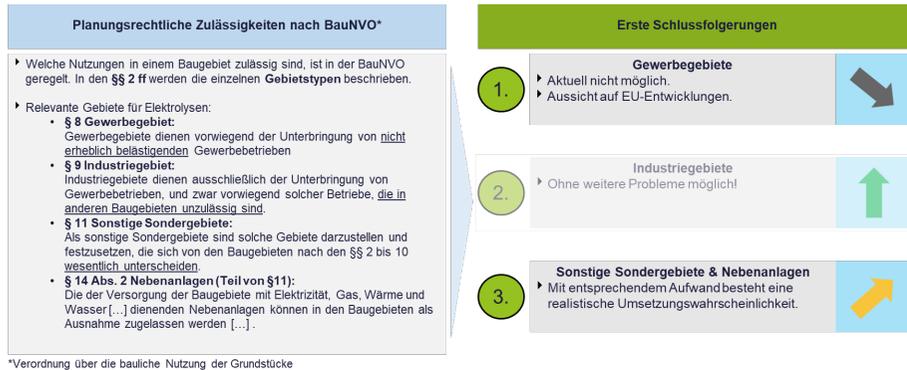


Abbildung 17: Übersicht der potenziellen Flächenarten für die Errichtung eines Elektrolyseurs

In Industriegebieten können Elektrolyseanlagen als Industrieanlagen stets errichtet werden, während dies in Wohngebieten ausgeschlossen ist. Eine genaue Betrachtung erfordert die Errichtung in anderen Gebieten, wie beispielsweise Gewerbegebieten. Aktuell ist der Bau von Elektrolyseanlagen dort nicht möglich, da sie potenziell die Kriterien der 4. und 9. BImSchV erfüllen und somit erhebliche Belästigungen verursachen könnten.

Doch die Überarbeitung der IE-Richtlinie auf europäischer Ebene könnte neue Perspektiven eröffnen. Der Vorschlag des Rates der EU sieht vor, in Anhang 1 einen spezifischen Tatbestand für Wasserstoff zu schaffen. Die vorgeschlagene Regelung unter Nummer 6.6 könnte Elektrolyseanlagen mit einer Produktionskapazität von über 60 Tonnen pro Tag von der immissionsschutzrechtlichen Genehmigungspflicht befreien. Dies könnte neue Möglichkeiten für die Genehmigung von Elektrolyseanlagen in Gewerbegebieten schaffen, wobei die Vorschriften der Störfallverordnung nach 12. BImSchV weiterhin gelten würden.

Darüber hinaus sind zwei weitere Gebiete für den Bau einer Elektrolyseanlage zulässig: Sondergebiete und als Nebenanlage in Gebieten zur Elektrizitäts-, Gas-, Wärme- und Wasserversorgung. In der Praxis wurden schon mehrmals sog. Sondergebiete für Elektrolyse geschaffen, um Elektrolyseanlagen zu

errichten. Hierbei ist sicherzustellen, dass das Gebiet mit den umliegenden Nutzungen kompatibel ist und nicht im Widerspruch zu den Festsetzungen des Flächennutzungsplans steht.

Schließlich besteht die Möglichkeit, Elektrolyseanlagen als Nebenanlage in den nach §§ 2 bis 11 festgelegten Baugebieten zu errichten. Unter Berufung auf den neu geschaffenen § 14 Abs. 4 BauNVO sind solche Anlagen in speziellen Sondergebieten zulässig, vorausgesetzt, sie erfüllen zusätzlich die Bedingungen des § 249 Abs. 4 BauGB. Dabei kann es sich insbesondere um Standorte handeln, an denen neben Strom aus PV-Anlagen auch andere EE-Anlagen angeschlossen werden können, vorausgesetzt, es ist technisch sichergestellt, dass der Wasserstoff ausschließlich aus dem Strom dieser Anlagen gewonnen wird.

In Deutschland gilt bei Genehmigungsverfahren das Prinzip der Konzentrationswirkung. Die Kernidee dieses Prozesses ist die hierarchische Organisation der Verfahren, und dementsprechend sind im Rahmen eines spezifischen Genehmigungsverfahrens alle untergeordneten Genehmigungen eingeschlossen. Hierzulande ist die Genehmigung von Elektrolyseuren im Rahmen des Genehmigungsverfahrens weitgehend durch das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) geregelt (vgl. Abbildung 18).

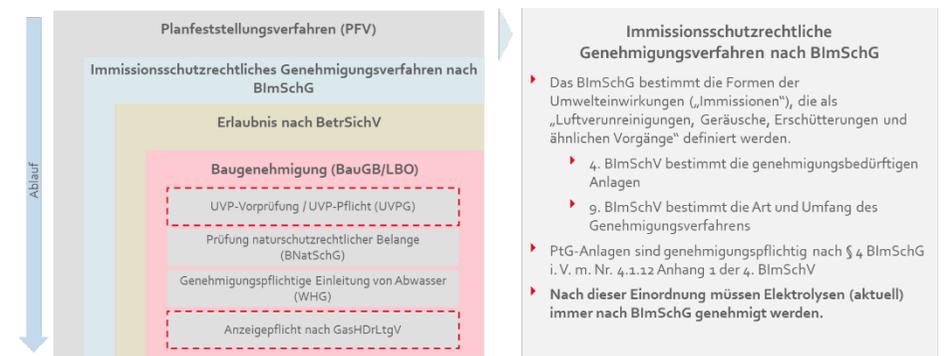


Abbildung 18: Übersicht des Genehmigungsverfahrens nach dem BImSchG

Gemäß § 4 Abs. 1 S. 1 des BImSchG sind Anlagen immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftig, wenn sie „auf Grund ihrer Beschaffenheit oder ihres Betriebs in besonderem Maße geeignet sind, schädliche Umwelteinwirkungen hervorzurufen oder in anderer Weise die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft zu gefährden, erheblich zu benachteiligen oder erheblich zu belästigen“. Die Anlagen, die eine Genehmigung benötigen, werden in der 4. BImSchV festgelegt. Power-to-Gas(PtG)-Anlagen, zu denen auch Elektrolyseure gehören, sind gemäß Nr. 4.1.12 Anhang 1 der 4. BImSchV i. V. m. § 4 BImSchG genehmigungspflichtig. Das bedeutet, dass Elektrolyseure derzeit stets nach den Vorgaben des BImSchG genehmigt werden müssen.

Es ist jedoch zu beachten, dass auf europäischer Ebene gemeinsam mit der IE-Richtlinie die Genehmigungsverfahren für Elektrolyseure derzeit überprüft werden. Dies könnte in Zukunft die Möglichkeit eröffnen, dass Elektrolyseure durch vereinfachte und gestraffte Genehmigungsverfahren zugelassen werden, was die Implementierung von Wasserstofftechnologien erleichtern würde.

Über die Genehmigung des Elektrolyseurs selbst hinaus sind auch weitere Genehmigungsverfahren für zusätzliche Komponenten innerhalb des Elektrolyse-Ökosystems erforderlich. Die nachfolgende Abbildung 19 illustriert die verschiedenen Komponenten und ihre jeweiligen Genehmigungsverfahren, um ein ganzheitliches Bild der notwendigen Schritte und Anforderungen in Bezug auf die Genehmigung zu geben. Die Kenntnis dieser Komplexität und die Berücksichtigung der unterschiedlichen Genehmigungsebenen sind entscheidend für eine erfolgreiche Projektumsetzung in diesem Bereich.

Teil der Anlage	Gesetzesgrundlage	Rechtliche Folgen
Wasserstoffherzeugung (chemische Umwandlung in industriellem Umfang)	Nr. 4.1.12 Anhang 1 4. BImSchV Nr. 4.2 der Anlage 1 UVP-G	<ul style="list-style-type: none"> Förmliches Genehmigungsverfahren nach § 10 BImSchG Industrieemissionsanlage (IE-Anlage)* Allgemeine Vorprüfung zur Feststellung der UVP-Pflicht nach § 7 Abs. 1 UVP-G
Wasserstofflagerung	Nr. 9.3.2 Anhang 1 und Nr. 17 Anhang 2 4. BImSchV Nr. 2.44 Angang 1 der 12. BImSchV	Lagerung bis 3 t → Erlaubnispflicht nach BetrSichV Lagerung ab 3 t → Vereinfachtes Verfahren nach § 19 BImSchG Lagerung ab 30 t → Förmliches Verfahren nach § 10 BImSchG Ab 5 t → Störfallbetriebsbereich mit Grundpflichten Ab 50 t → Störfallbetriebsbereich mit erweiterten Pflichten
Trailerbefüllstation Füllkapazität > 10 kg/h	§ 18 Abs. 1 Nr. 2 BetrSichV	<ul style="list-style-type: none"> Erlaubnispflicht nach BetrSichV Überwachungsbedürftig**
Gasfüllanlage (H ₂ -Tankstelle)	§ 18 Abs. 1 Nr. 3 BetrSichV	<ul style="list-style-type: none"> Erlaubnispflicht nach BetrSichV Überwachungsbedürftig
Pumpen, Wasseraufbereitungsanlage, Gasreinigungsanlagen, Verdichter etc. unterliegen außer der Baugenehmigung keiner zusätzlichen Genehmigungserfordernis		

Abbildung 19: Genehmigungsverfahren nach Teil der Anlage

6.2.1.d Schlussfolgerung

Die erneuerbare Wasserstoffproduktion wird sowohl durch nationale als auch europäische regulatorische Vorgaben geprägt. Dabei existieren mit RFBO und RFNBO zwei zentrale Ansätze zur Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff. Während die EU klare Richtlinien für RFNBOs definiert hat, befindet sich die Auslegung von RFBOs noch in nationalen Diskussionen. Die gesetzten Ziele sowie mögliche Sanktionen fördern verstärkt den Einsatz erneuerbarer Energien, insbesondere im Verkehrsbereich.

Die Rentabilität von erneuerbarem Wasserstoff hängt entscheidend von vier regulatorisch definierten Parametern ab. Wesentliche Faktoren sind hierbei die Herstellungsweise des Wasserstoffs – ob direkt an der Quelle oder über öffentliche Netze – sowie die Wahl der Stromerzeugungsart. Dabei sind die Stromkosten, zusammengesetzt aus den eigentlichen Bezugskosten und weiteren Nebenkosten, ein maßgeblicher Einflussfaktor. Ein optimaler Ansatz, der eine stetige Stromzufuhr direkt an der Quelle vorsieht, kann Kostenersparnisse von über 2 €/kgH₂ im Vergleich zu weniger optimalen

Konfigurationen erzielen. Das bedeutet, dass durch gezielte Entscheidungen in Bezug auf technische Aspekte und Stromquelle Kosteneinsparungen von bis zu 30 % realisierbar sind. Daher ist es essenziell, bestmögliche Methoden in Bezug auf Stromproduktion und -zufuhr zu berücksichtigen.

Diese Gegebenheiten bieten sowohl Chancen als auch Schwierigkeiten für den Sektor und unterstreichen die Relevanz von Regulierungen für die zukünftige Entwicklung der erneuerbaren Wasserstoffproduktion. Folglich zeigt sich, dass das regulatorische Umfeld trotz seiner Herausforderungen Chancen bietet, die Produktionskosten erheblich zu reduzieren.

6.2.2 Konkrete Anwendungsbeispiele

Im Rahmen der Projektidentifikation (siehe Kapitel 5.2) wurden fünf Akteure identifiziert, die Potenziale in den Bereichen der erneuerbaren Energieerzeugung oder der erneuerbaren Wasserstofferzeugung aufweisen. Es wurden sowohl ihre bestehenden Portfolios als auch ihre Projektideen gemeinsam betrachtet und weiterentwickelt.

Im nachfolgenden Abschnitt werden zunächst die einzelnen Akteure und ihre Initiativen detailliert beschrieben. Hierbei werden sowohl die bereits vorhandenen Kapazitäten als auch die konkreten Projektideen, die sich derzeit in der Planungsphase befinden, vorgestellt. Anschließend wird ein besonderer Fokus auf mögliche Synergien zwischen den potenziellen Projekten gelegt. In diesem Kontext wird analysiert, inwiefern die kombinierte Umsetzung verschiedener Projekte Mehrwerte schaffen kann, sei es durch die optimierte Nutzung von Infrastrukturen oder durch die Schaffung von Wertschöpfungsketten, die eine effizientere Nutzung der erzeugten Energie ermöglichen.

6.2.2.a Stadtwerke Kiel

Die Stadtwerke Kiel fungieren als großer Energieversorger in den Regionen Schleswig-Holstein, Hamburg, Niedersachsen und Bremen. In der Kieler Region betreiben sie das Küstenkraftwerk, ein modular aufgebautes

Gasmotoren-Heizkraftwerk, das nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung arbeitet. Diese Einrichtung, die über 20 individuell regelbare Gasmotoren verfügt, kann eine Leistung von 190 MW elektrisch und 192 MW thermisch erbringen und versorgt etwa 70.000 Kund*innen sowohl mit elektrischer Energie als auch mit Fernwärme.

Im Rahmen ihrer langfristigen Strategie planen die Stadtwerke Kiel, bis zum Jahr 2035 das Kraftwerk so umzurüsten, dass es mit Wasserstoff betrieben werden kann. Die für diesen Zweck benötigten großen Mengen an Wasserstoff erfordern eine Anbindung an die Pipelineinfrastruktur, um die kontinuierliche Versorgung mit Wasserstoff in den notwendigen Mengen sicherzustellen (siehe Kapitel 8.3.2). Parallel dazu sind die Stadtwerke Kiel in Besitz und Betrieb einzelner erneuerbarer Energieanlagen in der Region. Derzeit befinden sich über ein Joint-Venture Projekte mit einer Gesamtleistung von etwa 200 MW in Planung, die Wind- und Photovoltaikanlagen umfassen und potenziell mit der Wasserstofferzeugung gekoppelt werden könnten.

Darüber hinaus betreiben die Stadtwerke Kiel über eine Tochtergesellschaft drei Erdgaskavernenspeicher in der Region. Aktuelle Studien prüfen die Möglichkeit, diese Speicher in Zukunft zur Wasserstoffspeicherung zu nutzen. Allerdings steht eine Anbindung an ein Wasserstoffnetz bislang noch nicht fest.

6.2.2.b Müllverbrennung Kiel (MVK)

Die MVK ist Betreiber eines Müllheizkraftwerks in der Region Kiel, das als eine der emissionsärmsten Anlagen für die thermische Abfallverwertung (Waste-to-Energy) in Deutschland bekannt ist. Ein bedeutender Teil des Rohstoffs der Anlage stammt aus Siedlungsabfällen biogenen Ursprungs, die regulatorisch als CO₂-neutral betrachtet werden. Der biogene Anteil dieser Abfälle stellt eine potenzielle, konstante Stromquelle für die Erzeugung von RFBOs dar. Dabei trägt es nicht nur zur CO₂-neutralen Wärmeversorgung bei, sondern erweist sich auch als potenziell attraktiver Stromlieferant für Projekte im Bereich der Elektrolyse. Insbesondere generiert die MVK jährlich 15 GWh erneuerbaren Strom auf Basis von Abfällen biogenen Ursprungs. Diese erzeugte erneuerbare Energie könnte eine Schlüsselrolle in der zukünftigen Wasserstoffproduktion

durch Elektrolyse spielen, indem sie eine nachhaltige und lokal verfügbare Energiequelle darstellt.

Trotz der positiven Aspekte steht die Nutzung dieser erneuerbaren Energie für die Wasserstoffproduktion derzeit vor wirtschaftlichen Herausforderungen. Der Hauptgrund dafür sind die aktuellen hohen Strompreise, die eine unwirtschaftliche Nutzung dieser Energiequelle für die Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff bedingen. Jedoch ist es durchaus denkbar, dass sich diese Situation in der Zukunft ändert und die Nutzung der von der MVK erzeugten erneuerbaren Energie attraktiver wird.

6.2.2.c HanseWerk & Abfallwirtschaft Rendsburg-Eckernförde (AWR)

HanseWerk zeichnet sich als Energiedienstleister aus, der sich insbesondere auf den Netzbetrieb und die dezentrale Energieerzeugung spezialisiert hat. In jüngerer Zeit verstärkt das Unternehmen sein Engagement im Bereich Wasserstoff, indem es sich als Erzeuger und Lieferant von erneuerbarem Wasserstoff positioniert.

Die Abfallwirtschaft Rendsburg-Eckernförde (AWR) ist ein kommunales Unternehmen, dessen Kernaufgabe in der öffentlichen Abfallwirtschaft im Kreis Rendsburg-Eckernförde liegt. Im Einklang mit den Vorgaben der Clean Vehicles Directive (siehe Kapitel 7.2) plant die AWR aktiv die Dekarbonisierung ihrer eigenen Flotte von 50–60 Abfallsammlern sowie der Flotte eines regionalen Logistikbetreibers mit 20–30 LKWs. Dabei verfolgt die AWR eine Strategie der Nutzung erneuerbarer Gase, insbesondere in Form von synthetischem Methan.

In diesem Kontext haben HanseWerk und die AWR eine Zusammenarbeit für ein biologisches Methanisierungsprojekt ins Auge gefasst. HanseWerk würde innerhalb dieses Projektes die Versorgung mit erneuerbarem Wasserstoff als RFNBO übernehmen. Aktuell wird geprüft, ob die Wasserstoffbereitstellung zentral am Projektstandort oder dezentral durch Wasserstoffzulieferungen erfolgen soll. Für die Methanisierung ist eine installierte Wasserstoffkapazität

von etwa 5–6 MW erforderlich. Die derzeitige Planung sieht rund 6.500 Volllaststunden für den Elektrolyseur vor.

Regionale erneuerbare Energien stehen für die Umsetzung des Projektes zur Verfügung. Insbesondere kann ein regionaler Partner, der sich mit der Entwicklung und dem Betrieb von Wind- und Solar-PV-Anlagen befasst, über PPAs etwa 4.000 Volllaststunden für den Elektrolyseur sichern. Es wird erwartet, dass die zusätzlich benötigten Strommengen aus dem Portfolio von HanseWerk stammen werden.

Die Analyse des Wasserstofferzeugungsaspekts des Projektes offenbart ein potenzielles Spektrum der Wasserstoffgestehungskosten zwischen 6,13 €/kgH₂ und 9,71 €/kgH₂. Diese Varianz ergibt sich je nach Anlagenkonfiguration für die Vor-Ort-Erzeugung, wie in der Abbildung 20 dargestellt. Wenn ein Verhältnis von 1:2 zwischen der installierten Elektrolyseurkapazität und der installierten Wind- und PV-Kapazität beibehalten wird, kann der Elektrolyseur circa 5.935 Volllaststunden erreichen. Hierbei ist zu beachten, dass dies hinter den für das Projekt angestrebten 6.500 Volllaststunden zurückbleibt. Eine weitere Skalierung, beispielsweise auf ein Verhältnis von 1:3, könnte erforderlich sein, um diese Volllaststunden zu erreichen.

Standort Borgstedt: Wirtschaftlichkeit

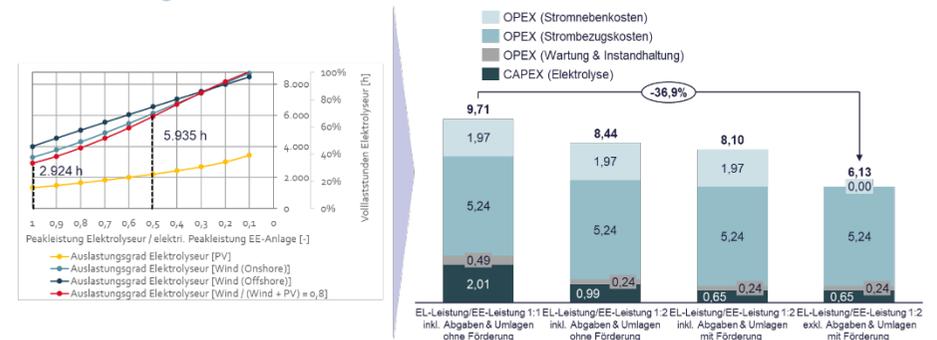


Abbildung 20: Beispielhafte Wasserstoffgestehungskosten am Standort Borgstedt

Trotzdem kann bei einer Skala von 1:2 ein Wasserstoffpreis von 8,44 €/kgH₂ ohne Fördermittel erreicht werden. Dieser Preis kann durch die Gewinnung von Fördermitteln für 45 % der Kapitalkosten des Elektrolyseurs auf 8,10 €/kgH₂ verbessert werden. Eine signifikante Kostenreduktion ist durch die Vermeidung von Stromsteuer sowie weiteren Abgaben und Umlagen realisierbar, was nur durch eine Direktleitung möglich ist. Dadurch könnten die Gesamtkosten auf 6,13 €/kgH₂ gesenkt werden. Diese Kosteneffizienz wird ggf. durch die um den Projektstandort herum in Entwicklung befindlichen Windparks ermöglicht.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im Vergleich zu einer Skalierung von 1:1 und der bestmöglichen Konfiguration im Maßstab 1:2 die Gesamtkosten um etwa 37 % reduziert werden können. Dies stellt eine signifikante Optimierung dar und zeigt das Potenzial für eine wirtschaftliche Umsetzung des Projektes, indem es die Schaffung einer nachhaltigen und kosteneffektiven Wasserstoffproduktion ermöglicht. Die Analyse unterstreicht die Notwendigkeit, die spezifischen Konfigurationen der Anlage sorgfältig zu betrachten und gleichzeitig das regulatorische Spielfeld auszunutzen.

6.2.2.d Kieler Verkehrsgesellschaft (KVG)

Wie bereits erwähnt, fungiert die KVG als Verkehrsunternehmen, das den Stadtverkehr in Kiel und der Umgebung mittels Stadtbussen betreibt. Im Einklang mit den kommunalen Vorgaben strebt die KVG eine vollständige Dekarbonisierung ihrer Busflotte bis zum Jahr 2030 an. Die Umrüstung der letzten 40-50 Busse auf Elektroantrieb in den Jahren 2028 bis 2030 wird aufgrund von technischen Herausforderungen in den aktuellen Planungen als schwierig angesehen. Eine Option wäre die Beschaffung und Verwendung von batterieelektrischen Bussen mit Übernachtladung, wenn die Batterietechnologie sich weiterentwickelt. Trotz der Tatsache, dass Busse mit Brennstoffzellen schwerer sind und den Platz im Fahrzeug einschränken, wurde Wasserstoff als eine alternative Lösung für diese Fahrzeuge in Betracht gezogen. Spezieller wird innerhalb des HyExperts-Projektes die Möglichkeit der Eigenproduktion von Wasserstoff weiterentwickelt.

Basierend auf der vorhergehenden Flottenanalyse würde ein Wechsel der derzeitigen Busse zu Brennstoffzellenbussen einen täglichen Wasserstoffbedarf von 1,8 Tonnen nach sich ziehen. Um diesen Bedarf zu decken, wäre eine Elektrolysekapazität von etwa 8 MW erforderlich, basierend auf rund 4.500 Volllaststunden pro Jahr. Unter Berücksichtigung der aktuellen sowie potenziell zukünftigen Standorte der Betriebshöfe, die alle im innerstädtischen Bereich liegen, erscheint eine Versorgung eines Elektrolyseurs über eine Netzverbindung zusammen mit begleitenden Stromlieferverträgen (PPAs) als die realistischste Konfiguration.

Mit dieser Konfiguration könnte Wasserstoff zu Kosten von etwa 9 €/kgH₂ erzeugt und betankt werden (vgl. Abbildung 21). Mit einem Preis von 9 €/kgH₂ präsentiert sich die Wasserstoffproduktion als eine wettbewerbsfähige Strategie zur Dekarbonisierung der verbleibenden Busflotte, wie die TCO-Betrachtung zeigt. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass dieser Preis stark von verschiedenen Fördermechanismen abhängig ist. Es wird sowohl eine CAPEX-Förderung von 80 % für die Betankungsanlage als auch von 45 % für den Elektrolyseur angenommen. Darüber hinaus wird indirekte OPEX-Förderung durch THG-Quoten von 4 €/kgH₂ gesichert.

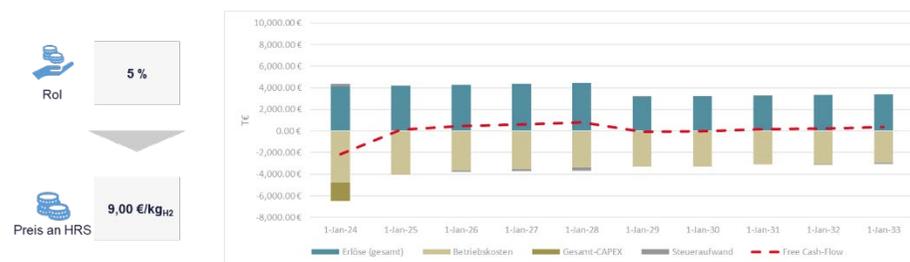


Abbildung 21: Beispielhafte Wasserstoffkosten im Zusammenhang mit dem Bedarf der KVG

Die KVG verfügt bereits über Erfahrung in der Vermarktung der durch ihren Elektrofuhrpark generierten THG-Quoten, durch die derzeit jährlich etwa 900.000 € an zusätzlichen Einnahmen erzielt werden. Dennoch ist der zugrunde liegende THG-Quotenpreis von 4 €/kgH₂ unsicher. In den letzten

Monaten ist der Preis für THG-Quoten gefallen. Allerdings könnten aktuelle Diskussionen über eine Erhöhung der Anrechenbarkeit von Wasserstoff im Rahmen der 38. BImSchV die Einnahmen aus Wasserstoff noch steigern. Daher erscheint ein Ansatz von 4 €/kgH₂ nicht allzu progressiv, sondern eher konservativ.

Obwohl diese Option attraktiv erscheint, wird die Wasserstoffproduktion durch die KVG durch aktuelle vergaberechtliche und gesellschaftsrechtliche Aspekte behindert. Als kommunales Unternehmen unterliegt die KVG dem Vergaberecht bei der Beschaffung von Treibstoffen, was auch für Wasserstoff gelten würde. Durch die Beteiligung an einem eigenen Erzeugungsprojekt könnte jedoch eine sogenannte „Inhouse-Fähigkeit“ erreicht werden, wodurch die KVG ihre Flotte direkt mit dem selbst erzeugten Wasserstoff versorgen könnte. Ein größeres Hindernis stellt der Gesellschaftsvertrag der KVG dar. Dieser erlaubt derzeit nicht den Verkauf von Wasserstoff an Dritte, was nicht nur die Zusammenarbeit mit anderen Projekten ausschließt, sondern auch potenzielle Kosteneinsparungen durch den Verkauf von überschüssigem Wasserstoff verhindert.

6.2.2.e Salzwasserelektrolyse

Schließlich untersucht das Unternehmen Geormar gemeinsam mit Partnern die potenzielle Nutzung der Salzwasserelektrolyse. Die Salzwasserelektrolyse stellt im Kontext der Wasserstoffproduktion eine signifikante und innovative Technologie dar, insbesondere für Küstenregionen wie die KielRegion. Dieses Verfahren beruht auf dem Prinzip der elektrochemischen Spaltung von Wasser (H₂O) in seine Bestandteile Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) unter Verwendung von Salzwasser als Elektrolyt. Besondere Relevanz erhält dieses Verfahren durch die potenzielle Nutzung des lokal verfügbaren Salzwassers der Ostsee, wodurch Ressourceneffizienz und regionale Verfügbarkeit in Einklang gebracht werden können. Die technischen Herausforderungen und Parameter der Salzwasserelektrolyse, insbesondere hinsichtlich Elektrodenmaterial und Korrosionsbeständigkeit, sind Gegenstand fortlaufender Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.

6.2.2.f Mögliche Synergien zwischen identifizierten Projekten

Im Rahmen der Analyse der Nutzungsmöglichkeiten erneuerbarer Wasserstoffherzeugung in der KielRegion wurde eine Vielzahl von Synergien identifiziert, die sich durch die Bündelung von Erzeugung in einem einzigen Projekt ergeben können. Zunächst können durch die Erhöhung der Elektrolysekapazität größere Maßstäbe und damit erhebliche wirtschaftliche Vorteile erzielt werden. Beispielsweise ermöglicht eine Steigerung der installierten Kapazität auf 10 MW deutliche Kosteneinsparungen pro kW, was etwa einer Reduktion von 20 % entspricht.

Daneben ergeben sich Vorteile in der Logistik durch zentralisierte Kompressoren, die den Bedarf an separaten Projektkompressoren reduzieren und damit bedeutende Einsparungen bei den Kapitalinvestitionen ermöglichen. Dies stellt angesichts der aktuellen Marktpreise für entsprechende Kompressionstechnologien einen wesentlichen finanziellen Vorteil dar.

Allerdings birgt die Bündelung der Nachfrage auch Nachteile. Zum einen erhöht sie das Risiko von Ausfällen und somit die Anforderungen an die Versorgungssicherheit. Dies kann zwar durch eingebaute Redundanzen gemindert werden, führt jedoch zu höheren Kapitalkosten und deutlich niedrigeren Effizienzen. Des Weiteren können je nach Transportmethode minimale bis signifikante zusätzliche Kosten entstehen, wobei der Rohrleitungstransport aufgrund der fehlenden Infrastruktur derzeit als unrealistisch gilt.

In Bezug auf ein potenzielles Verbundprojekt in der KielRegion ergibt sich eine spezifische Preismatrix (vgl. Abbildung 22). Die volatile Stromerzeugung erscheint aufgrund der aktuellen Gegebenheiten in der Region als die wahrscheinlichste Konfiguration, was in Wasserstoffgestehungskosten von etwa 9,28 €/kgH₂ bis 11,32 €/kgH₂ resultiert. Hierbei sind rund 1 € Transportkosten über eine Distanz von etwa 35 km zwischen den aktuellen Standorten von AWR und KVG enthalten. Darüber hinaus führt der Bau der notwendigen Kompressoren zu zusätzlichen Kosten für die AWR.

Verbundprojekt: Wirtschaftlichkeit



Abbildung 22: Beispielhafte Wasserstoffgestehungskosten eines Verbundprojektes

Schließlich ist die Umsetzung des Konzeptes durch die rechtliche Struktur und die daraus resultierenden gesetzlichen Verpflichtungen der KVG erheblich eingeschränkt. Aufgrund ihrer Eigenschaft als kommunales Unternehmen unterliegt sie strengen Vorgaben bezüglich der Vergabe. Selbst bei einer deutlichen Beteiligung an der Gesellschaft, um eine „Inhouse-Fähigkeit“ zu ermöglichen, wäre die KVG aufgrund ihres Gesellschaftervertrages nicht in der Lage, Wasserstoff zu verkaufen, was die Projektkonfigurationen erheblich einschränkt. Demnach erscheint als die einzige realistische Option der Bau eines größeren Elektrolyseurs durch die AWR, um Wasserstoff an die KVG zu verkaufen, obwohl die Unsicherheiten bezüglich der Vergabe und die zusätzlichen Kosten für die AWR diese Option unattraktiv machen.

Angesichts der vielschichtigen Aspekte, die in dieser Analyse beleuchtet wurden, besteht ein dringender Bedarf an weiterführender Vernetzung und Diskussion, um einen fundierten Rahmen für die zukünftige Entwicklung der Wasserstoffinfrastruktur in der KielRegion zu schaffen.

6.2.2.g Schlussfolgerung

Die KielRegion zeigt ein großes Potenzial für die Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff. Während Unternehmen wie AWR und KVG sich aktiv für die Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft engagieren, stehen sie vor zahlreichen Herausforderungen, insbesondere im Bereich der Kosten, der

Logistik und der rechtlichen Einschränkungen. Dennoch weisen die Untersuchungen auf erhebliche Synergien hin, die durch die Zusammenarbeit und Bündelung von Ressourcen realisiert werden könnten, was wirtschaftliche Vorteile bietet. Insbesondere könnten die Skaleneffekte und zentrale Infrastrukturen die Gesamtkosten der Wasserstoffherzeugung senken. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass rechtliche und organisatorische Barrieren, wie die Vergabevorschriften für kommunale Unternehmen und Gesellschaftsverträge, kritisch hinterfragt und möglicherweise überarbeitet werden müssen, um eine effiziente und wirtschaftliche Wasserstoffproduktion und -nutzung in der Region zu gewährleisten. Es wird deutlich, dass weitere Vernetzung und Diskussionen erforderlich sind, um eine tragfähige und zukunftsfähige Wasserstoffstrategie für die KielRegion zu entwickeln. Das Ziel sollte es sein, sowohl die wirtschaftlichen als auch die ökologischen Vorteile von erneuerbarem Wasserstoff optimal zu nutzen und gleichzeitig die Hürden, die seiner breiten Anwendung im Wege stehen, zu überwinden (siehe Kapitel 9).

7 WASSERSTOFFNUTZUNG

In regionalen Kontexten stehen kommunale und private Akteure vor massiven Herausforderungen bei der Dekarbonisierung des öffentlichen Verkehrs sowie lokaler Unternehmen und Industrien. Der Klimaschutzplan der Bundesregierung hat zudem für den Verkehrssektor bis 2030 eine ambitionierte Reduktion der CO₂-Emissionen um 40% gegenüber dem Niveau von 1990 festgelegt, obwohl die Emissionen aus diesem Sektor seit 1990 nahezu unverändert geblieben sind. Ebenso plant die Bundesregierung, wenn auch in weniger konkreten Zielen, die Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme bis spätestens 2045 zu dekarbonisieren.

Um dieses ehrgeizige Ziel zu erreichen, muss der CO₂-Ausstoß drastisch reduziert werden. Bei der Planung von Transformationspfaden für beide Sektoren treten zentrale Fragen in den Vordergrund: Wie lässt sich der öffentliche Verkehr effizient dekarbonisieren, ohne zusätzliche Steuerbelastungen zu erzeugen? Und auf welche Weise kann in neuen Gewerbegebieten eine nachhaltige Wärmeversorgung gewährleistet werden? In diesem Kontext könnte Wasserstoff eine Schlüsselrolle übernehmen, wobei sowohl technische Realisierbarkeit als auch wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden müssen.

Dieses Kapitel setzt sich intensiv mit den Möglichkeiten von Wasserstoffnutzung im regionalen Kontext der KielRegion auseinander. Im ersten Abschnitt werden typische Kennwerte für eine H₂-basierte Wärmeversorgung vorgestellt und anhand eines konkreten Anwendungsbeispiels erläutert. Der zweite Abschnitt fokussiert auf die Grundlagen eines H₂-basierten öffentlichen Personennahverkehrs und illustriert diese durch zwei prägnante Beispiele.

7.1 WASSERSTOFFNUTZUNG IN GEWERBEGEBIETEN

Im Rahmen des Teilprojektes Wasserstoffnutzung des Projektes „HyExperts KielRegion“ wurden Möglichkeiten und Technologien zur Wasserstoffnutzung in Gewerbegebieten näher betrachtet. Gewerbegebiete stehen ebenfalls vor

den Herausforderungen, die Betriebe zu dekarbonisieren. Typische Anwendungsfälle sind die Dekarbonisierung von Prozesswärme, die Umstellung der Gebäudeversorgung als auch die Umstellung des Fuhrparks. Bei der konkreten Planung zu einem Transformationspfad oder aber auch bei der Auszeichnung neuer Gewerbegebiete stellt sich die Frage, wie die notwendige Wärmeversorgung bereitgestellt werden kann. Diese hängt neben der technischen Machbarkeit von vielen wirtschaftlichen Faktoren ab. Welche Wärmepreise sind wirtschaftlich für ein Unternehmen noch tragbar, oder wann findet die natürliche Reinvestition in die Anlagentechnik statt? Ziel der Analysen war es, Potenziale aufzuzeigen, um den CO₂-Ausstoß zu vermindern.

Wasserstoff ist ein energiereicher und vielseitiger Brennstoff, der als einer der am vielseitigsten einsetzbaren Energieträger der Zukunft gilt. Insbesondere in Gewerbegebieten eröffnen sich zahlreiche Möglichkeiten zur Nutzung von Wasserstoff, um sowohl die Energieeffizienz zu erhöhen als auch die Umwelt- und CO₂-Belastung zu reduzieren. Die Nutzung von grünem Wasserstoff als sauberer Energieträger kann dabei dazu beitragen, den Energiebedarf von Unternehmen zu decken und gleichzeitig einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten.

In diesem Zusammenhang ist es wichtig, zu betonen, dass Wasserstoff nicht nur als Brennstoff in der Mobilität eingesetzt werden kann, sondern auch in der Stromerzeugung, der Wärmeversorgung sowie der industriellen Produktion von Chemikalien und Materialien. Durch die Nutzung von Wasserstoff als sauberer Energieträger können somit viele Branchen in Gewerbegebieten von den Vorteilen profitieren.

Die Umstellung auf Wasserstoff als Energieträger erfordert jedoch erhebliche Investitionen in die Infrastruktur und die Technologieentwicklung. Es sind auch Herausforderungen bei der Wasserstoffproduktion und -speicherung zu berücksichtigen, um eine wirtschaftlich tragfähige Lösung zu finden.

Um diese und ähnlich gelagerte Fragestellungen beantworten zu können, werden in diesem Kapitel typische Kennwerte für eine H₂-basierte Wärmeversorgung hergeleitet und dargestellt. Die Erkenntnisse werden

exemplarisch an zwei Akteuren des Gewerbegebietes HIP Wellsee veranschaulicht.

7.1.1 Konkrete Anwendungsbeispiel HIP-Wellsee

7.1.1.a Prozesswärme

Innerhalb der Produktionsprozesse von zwei repräsentativen Unternehmen im Gewerbegebiet Kiel-Wellsee wird Prozesswärme benötigt. Die Prozesswärme erreicht Temperaturen bis zu 290 °C. Diese Prozesswärme wird derzeit vorwiegend durch Verbrennung von fossilen Brennstoffen (i. d. R. Erdgas) bereitgestellt. Elektrische Anlagen spielen nur eine untergeordnete Rolle. Großbäckereien und Großwäschereien sind repräsentative und zugleich unterschiedliche Anwendungsfälle im Bereich der Prozesswärme.

Beispielhaft wird eine Großbäckerei mit Etagendurchlauföfen angenommen. Der Etagendurchlaufofen funktioniert mit Thermoölumwälzung. Das Thermoöl wird mit einem Erhitzer auf die notwendige Temperatur gebracht. Der Erhitzer ist mit Erdgas betrieben und verursacht Brennstoffkosten zwischen 7 und 12 ct/kWh. Der jährliche Wärmebedarf beläuft sich auf 3.500 MWh. Die weiteren Randbedingungen können aus dem beigefügten Foliensatz (Anhang 2_HyExp_KielRegion_Gewerbegebiet.pptx) entnommen werden.

Beispielhaft wird eine Großwäscherei mit Hochdruckdampfkessel betrachtet. Weitere Prozesse sind in dieser Analyse ausgenommen. Der Dampf wird über die Verbrennung von Erdgas erzeugt. Die Brennstoffkosten liegen zwischen 7 und 15 ct/kWh. Der jährliche Wärmebedarf beläuft sich auf 6.300 MWh. Die weiteren Randbedingungen können aus dem beigefügten Foliensatz (Anhang 2_HyExp_KielRegion_Gewerbegebiet.pptx) entnommen werden.

Die betrachteten Unternehmen streben an, bis spätestens 2050 klimaneutral zu produzieren, und verfolgen eigene Nachhaltigkeitsziele. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe muss daher zeitnah durch erneuerbare Brennstoffe oder erneuerbaren Strom ersetzt werden.

Die bestehenden Anlagen zur Wärmeerzeugung nutzen Erdgas als Brennstoff und sind daher nicht mit den Nachhaltigkeitsbestrebungen vereinbar.

Für eine Umstellung auf klimaneutrale Technologiealternativen besteht die Bedingung der Wirtschaftlichkeit gegenüber den bestehenden Lösungen.

Weiterhin fehlt es an Wissen und einem Überblick zu aktuellen Technologien und Möglichkeiten.

Deshalb wurden innerhalb des Teilprojektes folgende Fragen diskutiert:

- Können erneuerbare Energien, insbesondere Wasserstofftechnologien, die bestehenden Produktionsanlagen ablösen?
- Sind Wasserstofflösungen eine wirtschaftliche Alternative?

Mit Erdgas betriebene Erhitzer oder Dampfkessel können bereits heute zu H₂-ready-Wärmeerzeugern umgebaut oder durch neue H₂-ready-Technologien ausgetauscht werden. (Siehe Anhang 2_HyExp_KielRegion_Gewerbegebiet.pptx)

H₂-Öfen und H₂-Verdampfer werden schon heute in Pilotprojekten in Deutschland und Europa erfolgreich erprobt. Im Forschungsprojekt „Wasserstoff – grünes Gas für Bremerhaven“ entwickelt das TTZ Bremerhaven als Teilprojekt einen Wasserstoffbackofen für Bäckereien und Konditoreien. Das gesamte Projekt wird von der Europäischen Union mit 20 Mio. € unterstützt und soll klimafreundliche Lösungen für die Lebensmittelindustrie aufzeigen. Im näheren Umfeld des Testlabors entsteht dafür ein 10 MW Elektrolyseur, welcher Windenergie aus einem lokalen Windpark nutzt. Im Energiepark Wunsiedel erzeugt ein BOSCH Heizkessel der Serie UT-L Wärmeenergie für ein Sägewerk. Ein 9 MW Elektrolyseur und Power-to-Heat-Anlagen erzeugen in Kombination mit Strom aus erneuerbaren Quellen rund 5 MW Wärmeenergie für die Raumwärme und Trocknung von Sägewerk-Produkten. Zur Wirtschaftlichkeit beider Piloten kann keine abschließende Aussage getroffen werden, da die Projekte noch nicht beendet sind. (Siehe Anhang 2 HyExp_KielRegion_Gewerbegebiet.pptx)

H₂-basierte Wärmeerzeugungstechnologien können technisch sehr gut in die Energieprozesse einer Großwäscherei integriert werden. Weitere Informationen können aus (Anhang 2_HyExp_KielRegion_Gewerbegebiet.pptx) entnommen werden.

Deshalb wurden diese Technologien in dem Teilprojekt betrachtet und in ihrer Wirtschaftlichkeit verglichen. Aus den beigefügten Folien ist erkennbar, dass die Wasserstoffsysteme nach heutigen Bedingungen nicht wirtschaftlich sind. Die Berechnungen betrachten allerdings nur den Fall, dass Wasserstoff als Brennstoff extern eingekauft wird. Sollten Elektrolyseure vor Ort aufgestellt und mit erneuerbarem Strom betrieben werden, kann sich die Wirtschaftlichkeit durch geringere Wasserstoffgestehungskosten verbessern.

Zum heutigen Zeitpunkt sind die Wasserstoffsysteme für sich allein nicht wirtschaftlich. Die Wärmegestehungskosten für Prozesswärme in einer Großbäckerei betragen 38 ct/kWh. Eine Großwäscherei muss mit Kosten von 35 ct/kWh rechnen. Im Vergleich liegen die aktuellen Wärmegestehungskosten zwischen 9 und 13 ct/kWh. Diese Kosten werden ohne einen steigenden CO₂-Preis langfristig stabil bleiben. Diese hohen Kosten entstehen hauptsächlich durch die Brennstoff- und Transportkosten für Wasserstoff. Verändern sich die Brennstoffkosten von den angenommenen 8 €/kg auf 5 €/kg, sinken die Gestehungskosten auf ca. 25 ct/kWh. Neben einer Umstellung auf Wasserstoff kann auch mit Strom Prozesswärme bereitgestellt werden. In dieser Variante erzeugt ein Elektrodenheizstab mit erneuerbarem Strom die Wärme. Diese Variante ist im Vergleich mit der Ist-Situation ebenfalls nicht wirtschaftlich. Eine Großbäckerei zahlt 22,5 ct/kWh und eine Großwäscherei zahlt 22,6 ct/kWh für die Prozesswärmeerzeugung mit Strom (vgl. Abbildung 23).

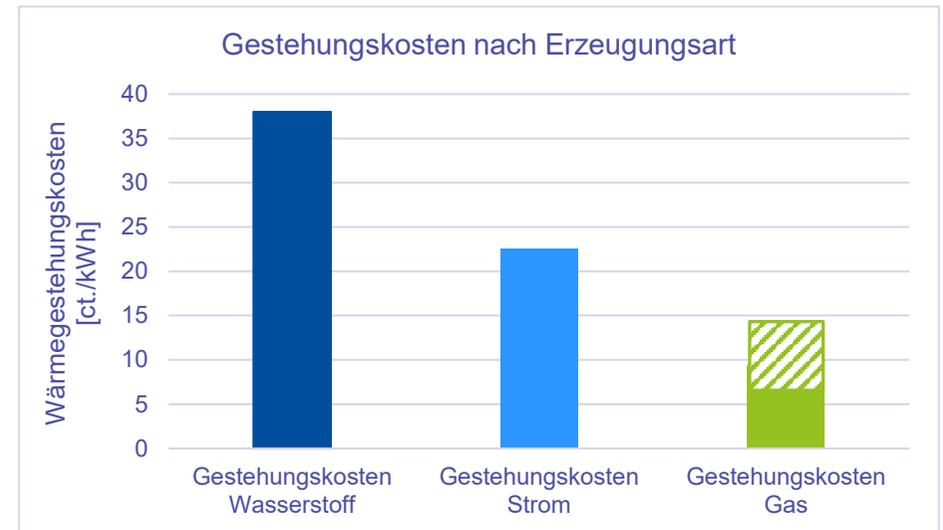


Abbildung 23 Wärmegestehungskosten nach Erzeugungart

Eine Maßnahme zur Senkung der Brennstoffkosten ist oben genannt. Ein mit erneuerbarem Strom betriebener Elektrolyseur kann den Zukauf von Wasserstoff verringern und ermöglicht zudem die Verwendung von Abwärme zur Raumheizung. Die Gestehungskosten für die Raumwärme werden in dieser Betrachtung jedoch nicht gesondert betrachtet.

Ein Wasserstoffsystem zu diesem Zeitpunkt zu installieren, ist unter den getroffenen Annahmen nicht wirtschaftlich. Neben der Wirtschaftlichkeit sollte allerdings auch die langfristige Strategie und die Nachhaltigkeit gegenüber den fossilen Alternativen einen Einfluss auf die Investitionsentscheidung nehmen. (Siehe dazu Sensitivität des CO₂-Preises in Anhang 2_HyExp_KielRegion_Gewerbegebiet.pptx)

7.1.1.b Abwärmenutzung

Als Abwärme bezeichnet sich generell das Nebenprodukt Wärme bei Industrieprozessen oder der Energieerzeugung. Die Abwärme aus den

Prozessen der betrachteten Unternehmen wird bisher nicht weiterverwertet und geht ungenutzt verloren. Mit der vorhandenen Abwärme lassen sich beispielsweise Raumwärme und Warmwasser erzeugen. Es entgehen den Unternehmen durch die Nichtnutzung daher Effizienzsteigerungen und Kosteneinsparungen.

Die Beispiele Großbäckerei und Großwäscherei sind repräsentative Anwendungsfälle im Bereich der Abwärmeeinbindung. Die dort entstehende Prozesswärme liegt nach der Produktion in einem optimalen Temperaturniveau für Wärmepumpen vor (60–70 °C).

Abwärme unterschiedlichster Temperaturen kann mithilfe von Wärmepumpen nutzbar gemacht werden. Der Einsatz ist technisch machbar und wirtschaftlich sinnvoll. Die Wärmepumpe entzieht der Umgebungsluft Wärme und gibt sie kombiniert mit der Produktionsabwärme an den Heizkreislauf ab. Die Temperaturniveaus können bis zu 80 °C im Vorlauf erreichen.

Mit Wasserstoffsystemen ergibt sich eine weitere Möglichkeit der Abwärmennutzung. Elektrolyseure geben während der Wasserstoffproduktion etwa 18 % der Leistung als Wärme an die Umwelt ab. Diese Wärme im Bereich 40–60 °C kann in den Heizkreislauf eingespeist werden.

Für eine Großbäckerei kann von einem jährlichen Wärmebedarf von 350 MWh Raumwärme ausgegangen werden. Die maximale Heizleistung liegt bei 318 kW. Bei einer Großwäscherei ergeben sich bis zu 720 MWh mit 790 kW maximaler Heizleistung.

Die bestehende Heizungsanlage kann als Redundanz und Ausfallsicherung weiterbetrieben werden.

Um die gesetzten Nachhaltigkeitsziele zu erreichen, sollten die ungenutzten Potenziale der Abwärme aus Industrieprozessen und Elektrolyse nutzbar gemacht werden. Aktuell wird die Raumwärme über fossile Brennstoffe wie Erdgas erzeugt und ist daher nicht mit den Nachhaltigkeitszielen vereinbar. Den Unternehmen fehlt bisher das Wissen über verfügbare Technologien und die wirtschaftlichen Auswirkungen. Voraussetzung für eine erfolgreiche

Abwärmeeinbindung ist ein zentrales Lüftungssystem oder eine Fußbodenheizung in den Räumen der Unternehmen. Weiterhin müssen die Maßnahmen wirtschaftlich gegenüber den bestehenden Erzeugungsanlagen sein.

Deshalb wurden innerhalb des Teilprojektes folgende Fragen diskutiert:

- Wie können die Abwärmepotenziale erschlossen werden?
- Welche Technologien sind verfügbar?
- Wie sieht eine Handlungsempfehlung aus?

Zur Glättung der Heizlast kann überschüssige Abwärme in Pufferspeichern gehalten und bei steigenden Bedarfen an den Heizkreislauf abgegeben werden. Der Pufferspeicher kann zwischen 50 und 3000 m³ Warmwasser speichern.

Die Abwärme der Produktion kann für die Gebäudeheizung weiterverwendet werden und senkt dadurch Betriebskosten. Effektiv erhöht sich auch die Effizienz der eingesetzten Anlagen. Ein vor Ort aufgestellter Elektrolyseur kann neben Wasserstoff auch Abwärme liefern. Für die angenommenen Unternehmen ergeben sich unterschiedliche Elektrolyseurgrößen und Abwärmepotenziale.

Der 2-MW-Elektrolyseur für die betrachtete Großbäckerei kann mit durchschnittlich 360 kW Abwärmeleistung zur Deckung beitragen. Bei 6.500 Vollbenutzungsstunden kann der gesamte Raumwärmebedarf mit 18 % der entstehenden Elektrolyse-Abwärme gedeckt werden. Es bleiben zusätzliche Potenziale, die an weitere Abnehmer verkauft werden können.

Im Anwendungsfall für die Großwäscherei können durchschnittlich 540 kW Abwärmeleistung aus dem 3-MW-Elektrolyseur ausgekoppelt werden. Mit 5.400 Vollbenutzungsstunden werden 26 % der entstehenden Elektrolyse-Abwärme direkt verwertet. Die ungenutzten Wärmemengen können gewinnbringend an weitere Abnehmer im Umkreis verkauft werden.

Die im folgenden Absatz als Wärmegestehungskosten bezeichneten Kosten setzen sich aus den kapitalgebundenen und den laufenden Kosten zur

Erzeugung der Wärme zusammen. Wird die Gesamtsumme dieser beiden Posten durch den Wärmebedarf geteilt, ergeben sich die Kosten in ct/kWh.

Das Szenario der Großbäckerei ist mit 21 ct/kWh Wärmegestehungskosten nicht wirtschaftlich gegenüber dem bestehenden System. Das Szenario einer Großwäscherei ist mit 13 ct/kWh wirtschaftlich. In beiden Anwendungsfällen wird jeweils eine Sticheleitung vom aufgestellten Elektrolyseur zum Unternehmen geplant. Die Länge der Wärmezuleitung von Elektrolyseur zur Wärmesenke ist ein entscheidender Kostentreiber. Bei unter 500 m Entfernung ist das System für eine Großwäscherei wirtschaftlicher als der Ist-Zustand. Im Anwendungsfall der Großbäckerei ist auch mit kurzen Leitungswegen kein wirtschaftlicher Bereich erreichbar. Der Abwärmepreis beeinflusst die Wirtschaftlichkeit ebenfalls. Ab Wärmepreisen > 1,5 ct/kWh ist das System in beiden Fällen nicht mehr eindeutig wirtschaftlich (vgl. Abbildung 24).

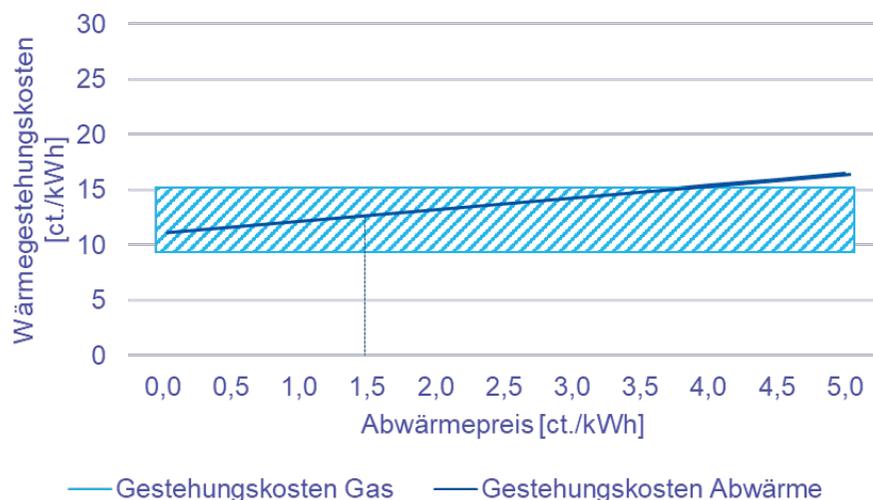


Abbildung 24 Wärmegestehungskosten nach Bezugsform über Gas oder Abwärme

Unter den getroffenen Annahmen kann die Abwärmeeinbindung einen sinnvollen wirtschaftlichen Beitrag zur Deckung der Raumwärme leisten. Durch

die angenommenen Gaskosten zwischen 10 ct/kWh und 15 ct/kWh, ist die Nutzung der Elektrolyseabwärme derzeit nicht wirtschaftlich. Neben der Wirtschaftlichkeit sollten aber auch Kriterien wie die Nachhaltigkeit und Zukunftssicherheit beachtet werden. Hier überwiegen die Vorteile der Abwärmenutzung.

7.1.1.c Mobilität

Wasserstoff kann eine Schlüsselrolle bei der Dekarbonisierung der Mobilität in Gewerbe- und Industrieparks spielen. Angesichts der Herausforderungen, die sich aus den Anforderungen an den Schwerlastverkehr sowie die leichten Transportfahrzeuge und ferner an PKW ergeben, steht Wasserstoff als vielversprechende Alternative zu herkömmlichen Treibstoffen im Mittelpunkt der Betrachtungen. Die speziellen Anforderungen u. a. in Bezug auf Reichweiten, Betankungszeiten und Schichtbetrieb machen den Einsatz von Wasserstoff insbesondere für den Schwerlastverkehr technisch attraktiv. Dabei steht die Wasserstofftechnologie im direkten Vergleich mit anderen Technologien, insbesondere batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen, und muss sich in verschiedenen Aspekten, vor allem in der Wirtschaftlichkeit, behaupten. Im Rahmen der Überlegungen stellt sich die Frage, inwiefern Wasserstofftechnologie in der Abwägung zu anderen Technologien, insbesondere batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen, als angemessene Alternative für die verschiedenen Verkehrsmittel im kommerziellen und industriellen Umfeld hervorgeht.

Um die Wirtschaftlichkeit einer auf Wasserstoff basierenden Lösung zu beurteilen, wurde der bestehende Fuhrpark der in Betracht gezogenen Großbäckerei und Großwäscherei untersucht und mit dem Diesel-Status-quo verglichen. In dieser Untersuchung wurden typische Fahrprofile sowohl für leichte Fahrzeuge als auch für Schwerlastfahrzeuge berücksichtigt. Für die leichten Fahrzeuge wurden jährliche Laufleistungen von 20.000 km und 60.000 km in Erwägung gezogen, während für die Schwerlastfahrzeuge Laufleistungen von 30.000 km und 60.000 km analysiert wurden. In jedem Szenario wurde von

einem Netto-Wasserstoffpreis von 9,00 €/kgH₂⁵ und einem Dieselpreis von 2,20 €/l ausgegangen.

Bei den leichten Fahrzeugen erwies sich jedes Wasserstoffszenario als leicht bis deutlich günstiger im Vergleich zur Dieselalternative (vgl. Abbildung 25). Bei einer Laufleistung von 20.000 km/a ist das Wasserstoffszenario um 1 €/km günstiger, wobei sich dieser Vorteil erhöht, wenn man die potenziellen Klimakosten für den Diesel berücksichtigt. Darüber hinaus kann eine 80%ige Förderung der Mehrkosten für Brennstoffzellenfahrzeuge die Kosten sogar weiter auf 0,50 €/km senken, was 4 €/km günstiger ist als die Dieselvariante. Mit steigender Laufleistung auf 60.000 km/a bleibt dieser Trend erhalten, allerdings reduziert die Förderung die Kosten in diesem Fall nur um 1 €/km.

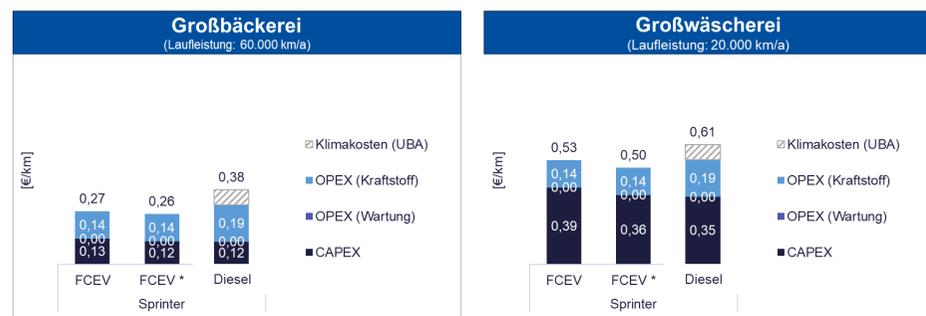


Abbildung 25: TCO-Betrachtung der Sprinter

Im Fall der Schwerlastfahrzeuge ist eine erhebliche Förderung von 80 % der zusätzlichen Kosten erforderlich, um eine Wettbewerbsfähigkeit mit der Dieselalternative zu erreichen (vgl. Abbildung 26). Mit zunehmender Laufleistung von 30.000 km/a auf 60.000 km/a verringert sich jedoch die Kostendifferenz. Dies ist auf die Verteilung der Kapitalkosten auf mehr

Kilometer sowie auf die geringeren Betriebskosten für Brennstoffzellenfahrzeuge zurückzuführen. Bei einer Laufleistung von 30.000 km/a liegen die Kosten für das geförderte FCEV-Szenario bei 1,66 €/km, während die Dieselalternative 1,42 €/km kostet. Unter Berücksichtigung der Klimakosten gemäß UBA⁶ steigen die Kosten für Diesel auf 1,85 €/km. Angesichts der Unsicherheit bezüglich der Einbeziehung von leichten Nutzfahrzeugen in zukünftige Emissionshandelssysteme stellen diese Schätzungen die bestmögliche Annäherung an die mit dem Einsatz des Fahrzeugs verbundenen Umweltkosten dar. Mit steigender Laufleistung fallen die Kosten für das geförderte FCEV-Szenario auf 1,16 €/km, während die Dieselvariante 1,03 €/km (1,43 €/km mit Klimakosten) beträgt. Die Kostendifferenz schrumpft somit von 0,24 €/km auf 0,13 €/km.

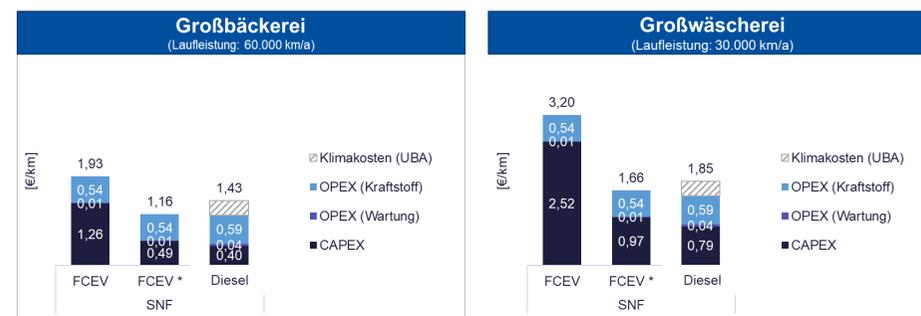


Abbildung 26: TCO-Betrachtung der Schwerlastfahrzeuge

Für die Zukunft ist zu erwarten, dass die Serienproduktion von Brennstoffzellenfahrzeugen zu sinkenden Kapitalkosten führen wird, was den Kostenvorsprung der Dieselschnelle weiter verringern dürfte.

⁵ Diese sind spezifische Wasserstoffpreise an der Wasserstofftankstelle, die auf Basis von zehn Jahren und mit einer Rendite von 5% berechnet wurden. In die Berechnung wurde die Treibhausgasminderungs-Quote mit einem Wert von 4 €/kgH₂ einbezogen.

⁶ Der Verkehr verursacht nicht nur Emissionen von Luftschadstoffen und Treibhausgasen, sondern auch Lärmbelastungen und negative Auswirkungen auf Natur und Landschaft, wie beispielsweise

die Zerschneidung der Landschaft. Zur Bestimmung der Kostensätze für den Straßenverkehr in Deutschland berücksichtigt das Umweltbundesamt die Emissionen aus dem Betrieb verschiedener Fahrzeugtypen sowie indirekte Emissionen aus anderen Lebenszyklusphasen wie Herstellung, Wartung, Entsorgung und Kraftstoffbereitstellung.

Die Untersuchung zeigt ein deutliches Potenzial für die Implementierung von Wasserstoffmobilitätslösungen in Gewerbe- und Industrieparks. Insbesondere im Bereich der leichten Nutzfahrzeuge sowie bei anderen Fahrzeugflotten mit höheren jährlichen Laufleistungen kann der Einsatz von Wasserstoff eine wirtschaftlich sinnvolle und nachhaltigere Alternative zu Dieselantrieben bieten. Die Berücksichtigung potenzieller Klimakosten verstärkt diesen Trend noch. Weiterhin ist zu erkennen, dass die kontinuierliche Förderung und der technologische Fortschritt, insbesondere durch die Serienproduktion von Brennstoffzellenfahrzeugen, in Zukunft eine noch wettbewerbsfähigere Position von Wasserstoff gegenüber herkömmlichen Kraftstoffen ermöglichen könnten. Daher präsentiert sich Wasserstoff als eine vielversprechende Option zur Dekarbonisierung der Mobilität in Gewerbe- und Industrieparks.

7.1.2 Gewerbegebietsblaupause

Zukünftige Gewerbegebiete in der KielRegion sollen möglichst von Beginn an die Wasserstoffproduktion und Abwärmenutzung mitdenken. Die Anforderungen können bei der Planung eines neuen Gewerbegebiets in der Regel ohne besondere Maßnahmen berücksichtigt werden. Eine Liste mit Anforderungen an das auszuweisende Gebiet (Anhang 3_HyExpKielRegion_Gewerbegebiet_Blaupause.pptx) kann eingesehen werden. Besonders wichtig sind die korrekte Einschätzung des Flächenbedarfs und die Verfügbarkeit der notwendigen Spartenanschlüsse. Weiterhin sollte frühzeitig kalkuliert werden, welche Abwärmemengen tatsächlich produziert und wieder abgenommen werden können. Ebenfalls gilt es, die notwendigen Temperaturniveaus der Wärmeabnehmer zu beachten. Anschlussnehmer im Gewerbegebiet mit einer Großwärmepumpe zu versorgen, ist bereits heute technisch möglich. Der Raum- und Warmwasserbedarf kann gedeckt werden. Prozesswärme wird dezentral durch weitere Erzeugungsanlagen bereitgestellt. Basierend darauf, welche Unternehmen sich im Gewerbegebiet ansiedeln, können weitere Synergien entstehen. Aus produzierendem Gewerbe lässt sich wiederum Abwärme zurückspeisen oder in ein umliegendes Nahwärmenetz einspeisen. Die notwendigen Windräder und Photovoltaik-Flächen zur Energieversorgung der Großwärmepumpe können in Spitzenlastzeiten Strom

ins lokale Netz einspeisen. Auf diese Weise tragen Gewerbegebiete in Wohngebietsnähe zu einer sicheren lokalen Wärme- und Stromversorgung bei.

Im Vergleich zu anderen regenerativen Quellen wie Wasserstoff und Biomethan ist die Wärmepumpe zusätzlich die günstigste Variante. Es können Gesteungskosten von < 3 ct/kWh realisiert werden. Großwärmepumpen sind somit technisch und wirtschaftlich realisierbar.

7.1.3 Gewerbegebietstool

Um Gewerbegebiete, die mithilfe der Blaupause skizziert werden, wirtschaftlich bewerten zu können, wurde innerhalb des Projektes ein Excel-basiertes Bewertungstool entwickelt. Mithilfe dieses Tools kann die Wasserstoff- und Abwärmenutzung in neuen Gewerbegebieten in erster Näherung berechnet und wirtschaftlich bewertet werden. Die Betrachtungen bilden dabei nur eine erste Indikation ohne Laufzeitbetrachtung und müssen kritisch hinterfragt werden. Dabei wird ein Elektrolyseur nach dem Wasserstoffbedarf ausgelegt. Dieser setzt sich aus einer Mobilitäts- und einer Prozesswärme-Komponente zusammen. Zusätzlich kann der Elektrolyseur extern verkaufbaren Wasserstoff produzieren, um die Vollbenutzungsstunden zu erhöhen. Der Mobilitätsbedarf wird über die Jahreslaufleistungen des zu erwartenden, im Gewerbegebiet ansässigen Fuhrparks gebildet, der Wärmebedarf aus den angenommenen Verbräuchen der Betriebe für eventuelle Prozesse, Raumwärme und Warmwasser. Hierbei wird angenommen, dass die letzteren beiden durch die Abwärme des Elektrolyseurs gedeckt werden können. Bei der Wärmebedarfsermittlung erleichtern standardisierte Lastprofile für typische Gewerbe die Erfassung. Für eine Strommix-Betrachtung kann eingegeben werden, welche erneuerbaren Energieanlagen am Standort vorhanden sein werden. Photovoltaik-Flächen werden dabei über die Größe und Windkraftanlagen in erster Linie über die installierte Leistung berücksichtigt. Um das Nahwärmenetz näherungsweise zu berechnen, ist eine abgeschätzte Straßennetzlänge notwendig. Auf einem separaten Blatt können wirtschaftliche Annahmen festgelegt werden. Hierbei handelt es sich einerseits um die durchschnittlichen Strompreise, die Laufzeit oder die Höhe von

Förderprogrammen. Andererseits können die Verkaufspreise für Wasserstoff an der Tankstelle, für Prozesswärme und an externe Kunden sowie Parameter der THG-Minderungsquote definiert werden.

In einem übersichtlichen Dashboard (vgl. Abbildung 27) gibt die Wirtschaftlichkeits-Ampel eine erste Aussage zur potenziellen Wirtschaftlichkeit des Projektes. Diese Aussage basiert auf dem Return of Invest. Weitere Kennzahlen sind numerisch und visuell festgehalten. Genauere Informationen können dem angehängten Foliensatz entnommen werden. Die Handhabung kann zum Gewerbegebietstool eingesehen werden (Anhang 6_HyExp_KielRegion_Gewerbetoolhandbuch.pptx).



Abbildung 27: Dashboard des Gewerbetools V1.1 für die KielRegion

Zu den wesentlichen Erkenntnissen aus einigen Szenarienanalysen zählen unter anderem der Einfluss der THG-Quote und die Auslastung des Elektrolyseurs. Durch den Quotenhandel können viele Szenarien erst den Bereich der Wirtschaftlichkeit erreichen und die Ampel auf Grün springen lassen. Die Auslastung des Elektrolyseurs sollte durch den externen Verkauf von Wasserstoff verbessert werden. Das schont den Elektrolyseur durch

gleichmäßigen Betrieb und erhöht die Einnahmen durch den externen Verkauf. Weiterhin sollte beachtet werden, dass die Annahmen, auf denen das Tool basiert, allesamt statisch nur für den aktuellen Moment gelten und in Zukunft stets kontrolliert werden müssen.

Das Tool bietet eine erste Orientierung zur Wirtschaftlichkeit von neuen Gewerbegebieten. Zur genaueren Prüfung sind genauere Informationen über die zukünftigen Betriebe notwendig. Zu den Informationen gehören unter anderem Prozesse, Größe, Wasserstoffbedarfe und Abwärmepotenziale.

7.2 WASSERSTOFFNUNTZUNG IM ÖPNV

Der Klimaschutzplan der Bundesregierung sieht für den Verkehrssektor bis 2030 eine Reduktion der CO₂-Emissionen von 40 % gegenüber dem Stand von 1990 vor. Die Emissionen aus dem Verkehrssektor sind seit 1990 zwar leicht schwankend, im Wesentlichen aber konstant geblieben. Um das Ziel „vierzig Prozent Emissionsreduzierung gegenüber 1990“ bis 2030 noch erreichen zu können, muss der CO₂-Ausstoß erheblich verringert werden.

Ein möglicher Einsatzort für Wasserstoff in der Mobilität liegt im Einsatz von Brennstoffzellenbussen (BZ-Bussen) im ÖPNV. Hier werden über das ganze Jahr regelmäßige und gleichmäßige Fahrtstrecken zurückgelegt. Eine Umstellung auf Wasserstoff wird so sehr gut planbar, da Wasserstoffbedarfe frühzeitig abschätzbar sind und gleichzeitig Wasserstoffproduzenten eine feste Abnahme zugesichert werden kann. Die Neuanschaffungen von Fahrzeugen erfolgen gestaffelt und sind typischerweise Jahre im Voraus absehbar. Auf diese Weise kann der Hochlauf des Wasserstoffbedarfs im ÖPNV mit dem Hochlauf der Erzeugungskapazitäten synchronisiert werden.

Der Einsatz von Brennstoffzellenbussen und anderen alternativen Antrieben wird zudem vom Gesetzgeber gefördert und gefordert. Die Clean Vehicles

Directive (CVD)⁷ ist eine EU-Richtlinie, die Quoten für emissionsarme und emissionsfreie Fahrzeuge für die öffentliche Beschaffung festlegt. Am 02. August 2021 ist das Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz (Saub-FahrzeugBeschG) in Kraft getreten, das der Umsetzung der EU-Richtlinie dient. Ein vorgeschriebener Anteil der Busse, die im ÖPNV-Bereich angeschafft werden, muss emissionsfrei angetrieben werden, beispielsweise mit Wasserstoff.

Der Einsatz von Wasserstoff in BZ-Bussen im öffentlichen Personennahverkehr bietet viele Chancen. Er reduziert nicht nur globale Emissionen, sondern auch lokale Emissionen wie Feinstaub und Stickoxide (NOx). Die Bürger*innen der Region profitieren, da Brennstoffzellenbusse aufgrund ihres leisen und vibrationsarmen Betriebs mehr Komfort als die heute überwiegend eingesetzten Dieselsebusse bieten. Auch für die Region eröffnen sich Chancen. Bei heutigen Dieselnutzfahrzeugen werden erhebliche finanzielle Mittel für den Treibstoffbezug ausgegeben. Diese Mittel fließen zu 100 % aus der Region ab. Die Nutzung von lokal erzeugtem Wasserstoff für Brennstoffzellenbusse kann die regionale Wertschöpfung hingegen deutlich erhöhen.

Für die Betreiber von ÖPNV-Flotten ist die potenzielle Anschaffung von Brennstoffzellenbussen derzeit noch mit einer Reihe von Unsicherheiten verbunden. Im Rahmen dieses Projektes wurde im Austausch mit lokalen ÖPNV-Unternehmen erarbeitet, welche Fragestellungen auf Betreiberseite beantwortet werden müssen, um einen erfolgreichen Einsatz von Brennstoffzellen im ÖPNV zu ermöglichen. Hierfür wurde anhand von Fahrzeugflotten und Betriebshöfen zweier Unternehmen eine exemplarische Umstellung auf Wasserstoff dargestellt.

7.2.1 Allgemeine Grundlagen

Für die Umstellung einer Fahrzeugflotte auf Wasserstoff muss die Eignung der Antriebstechnologie für den jeweiligen Betriebsablauf an oberster Stelle stehen. Die Busse sollen sich nach Möglichkeit nahtlos in bestehende Betriebsabläufe integrieren. Busse im ÖPNV-Einsatz müssen über das ganze Jahr zuverlässig Strecken zurücklegen. Eine hohe Einsatzsicherheit und einfach umsetzbare Anpassungen etablierter Betriebsabläufe sind für die Akzeptanz der Technologie grundlegend. Für die Umstellung einer Busflotte werden daher die folgenden vier Faktoren betrachtet:

- Leistungsfähigkeit des Busses
- Die Errichtung und den Betrieb der Betankungsinfrastruktur
- Die benötigten Anpassungen im Depot und Werkstattbereich, um einen sicheren Einsatz zu ermöglichen
- Die Vollkostenrechnung über die gesamte Lebenszeit

7.2.1.a Leistungsfähigkeit der Busse

Ein BZ-Bus wird angetrieben, indem Wasserstoff und aus der Luft entnommener Sauerstoff in einer Brennstoffzelle in elektrische Energie umgewandelt werden. Der erzeugte Strom treibt den Elektromotor des BZ-Busses an. Eine kleine Batterie (typischerweise 20–60 kWh) dient in erster Linie zur Regelung der unterschiedlich abgerufenen Leistungen und zur Rückgewinnung der Bremsenergie. Moderne Elektrobussen mit großen Batterien ermöglichen heute bereits Einsätze von bis zu 350 km, was in vielen Anwendungsfällen mit der Reichweite von Wasserstoffbussen vergleichbar ist. Übliche Reichweiten von Wasserstoffbussen betragen etwa 400 km und sind somit leicht höher als die von Batteriebussen. Die Reichweite ist grundsätzlich von Faktoren wie der Fahrweise und dem Höhenprofil der Strecke abhängig. Im Gegensatz zu reinen Batteriefahrzeugen ist die Reichweite zudem deutlich unabhängiger von Witterungsbedingungen. Da der Betankungsvorgang nur wenige Minuten dauert, können gewohnte Betriebsabläufe beibehalten und

⁷ RICHTLINIE (EU) 2019/1161 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTES UND DES RATES vom 20. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und

energieeffizienter Straßenfahrzeuge, [online] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L1161> [abgerufen am 18.09.2023].

Reichweiten durch Zwischenbetankungen schnell verlängert werden. Es ist jedoch zu beachten, dass bei voll ausgelasteten Fahrzeugen im Stadtverkehr Zwischenbetankungen zur Reichweitenverlängerung nur bedingt möglich sind.

Die witterungsbeständige und höhere Reichweite im Vergleich zum Batteriebus ist die große Stärke des Wasserstoffes, da existierende Dieselbusflotten häufig eins zu eins ersetzt werden können, ohne dass zusätzliche Fahrzeuge benötigt werden. Vor einer Umstellung muss geprüft werden, ob alle Umläufe direkt durch BZ-Busse ersetzt werden können oder ob Anpassungen der Umlaufplanung bzw. der Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge notwendig wird.

7.2.1.b Errichtung und Betrieb der Betankungsinfrastruktur

Neben der Fahrzeugbeschaffung muss auch die notwendige Infrastruktur für die Betankung geschaffen werden. BZ-Fahrzeuge werden an einer Wasserstofftankstelle betankt. Die Grundlagen dieser Technologie werden in Kapitel 0 genauer erklärt.

Für die Auslegung einer Wasserstofftankstelle für den ÖPNV sind einige spezifische Punkte zu beachten. Die Errichtung einer Wasserstofftankstelle auf dem eigenen Betriebsgelände ermöglicht die Integration der Tankvorgänge in bereits etablierte Betriebsabläufe des ÖPNV-Unternehmens. Auf dem Betriebshof muss hierfür eine ausreichend große Fläche für die Komponenten der Tankstelle zur Verfügung gestellt werden.

Die Betankung der BZ-Busse erfolgt in konzentrierten Zeitfenstern. Innerhalb weniger Stunden werden große Mengen Wasserstoff unmittelbar nacheinander betankt. Eine ausreichende Lagermenge von Wasserstoff vor Ort und eine leistungsstarke Tankstelle ermöglichen es, den Ansprüchen an Betankungszeiten und Sicherheiten gerecht zu werden. Typischerweise wird als Speicherkapazität die zwei- bis dreifache Menge des Tagesbedarfs vorgehalten. Die vorgehaltene Lagermenge beeinflusst das Genehmigungsverfahren für H₂-Tankstellen und sollte daher bei der Planung frühzeitig berücksichtigt werden. Hierbei sind auch andere, auf dem Betriebshof gelagerte Gefahrstoffe mit einzubeziehen.

Um die Einstiegshürde zu senken, können erste Busse auch an öffentlichen Wasserstofftankstellen betankt werden. Öffentliche Wasserstofftankstellen können allerdings nur begrenzt sicherstellen, dass die benötigten Zeitfenster frei und die entsprechende Wasserstoffmenge abrufbar sind. Daher ist ab einer gewissen Flottengröße die Errichtung einer Betriebshoftankstelle sinnvoll.

Der Wasserstoff kann angeliefert oder auf dem Betriebshof per Elektrolyse produziert werden. Diese Entscheidung ist von verschiedenen Faktoren abhängig und sollte von Anbeginn des Projektes mitgedacht werden. Jede Variante geht mit verschiedenen Vor- und Nachteilen einher. Die Eigenerzeugung vor Ort kann mit Vorteilen hinsichtlich Wasserstoffbezugskosten einhergehen, da keine zusätzlichen Kosten für Transport und Margen der Drittanbieter zum Tragen kommen (siehe Kapitel 8.3). Zudem könnte die entstehende Wärme des Elektrolyseurs genutzt werden, um Wärmebedarfe auf dem Betriebshof zu decken (siehe Kapitel 1.1.1.m). Allerdings müssen die notwendigen infrastrukturellen Voraussetzungen wie Fläche, Bbauungsplan und Netzanschlüsse für den geplanten Elektrolyseur vor Ort passen. Ein solches Projekt bedeutet zudem entsprechende Investitionsmaßnahmen, die in der Risikobetrachtung mit einfließen müssen.

Wird der Wasserstoff angeliefert, fallen die Investitionsrisiken natürlich nicht ins Gewicht. Allerdings ist mit entsprechenden Mehrkosten für die Anlieferung des Wasserstoffs (siehe Kapitel 8.3) als auch mit Abzügen der Erlöse aus THG-Quoten zu rechnen. Allgemein hängt die Wahl der Wasserstoffbereitstellung von den Betriebsabläufen und Prioritäten des Unternehmens ab. Errichtung und Betrieb können von ÖPNV-Unternehmen selbst durchgeführt oder zu einem gewissen Grad ausgelagert werden. Letztendlich ist dies eine Entscheidung, die auf den lokalen Gegebenheiten und strategischen Überlegungen des jeweiligen Unternehmens beruhen.

7.2.1.c Anpassungen im Depot und Werkstattbereich

Grundsätzlich sind Arbeiten an Brennstoffzellenbussen vergleichbar mit denen an konventionellen Bussen. Um den potenziellen Gefahren von

Hochvolttechnologien (HV-Technologien) und Wasserstoff zu begegnen, sind für Arbeiten an HV-Komponenten oder am Wasserstoffsystem Sicherheitsvorkehrungen zu treffen und das Personal entsprechend zu schulen.

Die Anpassungen für die Ertüchtigung der Werkstatt sind abhängig von den vorhandenen Randbedingungen und vom Umfang der Arbeiten, die an den BZ-Bussen durchgeführt werden sollen. Für Arbeiten an HV-Komponenten und Wasserstoffsystemen ist ein gesonderter Arbeitsbereich sinnvoll. Zur Ertüchtigung der Werkstatt gehören zum einen sicherheitstechnische Maßnahmen wie die Installation einer zuverlässigen Lüftungsanlage sowie Wasserstoffsensoren, zum anderen müssen Spezialwerkzeuge und sonstige Ausrüstung verfügbar sein.

Der Schulungsumfang richtet sich nach den persönlichen Vorkenntnissen und dem jeweiligen Arbeitsbereich der Fachkräfte. Schulungen sind mit geringen Kosten verbunden und stellen keine besondere Hürde auf dem Weg zu einer Brennstoffzellenbusflotte dar.

Die HV- und wasserstoffspezifischen Arbeiten können auch an eine Vertragswerkstatt ausgelagert werden, um den Aufwand einer Umrüstung zu verringern. Allerdings ist das Werkstattnetz hierfür noch nicht stark ausgebaut. Es sollte jedoch beachtet werden, dass eine Fremdvergabe der Instandhaltung von Fahrzeugen bei großen Flotten in der Regel höhere Kosten verursacht und den Produktionsablauf im Vergleich zur eigenen Instandhaltung beeinträchtigen kann.

7.2.1.d Vollkostenrechnung

Kapitalkosten	Kosten, die für eine Finanzierung anfallen können
Extra Flächenbedarf	Lade- bzw. Tankinfrastruktur erfordert zusätzliche Flächen. Zudem können Stellplätze für zusätzliche Busse benötigt werden
Laufende Personalkosten	Lohnkosten für Fahr- und Werkstattpersonal
Investition Werkstatt / Depot / sonstiges	Kosten für die Umrüstung der Werkstattinfrastruktur
Investition Infrastruktur	Kosten für die Errichtung der Tankstelle/Ladeinfrastruktur (Ohne Förderung)
Energiekosten	Kosten für den Kraftstoff (Diesel/Wasserstoff/Strom)
Instandhaltung Fahrzeuge + Infrastruktur	Kosten für die Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit des Fuhrparks und der zugehörigen Infrastruktur
Investitionskosten Fahrzeuge	Kosten für die Anschaffung des Fuhrparks (Ohne Förderung)

Abbildung 28: Kostenkomponenten einer Flottenumstellung auf Wasserstoff

Anhand der Flotten zweier lokaler ÖPNV-Unternehmen wurde beispielhaft die Wirtschaftlichkeit einer Umstellung auf Brennstoffzellenbusse betrachtet. Die relevanten Kostenbestandteile sind in Abbildung 28 dargestellt. Neben den Kosten für die Anschaffung der Fahrzeuge und Wasserstofftankstelleninfrastruktur sind langfristig vor allem die Betriebskosten relevant. Derzeit sind Brennstoffzellenbusse und Wasserstoffinfrastruktur in ihrer Anschaffung teurer als das existierende Dieseläquivalent. Mit Förderungen, welche die Investitionsmehrkosten reduzieren, können diese Kosten deutlich gesenkt werden. Aufgrund der besseren Antriebseffizienz können die Kraftstoffkosten zudem unter dem des aktuellen Dieselpreises liegen. Diese Kostendifferenz wird durch die langfristige Entwicklung der Strom- und Dieselpreise bedingt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Vollkosten einer Brennstoffzellenflotte mit einer entsprechenden Förderung der Anschaffungskosten vergleichbar mit denen einer Dieselflotte sein können und somit auch wirtschaftlich eine attraktive Alternative darstellen. Hierbei ist vor allem die Versorgung mit kostengünstigem grünem Wasserstoff aus der Region ausschlaggebend.

7.2.1.e Schlussfolgerung

Brennstoffzellenbusse stellen eine attraktive Alternative für die Umstellung einer Busflotte dar. Es ist möglich, hohe Reichweiten und kurze Tankzeiten zu erreichen und so bestehende Betriebsabläufe beizubehalten. Die wirtschaftliche Hürde dieser Umstellung kann durch Förderprogramme gesenkt werden. Für den Betrieb der Busse müssen das Werkstattpersonal geschult und die Werkstattinfrastruktur auf die neuen Eigenschaften angepasst werden. Für die Beschaffung und Betankung des Wasserstoffs muss eine entsprechende Infrastruktur geschaffen werden und diese zuverlässig mit grünem Wasserstoff versorgt werden. Auf diesem Wege kann zugleich eine zuverlässige Nachfrage nach grünem Wasserstoff geschaffen und der lokale ÖPNV dekarbonisiert werden. Auf einem geeigneten Gelände kann auch die Produktion direkt vor Ort eine große Chance darstellen.

7.2.2 Konkrete Anwendungsbeispiele

Die Umstellung eines ÖPNV-Unternehmens auf Brennstoffzellenbusse wurde exemplarisch anhand zweier lokaler Unternehmen geprüft. Die Kieler Verkehrsgesellschaft (KVG) und die Verkehrsbetriebe Kreis Plön (VKP) betreiben unterschiedliche Busflotten, da die KVG vor allem im Stadtbetrieb fährt, während die VKP den Überlandverkehr bedient. Während die Grundprinzipien identisch sind, würden entsprechende Aspekte bei einer Umstellung auf Wasserstoff unterschiedlich gestaltet werden.

7.2.2.a Kieler Verkehrsgesellschaft (KVG)

Die Kieler Verkehrsgesellschaft fährt vor allem im Stadtverkehr und verfügt über eine Flotte von mehr als 200 Bussen. Diese sind derzeit auf zwei zentralen Betriebshöfen untergebracht. Ein großer Teil der Flotte wurde und wird bereits auf batterieelektrische Gelegenheitsladung umgestellt. Diese Technologie eignet sich aufgrund begrenzter Reichweiten und Umlaufgestaltungen allerdings nur für etwa 140 Busse der Flotte.⁸ Für die restlichen 60 Busse

wurden die Umstellung auf Brennstoffzellenbusse und die Produktion von Wasserstoff auf dem Betriebsgelände geprüft. Da diese Busse lange Umläufe fahren und zentral an einem Betriebshof abgestellt werden, wäre dieser Teil der Flotte ideal für eine Umstellung auf Brennstoffzellenbusse geeignet. Trotz hoher Umlauflängen sind kaum Veränderungen in den Betriebsabläufen zu erwarten. In den nächsten Jahren wird ein neuer Betriebshof gebaut. Die Integration einer Wasserstofftankstelle sollte bereits frühzeitig in der Betriebshofplanung berücksichtigt werden. Hierbei sollten auch die Möglichkeiten einer direkten Produktion auf dem Betriebshof betrachtet werden. Neben Wasserstoff als Kraftstoff könnte auch das Nebenprodukt Wärme direkt auf dem Betriebshof genutzt werden, beispielsweise als Raumwärme oder in der Waschstraße. In diesem Fall wäre eine Anbindung des Betriebshofgeländes an einen passenden Stromanschluss und die Genehmigungsfähigkeit einer Elektrolyseanlage auf dem Gelände in die Standortwahl mit einzubeziehen.

7.2.2.b Verkehrsbetriebe Kreis Plön (VKP)

Die Verkehrsbetriebe Kreis Plön fahren Überlandverkehr. Als kommunales Verkehrsunternehmen unterliegen Sie der CVD, jedoch sind die von Ihnen angebotenen Dienstleistungen davon derzeit ausgenommen. Dennoch beabsichtigen Sie, Ihre Flotte umzurüsten. Ihre Flotte ist auf mehrere kleinere, geografisch verteilte Betriebshöfe aufgeteilt. Einer dieser Betriebshöfe wurde beispielhaft auf Brennstoffzellenbusse umgestellt. Priorisiert wurde hierbei ein Betriebshof mit großen Umlauflängen, einer Werkstattinfrastruktur und Platz für die Wasserstofftankstelleninfrastruktur. Da die einzelnen Betriebshöfe weit auseinander liegen, ist eine gemeinsame Nutzung einer Wasserstofftankstelle nicht praktikabel. Die umgerüstete Werkstatt könnte aber von mehreren Betriebshöfen angefahren werden. Auch bei den VKP wäre eine Umstellung möglich, allerdings mit einem höheren Aufwand verbunden. Da der Betriebshof

⁸ Pläne bezüglich einer zukünftigen Stadtbahn wurden nicht berücksichtigt, da die Auswirkungen auf den Busverkehr derzeit noch nicht abgeleitet werden können.

schon älter ist, wäre eine Anpassung des Werkstattbereichs aufwendiger zu integrieren. Busse mit alternativen Antriebstechnologien lagern einen wichtigen Teil ihrer Technologie auf dem Dach und sind höher als Dieselbusse. In älteren Werkstätten könnte die Errichtung von Dacharbeitsflächen hierfür aufgrund niedrigerer Deckenhöhen nur begrenzt möglich sein. Darüber hinaus ist darauf zu achten, ob die Höhe des Werkstatttores eine Einfahrt höherer Fahrzeuge grundsätzlich zulässt. Dies könnte ebenfalls zu Problemen auf einer Strecke mit einem niedrigen Tunnel führen.

7.2.2.c Schlussfolgerung

Sowohl für den Stadt- als auch für den Überlandverkehr in Kiel können Brennstoffzellenbusse einen emissionsfreien und geräuscharmen Nahverkehr ermöglichen. Sie sind besonders geeignet für Standorte, an denen eine große Anzahl Brennstoffzellenbusse betankt wird. Hierbei ist es wichtig, genau auf die jeweiligen Gegebenheiten des Unternehmens einzugehen, um einen verlässlichen, emissionsfreien ÖPNV langfristig sicherzustellen. Die Umstellung auf einem existierenden Betriebshof erfordert eine genaue Prüfung der existierenden Infrastruktur. Je nach örtlichen Gegebenheiten können Anpassungen hier nur begrenzt vorgenommen werden. Die Errichtung neuer Infrastruktur hat hingegen das Potenzial, ein ganzheitliches Konzept zu erstellen und die Geländeplanung und die Werkstatt gleich an den Bedürfnissen der Wasserstoffmobilität auszurichten. Auf diese Weise könnten neben der Fahrzeugversorgung auch zusätzliche Wärmepotenziale gehoben werden. Die Nutzung von Wasserstoff im ÖPNV in Kiel hat das Potenzial, einen Baustein für den emissionsfreien Nahverkehr zu bilden. Wasserstoff sollte daher in allen zukünftigen Projekten des ÖPNV, beispielsweise der Bau eines neuen Betriebshofes für die KVG, mitgedacht werden.

8 WASSERSTOFFINFRASTRUKTUR

Wasserstoff stellt eine zentrale Ressource für die zukünftige Energiewende Deutschlands und insbesondere der KielRegion dar. In diesem Zusammenhang gewinnt die systematische und strategische Entwicklung einer nachhaltigen Wasserstoffinfrastruktur an Bedeutung. Insbesondere die effiziente und bedarfsorientierte Planung der Standorte für Wasserstofftankstellen stellt einen wichtigen Faktor in diesem Kontext dar.

Die komplexe Lage intensiviert sich durch die aktuellen Entwicklungen und Planungen des überregionalen deutschen Wasserstoff-Kernnetzes, das bis zum Jahr 2032 realisiert sein soll. Die KielRegion, bestehend aus den Kreisen Rendsburg-Eckernförde, Plön und der Stadt Kiel, wird in der ersten Ausbauphase nicht direkt an dieses Kernnetz angebunden. Stattdessen ist Schleswig-Holstein als Einspeisungsgebiet vorgesehen, was potenzielle Herausforderungen, aber auch Chancen mit sich bringt, insbesondere im Hinblick auf die Notwendigkeit einer eigenständigen, wenn auch kostenintensiven Infrastruktur und die Möglichkeiten der zukünftigen Anbindung an das Kernnetz.

In diesem Kontext ergibt sich die zentrale Frage: Wie kann die KielRegion eine effektive und nachhaltige Wasserstoffinfrastruktur entwickeln, die sowohl den aktuellen Bedarf des Straßengüterverkehrs deckt als auch potenzielle zukünftige Anbindungen an das deutsche Wasserstoff-Kernnetz berücksichtigt? Welche Strategien sollten verfolgt werden, um Synergieeffekte durch die dezentrale Verteilung von Wasserstoff zu nutzen und gleichzeitig die Basis für eine mögliche zukünftige Integration in das überregionale Netz zu schaffen?

Dieses Kapitel untersucht die kurz- bis mittelfristigen Anforderungen an die Wasserstoffinfrastruktur, insbesondere im Hinblick auf den Transport und das Tankstellennetz, sowie die langfristige Notwendigkeit von Pipeline-Transport als Skalierungsmöglichkeit. Dabei wird die Strategie der dezentralen Erzeugung und Verteilung von Wasserstoff als vorrangiger Ansatz betrachtet. Wir werden die Möglichkeiten und Herausforderungen erörtern, die sich aus

der aktuellen Planung des deutschen Wasserstoff-Kernnetzes ergeben, und konkrete Empfehlungen für die Entwicklung der Wasserstoffinfrastruktur in der KielRegion abgeben. Diese Analysen und Diskussionen zielen darauf ab, die Region optimal auf die dynamischen Entwicklungen im Bereich der Wasserstofftechnologie vorzubereiten und eine nachhaltige Infrastrukturentwicklung zu fördern, die potenzielle zukünftige Anbindungen an das Kernnetz berücksichtigt.

8.1 ALLGEMEINE GRUNDLAGEN WASSERSTOFFTANKSTELLE

Für die Treibstoffversorgung von Brennstoffzellenfahrzeugen wird eine Wasserstofftankstelle benötigt. Komprimierter Wasserstoff wird vor Ort verdichtet und gelagert, bevor er per Zapfsäule an die Fahrzeuge abgegeben wird. Im Folgenden wird die technische Funktionsweise einer Wasserstofftankstelle dargestellt.

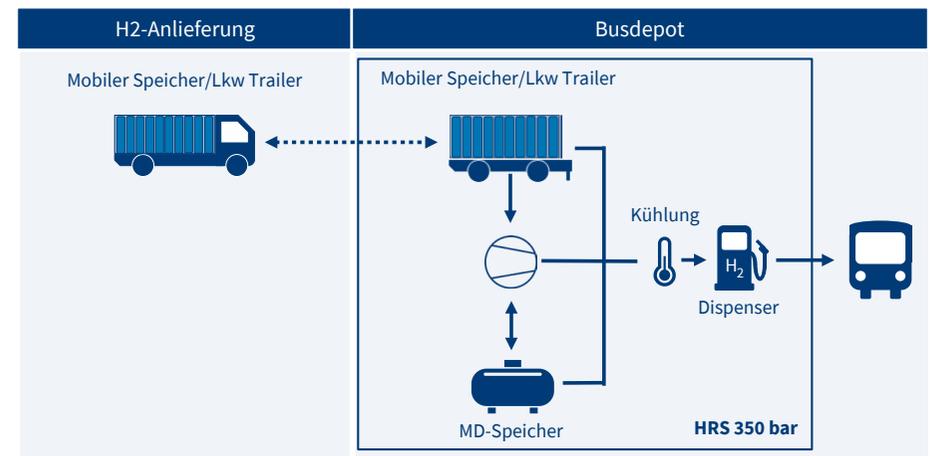


Abbildung 29: Schematische Darstellung einer Wasserstofftankstelle

Der Wasserstoff kann auf verschiedene Arten an der Wasserstofftankstelle bereitgestellt werden. Er kann per LKW oder Pipeline angeliefert oder vor Ort

per Elektrolyse produziert werden. Die beste Wahl der Wasserstoffbereitstellung hängt von den Betriebsabläufen und Prioritäten des Unternehmens ab. Die Lieferung oder Produktion sollte in Abhängigkeit der Betankungsvorgänge erfolgen, um sicherzustellen, dass eine ausreichend Speichermenge vorrätig ist. In Abbildung 29 ist schematisch eine mögliche Wasserstofftankstellen-Konfiguration mit einer Traileranlieferung dargestellt.

Die Wasserstoffanlieferung per Trailer erfolgt typischerweise mit einem Druckniveau von 200 bar bis zu 500 bar in 40-Fuß-Trailern. In einem Trailer kann bis zu einer Tonne Wasserstoff transportiert werden. Der Trailer kann durch ein Wechseltrailer in das Speicherkonzept der Wasserstofftankstelle integriert werden. Auf diese Weise kann Wasserstoff auf einem hohen Druckniveau aus dem Trailer für Überströmvorgänge in den Fahrzeugtank genutzt werden. Alternativ wird der Wasserstoff in einen Niederdruckspeicher überströmt. Dieser wird anschließend auf ein höheres Druckniveau komprimiert.

8.1.1 Komponenten einer Wasserstofftankstelle

Die Übergabe zwischen Trailer und Wasserstofftankstelle erfolgt an der H₂-Anlieferungsstafel. Verschiedene Druckniveaus können gesonderte Anlieferungsstafeln erfordern. Die Anlieferungsstafel sollte wenn möglich sowohl die Befüllung von stationären Speichern als auch das direkte Betanken von Fahrzeugen ermöglichen.

Der Wasserstoff wird durch Kompressoren verdichtet. Hierfür können Membrankompressoren, Trockenlaufkompressoren oder ionische Kompressoren genutzt werden. Die Kompressoreinheit ist Steuerungssystem und die Verteilereinheit der Wasserstofftankstelle. Zudem wird die elektrische Ausrüstung zur Energieversorgung und Absicherung sämtlicher elektrischer Betriebsmittel der Wasserstofftankstelle, eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) inklusive Sicherheitssteuerung, welche die Anlage überwacht und steuert, sowie eine Fernwartungsanbindung, der Kompressoreinheit zugerechnet. Eine redundante Ausführung der Kompressoreinheit erhöht die Leistungsfähigkeit der Wasserstofftankstelle und senkt das Ausfallrisiko.

Wasserstoff kann auf unterschiedlichen Druckniveaus zwischen 30 und 1.000 bar gespeichert werden. Hierfür werden verschiedene Tankwerkstoffe genutzt. Das Speicherkonzept entsteht in Abstimmung der Auslegung der anderen Wasserstofftankstellenkomponenten. Ein größerer Speicher erhöht die Leistungsfähigkeit der Wasserstofftankstelle, da hohe Druckniveaus länger gehalten werden können. Hierbei müssen allerdings Schwellenwerte für die Genehmigungsfähigkeit der Anlage beachtet werden.

Eine separate Kühleinheit kann für die Vorkühlung des Wasserstoffs genutzt werden. Dies ist vor allem notwendig, wenn große Mengen Wasserstoff in geringer Zeit vertankt werden sollen. Nicht alle Hersteller oder Tankanlagen nutzen eine separate Kühleinheit.

Über die Zapfsäule (Dispenser) wird der Wasserstoff von der Wasserstofftankstelle an das Fahrzeug übergeben. Dieser Vorgang ist ähnlich dem einer konventionellen Dieseltankung. Je nach Fahrzeugtyp erfolgt dies mit einem Nenndruck von 350 bar oder 700 bar. Die Zapfpistole kann mit verschiedenen Kupplungen für unterschiedliche Druckniveaus, Durchflussmengen und Informationsschnittstellen angepasst werden.

8.1.2 Projektierung einer Wasserstofftankstelle

Die Kosten für die Errichtung einer Wasserstofftankstelle werden von der Leistungsfähigkeit und Ausfallsicherheit der Anlage bestimmt. Neben den Kosten für die Tankstellenkomponenten müssen auch bauliche Kosten wie bspw. für die entsprechende Fundamentierung zur Aufstellung der Tankstellenkomponenten einkalkuliert werden. Zudem muss die Errichtung möglicher Schutzmaßnahmen, beispielsweise Brand- bzw. Schallschutzschutzwände und Anfahrtschutze, mitberücksichtigt werden. Ein weiterer Kostenpunkt liegt in den Kosten für die Planung, den Architekten, die Genehmigung und die für eine Wasserstofftankstelle erforderlichen Gutachten für die Genehmigungsplanung.

Die Errichtung und der Betrieb können von Unternehmen selbst durchgeführt oder zu einem gewissen Grad ausgelagert werden. Bei der Projektierung ist zu

beachten, dass von der Vorplanung bis zum Regelbetrieb zwei bis drei Jahre vergehen können. Dies ist vor allem auf Bearbeitungszeiten von Genehmigungsverfahren und lange Lieferzeiten zurückzuführen. Sollte für die Errichtung der Tankstelleninfrastruktur ein Förderprogramm in Anspruch genommen werden, kann dies den Zeitplan ebenfalls erheblich beeinflussen. Ein solches Förderprogramm ist das Programm „Aufbau einer Wasserstofftankstelleninfrastruktur in SH“ des Landes Schleswig-Holstein.⁹

8.1.2.a Flächenbedarf einer Wasserstofftankstelle

Die meisten Wasserstofftankstellenkomponenten werden in genormten Schiffscontainern verbaut. Ein 20-Fuß-Container erfordert eine Fläche von ca. 15 m², ein 40-Fuß-Container ca. 30 m². Neben den Flächen der Komponenten müssen zudem Schutz- und Sicherheitsabstände beachtet werden. Diese betragen zwischen drei und fünf Metern. Sie können durch diverse Maßnahmen, wie z. B. die Installation einer Brandschutzwand oder eines Anfahrsschutzes, reduziert werden. Auch die Grundstücksform oder Abstände zu bestehenden Gebäuden können die Fläche beeinflussen. Je größer der tägliche Bedarf an Wasserstoff, desto größer der Flächenbedarf. Die benötigte Fläche für eine Tankstelle, die bis zu einer Tonne Wasserstoff am Tag betankt, liegt zwischen 1.500 und 3.000 m². Die genaue Ausgestaltung der Wasserstofftankstellenkomponenten, des Flächenbedarfs und des Sicherheitskonzeptes variieren mit dem Wasserstofftankstellen-Hersteller.

8.1.2.b Genehmigung einer Wasserstofftankstelle

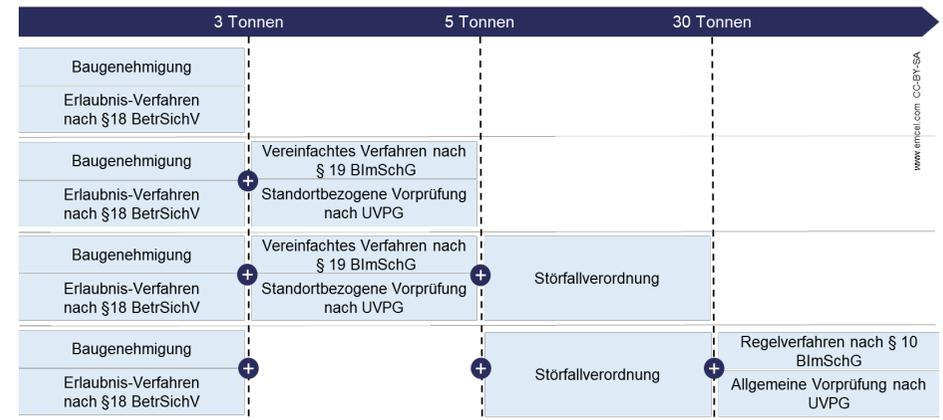


Abbildung 30: Genehmigungsverfahren für eine Wasserstofftankstelle

Für die Genehmigung einer Wasserstofftankstelle können folgende regulatorische Rahmenbedingungen relevant sein:

- › Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)
- › Bauordnung (BauO)
- › Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG)
- › Störfall-Verordnung (12. Bundesimmissionsschutzverordnung)

Hierbei ist die gelagerte Wasserstoffmenge vor Ort von entscheidender Bedeutung. Schwellenwerte von drei bzw. fünf Tonnen gelagertem Wasserstoff können zusätzliche Genehmigungsverfahren auslösen. Wird die Schwelle einer Lagermenge von fünf Tonnen überschritten, ist die Störfall-Verordnung (StörfallV) aus dem BImSchG zu berücksichtigen. Dies kann einen deutlich höheren Aufwand für das Sicherheitskonzept erfordern. Insbesondere in

⁹ <https://wasserstoffwirtschaft.sh/de/foerderungsprogramm/aufbau-einer-wasserstofftankstelleninfrastruktur-in-sh--140>

direkter Nähe zu sensibler Infrastruktur, wie beispielsweise Kindergärten oder Autobahnen, sollte dies vermieden werden.

8.2 KONKRETE ANWENDUNGSBEISPIELE WASSERSTOFFTANKSTELLE

Im vorangegangenen Kapitel wurden technische und wirtschaftliche Parameter definiert, die zur Bewertung der Umsetzbarkeit einer Wasserstofftankstelle an einem bestimmten Standort herangezogen werden können. Diese Parameter können jedoch weiterhin mit Verkehrsdaten kombiniert werden, um nachfragebasierte Korridore für Wasserstofftankstellen zu ermitteln. Das Nachfrageaspekt ist insbesondere während der Anlaufphase von Bedeutung, in welcher weniger Fahrzeuge regelmäßig an einem spezifischen Ort betankt werden. Im folgenden Kapitel wird die Methodik und die Ergebnisse einer nachfragebasierten Analyse von Wasserstofftankstellen in der KielRegion vorgestellt und diskutiert.

8.2.1 Standortanalyse Wasserstofftankstellen

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Durchführung einer bedarfsorientierten, groben Standortanalyse für den Straßengüterverkehr auf Ebene von Suchräumen in der KielRegion. Diese Analyse dient als erste Indikation für die grobe und mittelfristige Standortplanung von Wasserstofftankstellen

Der methodische Ansatz für diese Analyse basiert auf einer GIS-Auswertung (Geographische Informationssysteme) und einer Bewertungsmatrix. Es ist jedoch wichtig, anzumerken, dass die angebotsseitige und infrastrukturelle Analyse auf Mikroebene in diesem Kontext nicht berücksichtigt wird.

Das Ergebnis dieser Analyse ist eine Liste mit Steckbriefen potenzieller Standorte, die jeweils mit einer Punktzahl für ihr Nachfragepotenzial bewertet sind. Dies ermöglicht eine gezielte Auswahl der potenziellen Standorte für die zukünftige Errichtung von Wasserstofftankstellen in der Region. Das Vorgehen in diesem Prozess wird im Folgenden näher erläutert.

Im ersten Schritt erfolgte die Identifizierung von gewerblichen Bauflächen und speziellen Sonderbauflächen wie Hafenanlagen und großflächigem Einzelhandel in der KielRegion. Diese Grundlage umfasste insgesamt mehr als 800 Flächen.

Anschließend wurden diese Flächen einer eingehenden Filterung unterzogen, wobei eine Kategorisierung vorgenommen wurde. Ziel war es, herauszufinden, ob sich relevante Logistkniederlassungen auf diesen Flächen befinden. Hierbei wurden beispielsweise Gewerbegebiete ausgesondert, in denen ausschließlich Niederlassungen von Handwerksbetrieben ansässig waren. Das Ergebnis dieses Schrittes war die Identifizierung von 42 zusammenhängenden Suchräumen. Es sei angemerkt, dass ein Suchraum aus mehreren Teilflächen bestehen kann.

Mithilfe von Luftbildern und Adressverzeichnissen wurden die Logistkniederlassungen in den 42 identifizierten Suchräumen kartiert. Dabei erfolgte eine Unterscheidung zwischen kleinen, mittleren und großen Niederlassungen, um eine differenzierte Analyse zu ermöglichen.

Für eine präzise Analyse wurde ein georeferenziertes und klassifiziertes Straßennetz herangezogen. Im Umkreis von 1.000 Metern um die identifizierten Suchräume wurden die Knotenpunkte des Straßenverkehrs ermittelt. Diese Knotenpunkte wurden weiter in verschiedene Kategorien unterteilt, um eine detaillierte Betrachtung der Verkehrsanbindung zu ermöglichen.

- Kleiner Knotenpunkt: Kreuzung zwischen Kreisstraßen mit Bundesstraßen oder Kreisstraßen
- Mittlerer Knotenpunkt: Kreuzung zwischen Bundesstraßen mit Bundesstraßen oder zwischen Kreisstraßen und Autobahnen
- Großer Knotenpunkt: Autobahnkreuze oder Kreuzung zwischen Autobahnen und Bundesstraßen (Ermittlung dieser Kategorie auch im 2.500-m-Radius)

Die Übertragung der Verkehrsmengen des Schwerverkehrs aus dem Verkehrsmodell der KielRegion stellt eine weitere Ebene der Standortanalyse

dar. Dabei wurde die höchste Verkehrsmenge eines Streckenabschnitts im 1.000-Meter-Radius der identifizierten Suchräume ermittelt. Eine Korrektur erfolgte mit einem Faktor von 0,5 für Werte der Bundesautobahnen 7 und 21, um den erwarteten hohen Anteil von Transitverkehr zu berücksichtigen.

Im nächsten Schritt wurden die Scores der einzelnen Suchräume für jeden Parameter berechnet und normiert, wobei das Maximum als Referenzwert verwendet wurde. Die Normierung wurde wie folgt durchgeführt:

- Gewichtung der Logistkniederlassungen nach Kategorie (kleine Niederlassungen einfach, mittlere doppelt und große vierfach)
- Gewichtung der Knotenpunkte nach Kategorie (kleiner Knoten einfach, mittlerer dreifach, großer sechsfach; dreifache Bewertung für große Knoten im 2.500-Meter-Radius)
- Einfache Normierung der Verkehrsmengen (keine weitere Verarbeitung erforderlich)

Die Gesamtbewertung der Suchräume wurde durch die Berechnung eines Gesamtscores (Summe) unter Verwendung von Gewichtungsfaktoren vorgenommen:

- Logistkniederlassungen mit 0,6
- Verkehrsknoten mit 0,2
- Verkehrsmenge mit 0,2

Diese Gewichtungsfaktoren wurden aus der Überlegung abgeleitet, dass HRS (Wasserstofftankstellen) mittelfristig nach dem unmittelbaren Bedarf von Niederlassungen in der direkten Umgebung geplant werden sollten.

Name Suchraum	Gesamt-score	Score Logistik-niederlassung	Score Knotenpunkte	Score Verkehrsmengen
Wellsee	72/100	100/100	14/100	46/100
Österrönfeld Ost	49/100	48/100	64/100	36/100
Kiel Russer Weg	49/100	15/100	100/100	100/100
Ihlberg	44/100	19/100	64/100	100/100
Schmalenbrook	39/100	19/100	50/100	86/100

Tabelle 1: Übersicht der Suchräume mit dem höchsten Gesamtscore aufgeteilt nach den Bewertungskategorien

In Tabelle 1 sind die Scores in den unterschiedlichen Kategorien für die fünf Suchräume zusammengefasst, für die der höchste Gesamtscore ermittelt wurde. Mit dem höchsten Gesamtscore wurde das Gewerbegebiet Wellsee im Süden Kiels bewertet. Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass in unmittelbarer Nähe des Gewerbegebiets bereits eine öffentlich zugängliche Wasserstofftankstelle realisiert wird¹⁰.

Die Ergebnisse der Standortanalyse sind in Abbildung 31 zusammenfassend dargestellt. Für jeden der 42 Suchräume ist der Score der Bewertungskategorien separat veranschaulicht. Es ist eindeutig zu erkennen, dass sich die Suchräume vor allem auf den Ballungsraum der Stadt Kiel, an den Verkehrsachsen Rendsburgs sowie an den Bundesautobahnen konzentrieren. Die Ergebnisse aller Suchräume mit Niederlassungen von

¹⁰ H2 MOBILITY Deutschland (2023): H2 tanken, [online] <https://h2.live/> [abgerufen am 12.09.2023].

Logistikunternehmen (Anhang 7_HyExpKielRegion_Standortanalyse_Wasserstofftankstellen.pptx) sind für jeden Suchraum einzeln in Form von Standortsteckbriefen dargestellt.

In Abbildung 32 ist beispielhaft der Standortsteckbrief für den Suchraum „Wellsee“ veranschaulicht. Zu erkennen ist, dass dieser Standort durch eine hohe Anzahl von Logistikniederlassungen charakterisiert ist und deshalb auch in dem Ranking aller Suchräume auf Platz eins liegt.

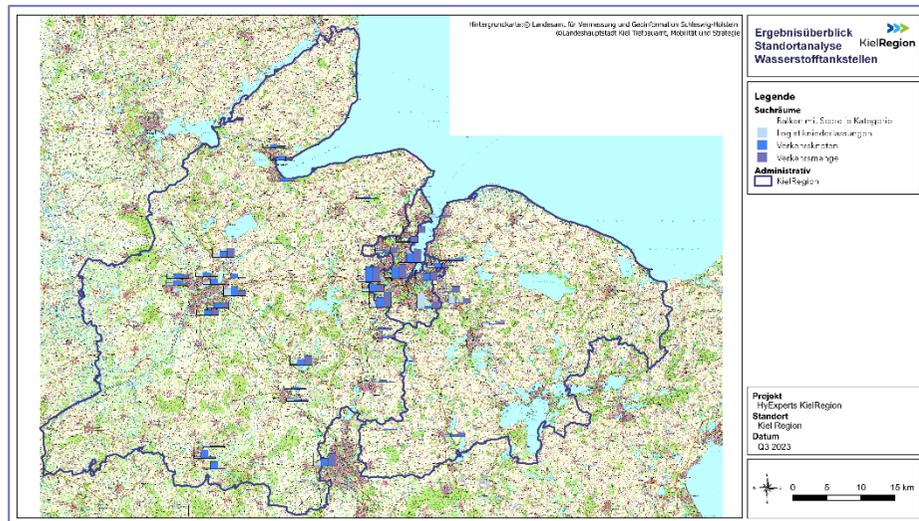


Abbildung 31: Ergebnisübersicht der Standortanalyse potenzielle Wasserstofftankstelle in der KielRegion

Die umfassende Analyse und Bewertung der identifizierten Suchräume nach diesen Kriterien ermöglicht eine fundierte Grundlage für die strategische Standortauswahl von Wasserstofftankstellen zur Unterstützung der Logistikniederlassungen in der KielRegion.

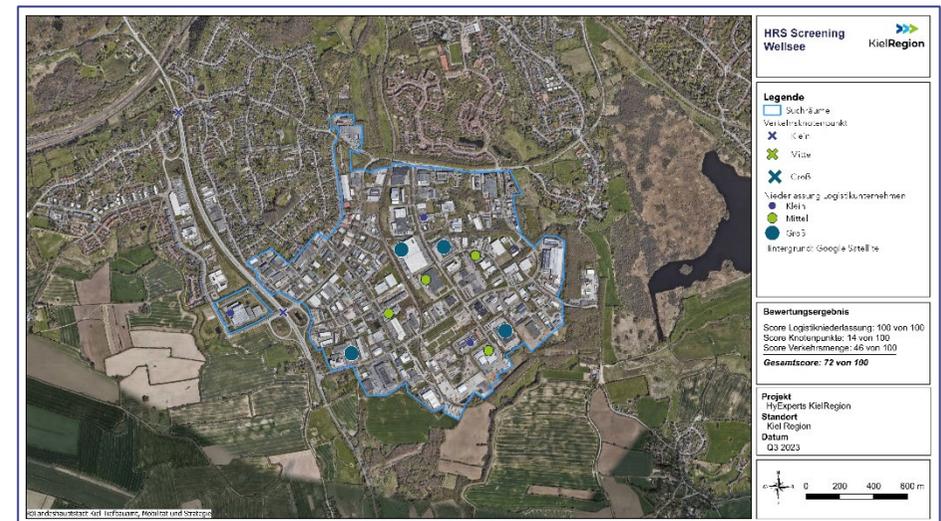


Abbildung 32: Beispielergebnissteckbrief der Standortanalyse von Wasserstofftankstellen für den Suchraum „Wellsee“

Die erzielten Ergebnisse weisen jedoch auf verschiedene Aspekte hin, die für eine vertiefende Analyse und Planung zu berücksichtigen sind. Die Aussagekraft kann durch folgende Schritte und Faktoren gesteigert werden:

- **Differenzierte Verkehrsbetrachtung:** Um die Standortauswahl genauer zu bestimmen, sollte das Verkehrsaufkommen nach Verkehrsart differenziert werden, darunter Stadtverkehr, innerstaatlicher Verkehr und Transitverkehr mit Langstrecken. Dies ermöglicht eine genauere Ermittlung der lokalen Nachfrage.
- **Transformationsstrategie der Niederlassungen:** Die Analyse sollte die Strategie der Niederlassungen für die Umstellung auf Wasserstoff als Antriebstechnologie berücksichtigen. Dies kann durch Vergleiche mit bereits öffentlich vorgestellten Strategien von Unternehmen mit hohem Logistikaufkommen erfolgen. Zudem ist darauf zu achten, ob nicht-lokal ansässige Subunternehmen für den Transport zuständig

sind, die gegebenenfalls ein abweichendes Anforderungsprofil an Wasserstofftankstellen aufweisen könnten.

- **Zeitbasierte Puffer:** Anstatt nur Radien zu betrachten, können in einer detaillierteren Betrachtung Pufferzonen basierend auf einer bestimmten Fahrzeit ab den Suchräumen ermittelt werden. Dies berücksichtigt die tatsächliche Erreichbarkeit der Tankstellen.
- **Detaillierte Verkehrsmengenanalyse:** Eine detailliertere Analyse der Verkehrsmengen sollte eine Verkehrsflussanalyse und Transitverkehrsanteile auf Streckenabschnitten einbeziehen. Dies ermöglicht eine präzisere Einschätzung der tatsächlichen Verkehrslage.
- **Berücksichtigung von HRS:** Bestehende und geplante Wasserstofftankstellen im Umkreis der Standorte sollten in die Betrachtung einbezogen werden. Dies verhindert potenzielle Übersättigung oder Engpässe.

Bei einer genaueren Standortanalyse sollten zudem auch die angebotsseitigen, infrastrukturellen und planungsrechtlichen Faktoren beachtet werden. Im Folgenden werden einige Faktoren aufgeführt.

- **Technische Eignung der Fläche:** Zusätzlich zur Flächengröße und -form sollten spezifische Faktoren wie Straßenfrontlänge, Bodenbeschaffenheit, Gefahrenbereiche (wie Überflutungsgebiete) und die Eigentümerstruktur bewertet werden.
- **Bau- und genehmigungsrechtliche Eignung:** Die baurechtliche Prüfung sollte Aspekte wie Bebauungs- und Flächennutzungspläne, bauliche Höhe, Altlasten und Lärmrestriktionen einschließen (vgl. Kapitel 1.1.1.x).
- **Infrastrukturelle Voraussetzungen:** Die Analyse sollte lokale Netzanschlusskapazität, Internetqualität, Löschwasserversorgung und Entfernung zur Elektrolyse berücksichtigen. Dies stellt sicher, dass die erforderliche Infrastruktur vorhanden ist.

Die Einbeziehung der vorgeschlagenen Schritte und Faktoren wird dazu beitragen, eine umfassende und fundierte Grundlage für die Standortauswahl und Planung von Wasserstofftankstellen für den Straßengüterverkehr in der KielRegion zu schaffen.

8.3 ALLGEMEINE GRUNDLAGEN H2-TRANSPORTLOGISTIK

Der Transport von Wasserstoff stellt häufig das fehlende Glied in regionalen Wertschöpfungsketten dar und ist eines der wesentlichsten Elemente. Für eine dezentrale Wasserstoffherzeugung, die vom Verbrauch entkoppelt ist, ist die Nutzung einer Transportinfrastruktur unerlässlich. Kurzfristig wird diese Wasserstofflogistik mittels Drucktrailern durchgeführt, die über Straßenwege transportiert werden. Doch mit wachsender Erzeugung und steigender Nachfrage werden die Mengen an Wasserstoff schnell die sinnvollen Grenzen der Trailerlogistik überschreiten. Aus diesem Grund arbeiten die Ferngasnetzbetreiber in Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Behörden an einem pipeline-basierten Wasserstofftransport. Das folgende Kapitel konzentriert sich sowohl auf die Grundlagen des trailer-basierten als auch des pipeline-basierten Wasserstofftransports. Es wird insbesondere ein Überblick über technische und wirtschaftliche Faktoren sowie den aktuellen Entwicklungsstand gegeben.

8.3.1 Grundlagen Trailertransport

Gasförmiger Wasserstoff wird typischerweise in mehreren separaten Druckbehältern auf einem 40-Fuß-Trailer befördert. Generell unterscheidet man dabei zwischen den sogenannten Tube-Trailern und den Flaschenbündeln. Tube-Trailer sind mit bis zu neun Behältern des Speichertyps I ausgestattet, die gemeinsam eine Kapazität von circa 500 kg Wasserstoff unter einem Druck von 200 bis 250 bar aufweisen.

Für den Ferntransport großer Wasserstoffmengen empfiehlt sich hingegen der Einsatz von Flaschenbündeln. Diese unterscheiden sich von Tube-Trailern insbesondere durch die Nutzung von Typ-IV-Hochdruckspeichern anstatt metallischer Behälter. Die Speicher werden zu Bündeln zusammengefasst und

in standardisierten Containern untergebracht. Sie ermöglichen die Beförderung von bis zu 1.100 kg Wasserstoff pro Einheit bei einem Druck von 500 bis 700 bar. Darüber hinaus sind Systeme in Entwicklung, die eine erhöhte Kapazität von bis zu 1.500 kg bei höheren Druckstufen erlauben. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass durch die Transportierung großer Mengen je Trailer die spezifischen Transportkosten sinken und eine zusätzliche Kompression an der Betankungsstation unter Umständen entfallen kann.

Der Transport von Wasserstoff in gasförmigem Zustand mittels Trailer birgt verschiedene Kostenfaktoren, die sorgfältig berücksichtigt werden müssen, um eine wirtschaftlich tragfähige Lieferkette sicherzustellen. Die CAPEX-Kosten des Trailers sind die Haupttreiber der Kosten. 300-bar-Trailer kosten etwa 675.000 € und 500-bar-Trailer kosten 1.080.000 €. Zusätzlich sind Personalkosten, Kraftstoffkosten, Mautkosten und Wartungs- und Instandhaltungskosten zu berücksichtigen. Für eine einzige Lieferung innerhalb eines 30-Kilometer-Radius pro Tag betragen die Wasserstofftransportkosten etwa 1,17 €/kgH₂ bei 300 bar und 1,47 €/kgH₂ bei 500 bar. Eine Erhöhung des Transportradius auf 100 Kilometer führt zu Kosten von 1,40 €/kgH₂ bzw. 1,63 €/kgH₂ für 300-bar- und 500-bar-Lösungen. Die Transportkosten können jedoch erheblich reduziert werden, indem die Anzahl der Touren pro Tag erhöht wird, wodurch die spezifischen CAPEX-Kosten der Trailer verringert werden. 3 Touren pro Tag über jeweils 30 Kilometer führen zu Transportkosten von 0,53 €/kgH₂ bzw. 0,59 €/kgH₂ für 300-bar- und 500-bar-Varianten. Der Transport von Wasserstoff via Trailer ist somit eine komplexe Angelegenheit, die eine präzise und durchdachte Planung sowie ein effektives Kostenmanagement erfordert, um wirtschaftlich effizient zu sein.

8.3.2 Grundlagen H2-Kernnetz

In Deutschland wird ein Wasserstoff-Kernnetz entstehen entsprechend der gezeigten Karte in Abbildung 34.

Die Fernleitungsnetzbetreiber haben im vierten Quartal 2023 ihren aktuellen Planungsstand zum überregionalen deutschen Wasserstoffnetz bekannt

gegeben. Die veröffentlichten Pläne zeigen ein erstes Kernnetz zum Pipeline-Transport von Wasserstoff durch die Bundesrepublik. Da Wasserstoff eine zentrale Bedeutung für die wirtschaftliche Transformation der BRD hat, werden zunächst die großen Industriestandorte und Großstädte angebunden. Mit dem Wasserstoff-Kernnetz soll eine kostengünstige Netzinfrastruktur schnell und effizient aufgebaut werden. Zur Erreichung dieser Ziele werden einige bestehende Pipelines modernisiert und umgewidmet, andere werden als Neubautrassen realisiert. Dieses Kernnetz wird bis 2032 fertiggestellt. Im Rahmen des integrierten Netzentwicklungsplans

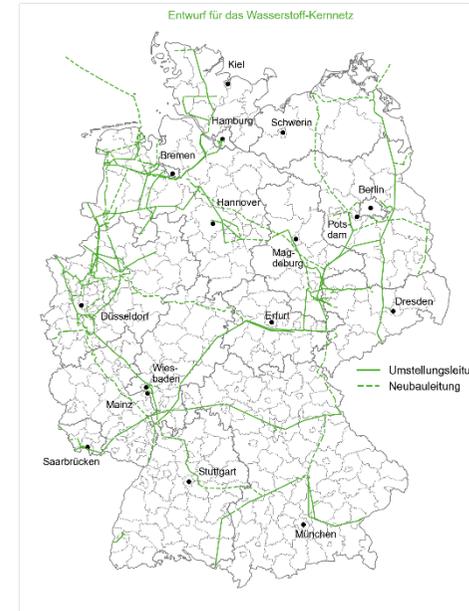


Abbildung 33: Wasserstoff-Kernnetz

(NEP) Erdgas und Wasserstoff 2025-2037 soll das Netz in zweiter Stufe ausgeplant werden. Fortlaufend werden die Planungen alle zwei Jahre auf rollierender Basis aktualisiert und veröffentlicht. Die Finanzierung wird durch ein bundeseinheitliches Netzentgelt geregelt und zu großen Teilen von der

Privatwirtschaft getragen. Das Vorhaben wird im Herbst 2023 durch eine Änderung im Energiewirtschaftsgesetz endgültig beschlossen.¹¹

8.4 ABLEITUNGEN H2-TRANSPORTLOGISTIK

Die KielRegion mit den Kreisen Rendsburg-Eckernförde, Plön und der Stadt Kiel wird nach aktuellem Stand in der ersten Ausbaustufe keine Sticheitung von der geplanten Nordtrasse (Richtung Dänemark) bekommen. Schleswig-Holstein als solches wird nach aktuellem Planungsstand (15.11.2023) als Einspeisungsgebiet bezeichnet. Das bedeutet, dass aus geplanten Anlagen und Projekten in das Netz gespeist werden kann, jedoch keine Großabnahme aus dem Netz geplant ist. Die Klassifizierung basiert auf der aktuellen Bestandsaufnahme, die aktuell keine energieintensiven, kritischen Industrien in Schleswig-Holstein enthält. In welcher Form Einspeisungen vorgenommen werden können, wird nicht näher erläutert.¹²

Welche Schlüsse sind daraus für die Planung von Gewerbegebieten, Tankstellen und anderweitiger Infrastruktur in der KielRegion zu ziehen?

Dezentrale Erzeugung und Verteilung von Wasserstoff wird in Schleswig-Holstein und insbesondere in der KielRegion mittelfristig die vorrangige Strategie bleiben. Überkapazitäten können eingespeist werden, dafür ist jedoch ein Trailertransport oder der eigenständige und damit kostenintensive Aufbau einer Sticheitung notwendig. Darüber hinaus variiert die in das Gasnetz einspeisbare Menge zwischen 2 und 10 vol.-% und muss jeweils lokal bewertet

werden. Es bietet sich also an, Kapazitäten effizient in der Umgebung zu verteilen und so Synergieeffekte zu nutzen.

Das in Abbildung 13 gezeigte Netz stellt nur die erste Ausbaustufe des Wasserstoffnetzes dar. Es ist davon auszugehen, dass die KielRegion sich in zukünftigen Ausbaustufen um eine Anbindung bewerben kann. Die Wahrscheinlichkeit einer Anbindung kann durch den zwischenzeitlichen Aufbau der dezentralen Strukturen verbessert werden. Eine solche Initiative wird derzeit von Schleswig-Holstein Netz geplant, die darauf abzielt, eine Wasserstoff-Pipelineinfrastruktur zu etablieren, die später mit dem Kernnetz verbunden werden soll.¹³ Die Anbindung an das zukünftige Kernnetz kann ein entscheidender Standortfaktor bei der Ansiedlung zukünftiger Unternehmen sein. Daher sollten die weitere Entwicklung und Möglichkeiten zur Teilhabe genau verfolgt werden.

¹⁴

¹¹ Fischer, Barbara (2023): *Wasserstoff-Kernnetz*, [online] <https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz-wasserstoff-kernnetz/> [abgerufen am: 12. September 2023].

¹² Ewers, Daniela (2023): *Fernleitungsnetzbetreiber veröffentlichen Planungsstand für deutschlandweites Wasserstoff-Kernnetz – Erster wichtiger Schritt für die künftige Wasserstoff-Infrastruktur*, [online] <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/07/20230712-planungsstand-deutschlandweites-wasserstoff-kernetzes-fuer-kuenftige-wasserstoff-infrastruktur.html> [abgerufen am: 12. September 2023].

¹³ Schleswig-Holstein Netz (2023). [online] Wasserstoffnetze. <https://www.sh-netz.com/de/schleswig-holstein-netz/innovation/wasserstoffnetze.html> [abgerufen am: 22. Nov. 2023].

¹⁴ Ewers, Daniela. (2023): *Fernleitungsnetzbetreiber veröffentlichen Planungsstand für deutschlandweites Wasserstoff-Kernnetz – Erster wichtiger Schritt für die künftige Wasserstoff-Infrastruktur*, [online] <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/07/20230712-planungsstand-deutschlandweites-wasserstoff-kernetzes-fuer-kuenftige-wasserstoff-infrastruktur.html> [abgerufen am: 12. September 2023].

9 REGIONALES PROJEKT

In der aktuellen Phase der Entwicklung von Wasserstofftechnologien in der KielRegion haben unterschiedliche Akteure mehrere Einzelprojekte identifiziert, die potenziell miteinander verbunden werden könnten, um eine integrierte regionale Wasserstoffinitiative zu schaffen (siehe Kapiteln 7.2.2, 6.2.2). Eine detaillierte Analyse dieser Projekte hat jedoch ergeben, dass eine direkte Verbindung aufgrund hoher Transportkosten, Distanzen und rechtlicher Einschränkungen in den jeweiligen Gesellschafterverträgen derzeit nicht sinnvoll wäre (siehe Kapitel 1.1.1.i). Daraus ergibt sich eine wesentliche Herausforderung: die effektive Integration regionaler Aspekte ohne die Schaffung eines einzigen Verbundprojektes.

Trotz der festgestellten Schwierigkeiten besteht ein erhebliches Interesse daran, die mittelfristig relevanten Bereiche Verkehr und Energiewirtschaft in eine Wasserstoffwirtschaft zu integrieren, obwohl diese Sektoren derzeit entkoppelt sind. Die zentrale Frage hierbei ist, wie eine zuverlässige Versorgung beider Sektoren mit regionalem H₂ gewährleistet werden kann.

Für den Verkehrssektor ist diese eher eine Frage der Infrastruktur- und Logistikplanung. An erster Stelle ist eine durchdachte Planung eines Tankstellennetzes erforderlich (siehe Kapitel 0), das mit der H₂-Erzeugung gekoppelt ist. Zudem muss ein effizientes System zur Logistik und Verteilung von H₂ geschaffen werden, das möglicherweise die Einbindung dritter Akteure oder die Initiierung regionaler Projekte erfordert.

Die Fragestellung der Integration des Energiesektors in eine regionale Wasserstoffwirtschaft unterscheidet sich signifikant in ihrer Größenordnung im Vergleich zum Verkehrssektor. Für die Umstellung ihres Küstenkraftwerks benötigen die Stadtwerke Kiel mehrere Hundert Tonnen Wasserstoff pro Jahr. Eine solche Bereitstellung funktioniert nur über eine Pipeline, was eine überregionale Planung erfordert. Der Zeitplan und die Planung einer solchen Pipeline sind noch nicht klar (siehe Kapitel 8.4).

Trotz der bestehenden Herausforderungen können die Stadtwerke in vorbereitenden Rollen agieren, um die Schaffung eines regionalen Marktes zu

erleichtern. Im Rahmen der 37. BImSchV werden die Umsetzung des delegierten Rechtsakts und damit die Kriterien für RFNBOs in deutschem Recht festgelegt. Gemäß dem aktuellen Referentenentwurf wird im Bereich der Zusätzlichkeit der Stromerzeugung aktuell geregelt, dass ein direkter oder über Zwischenhändler geschlossener Stromabnahmevertrag mit Betreibern von Stromerzeugungsanlagen notwendig ist. Im Entwurf der Europäischen Kommission wird jedoch Zwischenhändler durch Mittler ersetzt, was sich wohl im nächsten deutschen Entwurf wiederfinden wird. Der Einsatz von Mittlern anstelle von Zwischenhändlern würde den direkten Abschluss eines PPA mit den einzelnen Betreibern der EE-Anlagen erfordern. Eine solche Anforderung könnte für große H₂-Erzeuger mit Zugang zu umfangreichen Portfolios von EE-Anlagen zusätzlichen administrativen Aufwand bedeuten, während der Zugang zu EE-Anlagen für kleinere H₂-Erzeuger ein erhebliches Hindernis darstellen könnte.

Hier ergibt sich eine Gelegenheit für die Stadtwerke, eine aktivere Rolle bei der Ermöglichung eines Erzeugermarktes einzunehmen. Erstens könnten die Stadtwerke selbst als EE-Betreiber agieren und maßgeschneiderte PPAs für kleinere H₂-Erzeuger bereitstellen. Dies würde den kleineren H₂-Erzeugern den Vorteil bieten, von einem etablierten Akteur im Markt eine bereits strukturierte und einsatzbereite Vereinbarung zu erhalten. Zweitens könnten die Stadtwerke auch einen Vermittlungsdienst anbieten, bei dem sie H₂-Erzeuger mit lokalen Partnern in der EE-Erzeugung zusammenbringen. Dieses Modell wäre insbesondere aufgrund der bestehenden Partnerschaften der Stadtwerke Kiel mit EE-Entwicklern sehr attraktiv. Es würde nicht nur die Vernetzung zwischen den Parteien erleichtern, sondern auch Synergien nutzen, die durch diese bestehenden Beziehungen entstehen.

Abschließend kann eine effektive Vernetzung separater regionaler Initiativen zur Schaffung eines zusammenhängenden regionalen Projekts führen. Innerhalb der KielRegion teilen mehrere Projekte mit unterschiedlichen Schwerpunktbereichen ein gemeinsames Ziel: den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in der KielRegion. Zum Beispiel konzentriert sich das CAPTN-Projekt auf die Erzeugung und Verwendung von Wasserstoff für den

maritimen Sektor. Darüber hinaus prüfen lokale Akteure die Möglichkeit der Wasserstoffelektrolyse aus Meerwasser. Eine erfolgreiche Vernetzungsinitiative könnte Synergien zwischen den Projekten für effiziente Ressourcennutzung und Maximierung des Umsetzungspotenzials herstellen.

10 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN UND ROADMAP

Im Verlauf des HyExperts-Projektes in der KielRegion wurden folgende Punkte ersichtlich:

- Kurz- bis mittelfristig wird der Wasserstoffbedarf fast ausschließlich durch den Verkehrssektor bestimmt. In diesem Bereich gibt es auf der einen Seite konkrete Handlungsdrücke verschiedener Akteur*innen, in emissionsfreie Technologien zu investieren. Auf der anderen Seite ist der Verkehrsbereich bisher der einzige Sektor, in dem profitable Geschäftsmodelle zu erwarten sind. Darüber hinaus gibt es in der Kurz- bis Mittelfrist keine weiteren Sektoren, die einen konkreten Wasserstoffbedarf in der KielRegion erkennen lassen. Für die bestehenden Gewerbegebiete gibt es aktuell keinen ausreichenden regulatorischen Handlungsdruck, und ein wirtschaftlich vertretbarer Einsatz von Wasserstoff zur Erzeugung von Prozesswärme ist momentan nicht darstellbar. Großindustrien, die ggf. von anderen Förderinstrumenten wie beispielsweise den Klimaschutzverträgen¹⁵ der Bundesregierung profitieren könnten, sind in der KielRegion nicht ansässig.
- Langfristig werden sich die Wasserstoffbedarfe in der KielRegion in allen Sektoren steigern. Im Verkehrsbereich ist davon auszugehen, dass der Anteil an wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen mit Verschärfung der EU-Flottenrichtlinie¹⁶ weiter steigen wird. Der Schwerlasttransport wird in dieser Hinsicht von besonderer Bedeutung sein. Aber auch im Bereich der Wärmeversorgung wird die Frage zu beantworten sein, wie zukünftig Wärme sowohl für Gebäude als auch für Prozesse zur Verfügung gestellt werden kann. Es ist davon

auszugehen, dass Wasserstoff dort eine Rolle einnehmen wird und eine Versorgung sichergestellt werden muss.

Aus diesen Gegebenheiten lassen sich Handlungsempfehlungen für die Kurz- und Mittelfrist als auch für die langfristige Perspektive ableiten. Die Handlungsempfehlungen sind weiterhin in die Kategorien Netzwerk, Wissen, Planung und Politik kategorisiert.

10.1 KURZ- UND MITTELFRISTIGE HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

NETZWERK

- In der KielRegion gibt es viele Akteur*innen, die an dem Thema Wasserstoff grundsätzlich interessiert sind. Da die internen Ressourcen der Unternehmen meist nicht ausreichen, um selbstständig den sehr dynamischen Entwicklungen der Wasserstoffwirtschaft zu folgen, ist es zielführend, hier ein zentrales Angebot zur Wissensvermittlung und zum aktiven Netzwerken zu schaffen. Zweck dieses Netzwerks ist es, die Akteur*innen auch nach der HyExperts-Phase dazu zu befähigen, interne Entwicklungen zum Thema Wasserstoff voranzutreiben und solide Entscheidungsgrundlagen zu schaffen. Durch ein aktives Netzwerk wird zudem sichergestellt, dass Synergien zwischen den Akteur*innen gehoben werden. So könnten z. B. durch ein Monitoring der geplanten Brennstoffzellenflotte in der KielRegion eine bedarfs- und zeitgerechte Betankungsinfrastruktur oder aber gemeinsame Beschaffungsinitiativen geschaffen werden.

¹⁵ Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023). Richtlinie zur Förderung von klimaneutralen Produktionsverfahren in der Industrie durch Klimaschutzverträge.

¹⁶ Verordnung zur Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011 (2019) *Amtsblatt der europäischen Union L 111/13*.

- In der KielRegion laufen aktuell einige wasserstoffbezogene Projekte parallel zueinander, z. B. HyExperts und CAPTN oder die Entwicklung von neuen Gewerbegebieten mit Wasserstoffbezug. Für ein bestmögliches Zusammenspiel aller laufenden Aktivitäten sollte eine zentrale Koordinierungsstelle geschaffen werden. Die KielRegion GmbH bietet hierfür ideale Voraussetzungen und könnte zudem die Schnittstelle zur Landeskoordinierungsstelle der WTSH¹⁷ des Landes Schleswig-Holstein darstellen.

WISSEN

Neben der Wissensvermittlung zu aktuellen Entwicklungen der Wasserstoffwirtschaft, die bereits in der Kategorie „Netzwerk“ dargestellt wurde, gibt es weitere ganz spezifische Handlungsempfehlungen im Bereich der Wissensvermittlung. Diese beziehen sich auf die beiden Planungstools, die im Laufe der HyExperts-Phase für die weitere regionale Planung der Wasserstoffwirtschaft entwickelt wurden.

- **Gewerbetool:** Für eine sachgerechte Anwendung des Gewerbetools bedarf es einer Schulung der lokalen Wirtschaftsfördernden. Es ist von großer Bedeutung, dass die Nutzer*innen des Gewerbetools die zugrunde liegende Methodik und Annahmen des Tools verstanden haben, damit sie die Ergebnisse sinnvoll Interpretieren können. Zu diesem Zweck sollte sichergestellt werden, dass zeitnah eine ausführliche Schulung aller beteiligten Wirtschaftsfördernden der Region durchgeführt wird. Dadurch sollen die Nutzer*innen befähigt werden, das Gewerbetool auch unter Berücksichtigung aktueller Änderungen der Gesetzeslage zu nutzen.
- **Wasserstofftankstellen-Standortanalyse:** Die Analyse von potenziellen Standorten für Wasserstofftankstellen ist immer nur so gut wie die zugrunde liegenden Daten, die zur Analyse genutzt werden. Im

Rahmen von HyExperts konnte eine erste Methodik und Analyse entwickelt und durchgeführt werden. Diese gilt es in Zukunft weiterzuentwickeln. Durch eine differenziertere und genauere Erhebung der Bedarfe und Verkehrsdaten auf der Nachfrageseite als auch durch eine verfeinerte Berücksichtigung von infrastrukturellen Gegebenheiten, wie Straßen, Gewerbegebieten und Wasserstoffherstellungsanlagen, kann das Gewerbegebietstool noch weiterentwickelt werden.

PLANUNG

- In der Stadtentwicklung sollte das Thema Wasserstoff z. B. bei der Auszeichnung neuer Gewerbegebiete und der Novellierung von B-Plänen mitberücksichtigt werden, z. B. durch die Schaffung von „sonstigen Sondergebieten Elektrolyse“.
- Im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung muss das Thema Wasserstoff gemäß dem Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze von Anfang an berücksichtigt werden. Insbesondere sollte bei Projekten zur Wasserstoffherzeugung das Thema der Abwärmenutzung des Elektrolyseurs immer mitgedacht werden.

POLITIK

- Erarbeitung einer Strategie zur Schaffung nachhaltiger Nachfrageanreize in der Region.
- Befreiung der Netzentgelte für Elektrolysen über 2026 hinaus.
- Förderinstrumente für die Dekarbonisierung des Mittelstandes.
- Aktive Beteiligung im Bund der Wasserstoffregionen, um die Interessen regionaler Akteur*innen auf Bundesebene zu vertreten.

¹⁷ WTSH: Wirtschaftsförderung und Technologietransfer Schleswig-Holstein.

10.2 LANGFRISTIGE HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

NETZWERK

- Mit der Zeit rücken weitere Verbrauchssektoren stärker in den Vordergrund. Hierzu gehören der Schwerlastverkehr, Wärme und perspektivisch auch die Stromerzeugung (Stichwort Küstenkraftwerk). Diese Entwicklungen werden Auswirkungen auf die lokale Wasserstoffversorgungsinfrastruktur haben. Konkret wird der Import von Wasserstoff zunehmend an Bedeutung gewinnen, um die vernetzten und großskaligen Verbrauchssektoren wie Wärme und Stromerzeugung bedienen zu können. Entsprechend sollte das Netzwerk perspektivisch überregionale Wasserstofferzeuger und Infrastrukturbetreiber stärker einbinden, um frühzeitig Zugänge zu Wasserstoffkapazitäten zu sichern.

WISSEN

- Das Thema Beschaffung und Vermarktung von Wasserstoff wird in einem überregionalen Markt von größerer Bedeutung werden. Da es in absehbarer Zeit jedoch keinen liquiden Markt für Wasserstoff und dessen Derivate geben wird, wird die Beschaffung meist bilateral ablaufen. Aus diesem Grund sollte ein fundiertes Wissen hinsichtlich potenzieller Lieferanten, üblicher Vertragsbestandteile und gängiger Marktpreise entwickelt werden.
- Weiterhin sollte die technologische Entwicklung kontinuierlich beobachtet und sowohl technisch als auch wirtschaftlich bewertet werden. Diese Entwicklungen können neue Geschäftsfelder und -opportunitäten für die lokal ansässigen Akteur*innen bieten. So sollte beispielsweise die Möglichkeit einer Meerwasserelektrolyse weiterverfolgt werden, da Kiel mit dem Küstenkraftwerk einen

potenziellen Großverbraucher von Wasserstoff und Salzsäure als auch durch die geografische Gegebenheit der Meeranbindung zwei wichtige Bestandteile für eine erfolgreiche Projektumsetzung bietet.

PLANUNG

- Die Wärmewende wird eine der größten kommunalen Herausforderungen in den kommenden Jahren. In bestimmten Bereichen wird auch Wasserstoff einen Beitrag hierzu leisten. Daher ist es von großer Bedeutung, frühzeitig mit der kommunalen Wirtschaft in den Austausch zu treten und deren spezifischen Dekarbonisierungspläne gemeinsam mit den regionalen Energieversorgungsunternehmen zu entwickeln. Erst wenn konkrete Bedarfe bekannt sind, können infrastrukturelle Planungen folgen. Diese betreffen die zukünftige Rolle des lokalen Gasnetzes in einer Wasserstoffwirtschaft. Weiterhin wird das Wasserstoffversorgungskonzept zu planen sein. Dies kann ein Portfolio aus lokal erzeugtem und importiertem Wasserstoff sein. Für den Import von Wasserstoff müssen die infrastrukturellen Voraussetzungen frühzeitig geschaffen werden, sei es durch die Anbindung an das Wasserstoff-Kernnetz oder durch Strukturen, die einen seegebundenen Import erlauben.
- Neben den infrastrukturellen Planungen sollte frühzeitig in die Wasserstoffbeschaffung eingestiegen werden. Es ist davon auszugehen, dass auf absehbare Zeit noch kein liquider Markt entsteht und das Marktvolumen an erneuerbarem Wasserstoff entsprechend begrenzt sein wird. Daher sollte das Thema Beschaffung von Anfang an Bestandteil der kommunalen Wärme- und Energieplanung sein und entsprechende Konzepte sollten entwickelt werden.

POLITIK

-
- Aktive Beteiligung im Bund der Wasserstoffregionen, um die Interessen regionaler Akteur*innen auf Bundesebene zu vertreten.
 - Planungssicherheit durch verbindliche Rahmenbedingungen und langfristige Visionen schaffen.
 - Konsequente Weiterentwicklung von identifizierten und bewährten Projekten.
 - Ausweisung von grünen Gewerbegebieten mit Wasserstoffinfrastruktur zur Ansiedlung von Zukunftsindustrien.

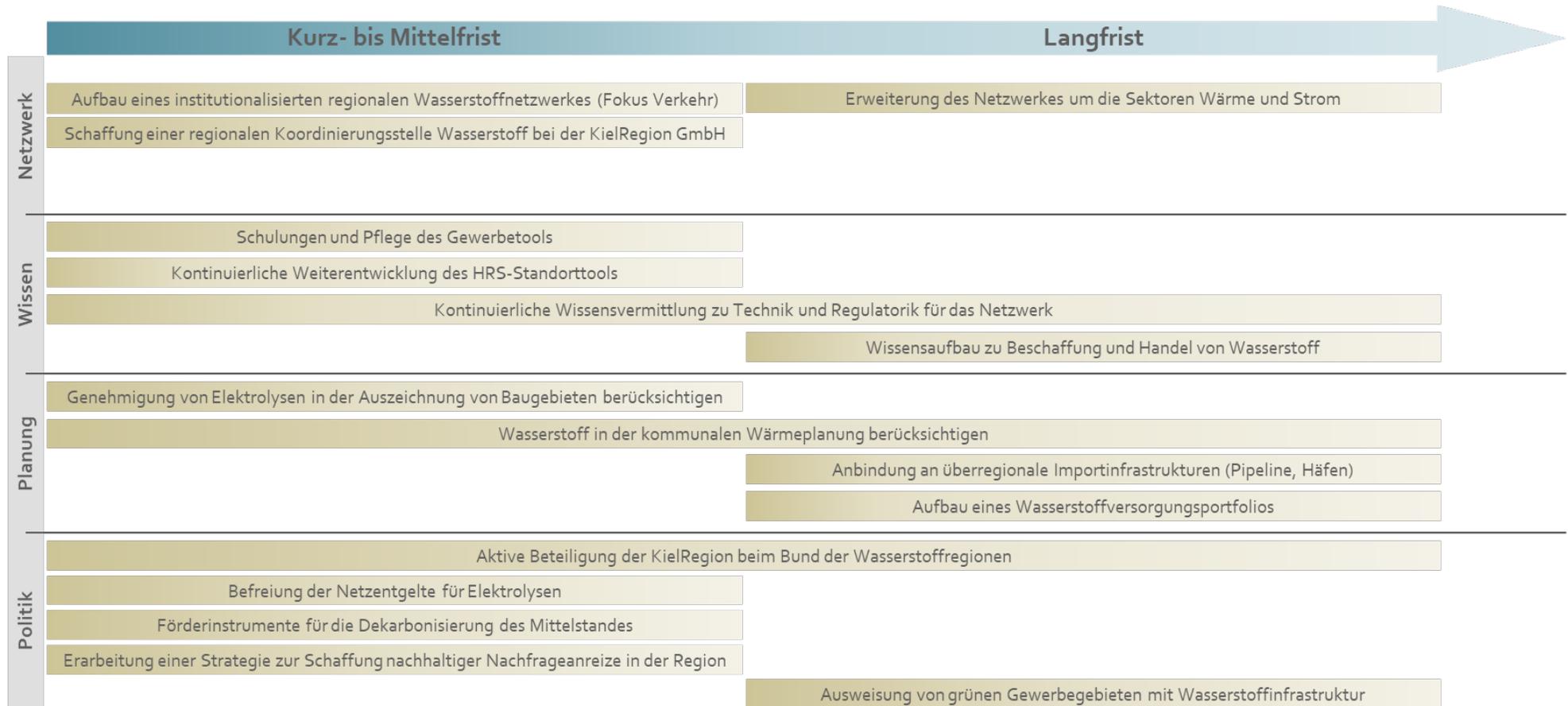


Abbildung 34: Darstellung der Roadmap zur Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft in der KielRegion

11 ANHANG

Weitere Informationen zur Projektmethodik finden Sie in den folgenden Anhängen:

- Anhang 1: Präsentation zur Projektfilterung

Weitere Informationen zur Wasserstoffnutzung finden Sie in den folgenden Anhängen:

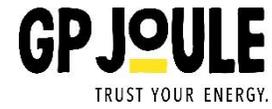
- Anhang 2: Präsentation zur Wasserstoffnutzung im Handels- und Industriepark Kiel-Wellsee
- Anhang 3: Präsentation zur Blaupause für Gewerbegebiete
- Anhang 6: Gewerbetoolhandbuch
- Anhang 8: Präsentation zur Wasserstoffnutzung im ÖPNV
- Anhang 9: Gewerbegebietstool

Weitere Informationen zur Wasserstofferzeugung finden Sie in den folgenden Anhängen:

- Anhang 4: Präsentation 1. Workshop zum regionalen Erzeugungskonzept
- Anhang 5: Präsentation zur Bewertung der Erzeugungsstandorte

Weitere Informationen zur Wasserstoffinfrastruktur finden Sie in den folgenden Anhängen:

- Anhang 7: Präsentation zur Standortanalyse für Wasserstofftankstellen



HyExperts KielRegion Projektfilterung

Agenda

- ▶ **Methodik**
- ▶ Auswertung der Projekte
- ▶ Empfehlungen

Die Ziele aus HyStarter werden nun geschärft.

Konkretisierung der Ziele



Klima- und Umweltschutz

- Ersatz von fossilen Technologien durch Wasserstofftechnologien
- Klimaschonender Produktionspfad des Wasserstoffs



Regionale Wertschöpfung

- Vor allem durch regionale H₂-Erzeugung (Kraftstoffe werden derzeit importiert)
- Regionale Wertschöpfung und Akzeptanz sind sich selbst verstärkende Faktoren

Umsetzung (3)

- ▶ Die Vorplanung von drei Projekten für regionale Akteure wird abgeschlossen sein.
- ▶ Dazu gehören technische, wirtschaftliche und regulatorische Aspekte.
- ▶ Die Ergebnisse sollen als Grundlage zur Investitionsentscheidung und konkreten Umsetzung der Projekte dienen.

Klimaschutz (2)

- ▶ Alle Projekte sollen bis 2027 einen messbaren Beitrag zur Einsparung von THG leisten
- ▶ In den Projekten müssen bestehende THG-Emittenten substituiert werden.
- ▶ Es gilt das Credo der Technologieoffenheit, d. h. H₂-Technologien müssen gegenüber anderen Technologien Vorteile besitzen.

Wettbewerbsfähigkeit (1)

- ▶ Durch die Projekte soll die Kiel Region wettbewerbsfähig bleiben.
- ▶ Die Projekte müssen daher eine nachhaltige Perspektive für bestehende wirtschaftliche Tätigkeiten bieten... oder neue Wertschöpfungsstufen in der Region schaffen.

Strategie (4)

- ▶ Im Rahmen des Projektes soll eine strategische Untersuchung durchgeführt werden.
- ▶ Diese soll Perspektiven für konkrete Umsetzungsprojekte nach 2027 liefern.

Für die Bewertung der Projekte wurden die folgenden Kriterien herangezogen.

Bewertungskriterien in der Balanced Scorecard

 Wettbewerbsfähigkeit		 Klimaschutz		 Umsetzung		 Strategie	
Ziele	Kriterien	Ziele	Kriterien	Ziele	Kriterien	Ziele	Kriterien
Ökonomische Wirkungen	Arbeitsplätze, Umsätze, Nutzung lokaler EE	Einsparung THG-Emissionen	Ersatztechnologien	Wirtschaftliche Bewertung	Business Case mit/ohne Förderung	Relevanz für Regionskonzept	Mehrwert für ein Regionskonzept
Wachstumspotenzial	Wettbewerbsvorteile ggü. anderen Regionen	Weitere Nachhaltigkeitskriterien	Flächenversiedlung, Wasser	Regulatorik der Technologie	Regulatorische Hürden	Anstoßeffekte	Berührungspunkte mit anderen Projekten
Bedeutung für die Region	Stahlkraft, Stärkung des regionalen Images			Erfolgsaussichten bis 2027	Konkretheit des Projektes		

Agenda

- ▶ Methodik
- ▶ **Auswertung der Projekte**
- ▶ Empfehlungen

getproject GmbH & Co. KG

	<p>Kategorie</p> <p> Erzeugung  Infrastruktur  Nutzung</p> <p>Projektstatus</p> <p>Idee → in Planung → in Umsetzung → umgesetzt</p>	<p>Score 3,4/10</p> <table border="1"><tr><td></td><td>Klimaschutz:</td><td></td></tr><tr><td></td><td>Wettbewerbsfähigkeit:</td><td></td></tr><tr><td></td><td>Umsetzung:</td><td></td></tr><tr><td></td><td>Strategie:</td><td></td></tr></table>		Klimaschutz:			Wettbewerbsfähigkeit:			Umsetzung:			Strategie:	
	Klimaschutz:													
	Wettbewerbsfähigkeit:													
	Umsetzung:													
	Strategie:													
<p>Realisierung: kein Datum</p>		<p>Kurzbeschreibung</p> <ul style="list-style-type: none">• EE-Projektierer mit umfangreichem Portfolio (ca. 300 MW) in Schleswig Holstein• Potenzielles Interesse am Betrieb des Elektrolyseurs <p>Standort</p> <p>Noch kein konkreter Standort</p>												
<p>Projektpartner</p> <ul style="list-style-type: none">▶ Stadtwerke Kiel▶ AWR														

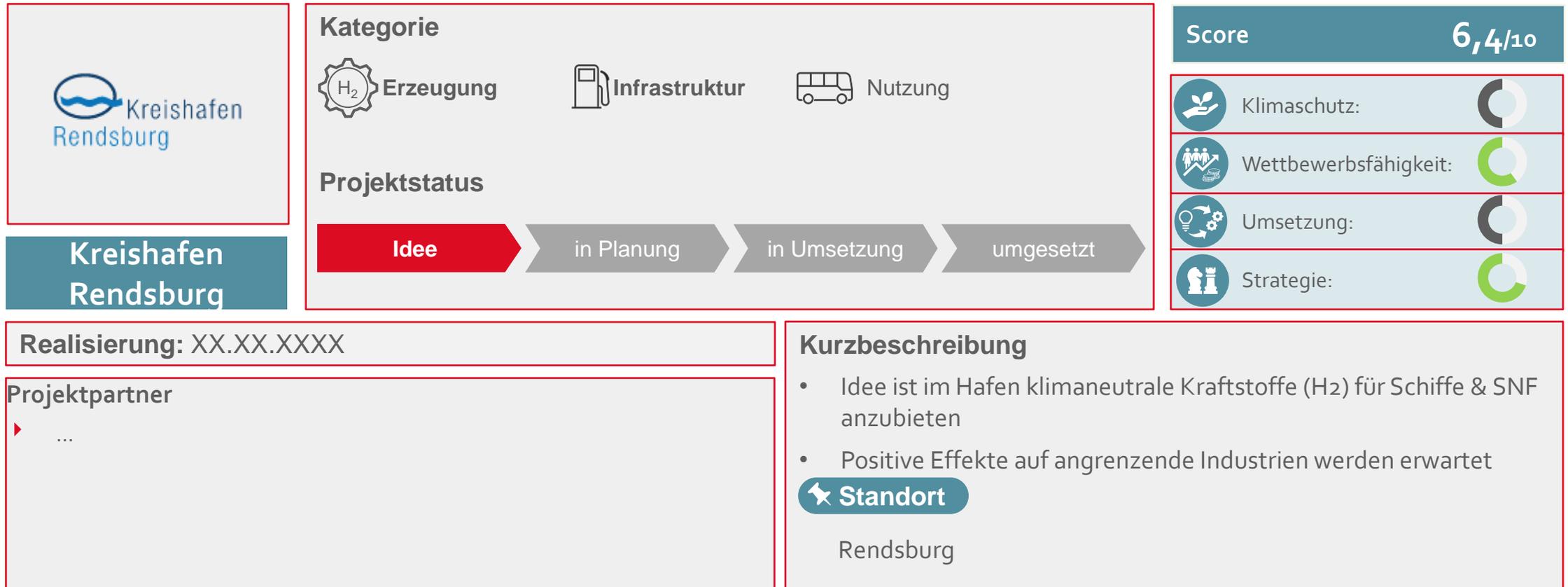
everfuel

 everfuel	Kategorie  Erzeugung  Infrastruktur  Nutzung	Score 5,5/10											
	Projektstatus Idee → in Planung → in Umsetzung → umgesetzt	<table border="1"><tr><td></td><td>Klimaschutz:</td><td></td></tr><tr><td></td><td>Wettbewerbsfähigkeit:</td><td></td></tr><tr><td></td><td>Umsetzung:</td><td></td></tr><tr><td></td><td>Strategie:</td><td></td></tr></table>		Klimaschutz:			Wettbewerbsfähigkeit:			Umsetzung:			Strategie:
	Klimaschutz:												
	Wettbewerbsfähigkeit:												
	Umsetzung:												
	Strategie:												
Realisierung: kein Datum	Kurzbeschreibung <ul style="list-style-type: none">• Bietet rundum-sorglos-Pakete für Wasserstoff inklusive aller notwendigen Infrastruktur• Interessiert an einem Erzeugungsstandort in SH oder MV ↔ Standort Noch kein Standort												
Projektpartner <ul style="list-style-type: none">▶ Keine konkreten Partner in der Region▶ Arbeitet gerne in Partnerschaften aber mit Mehrheitsbeteiligung													

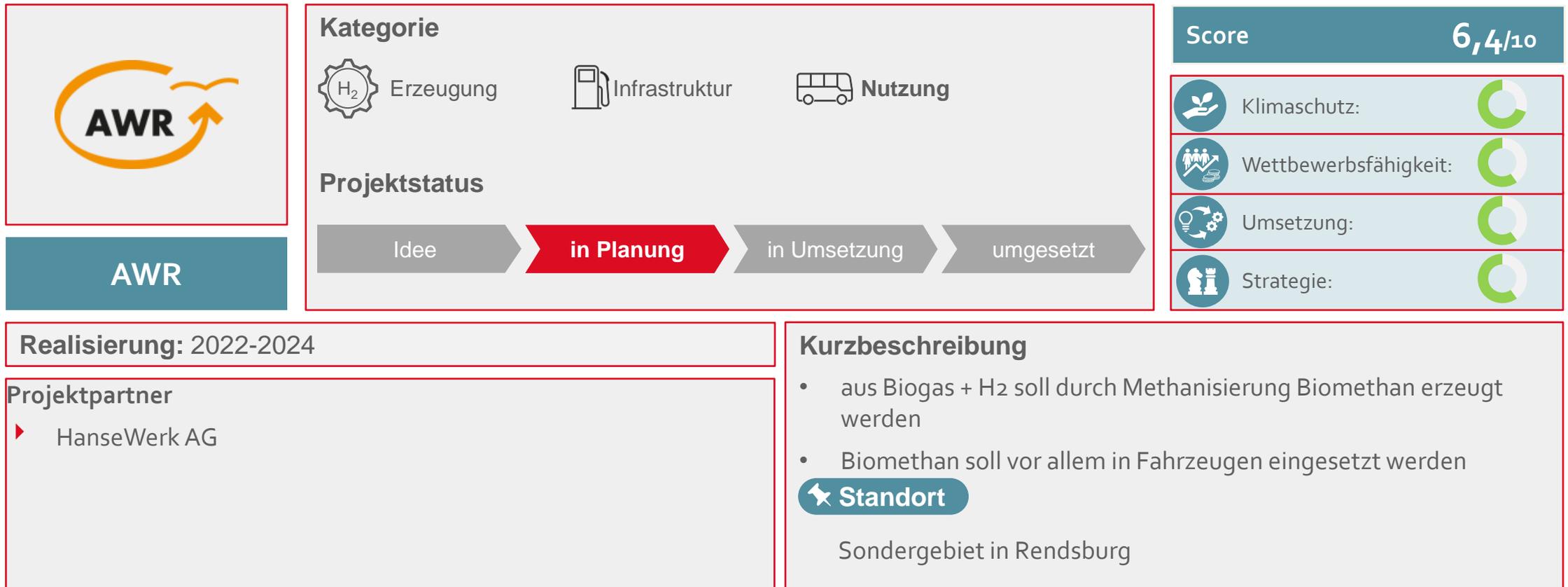
Hensoldt

	Kategorie  Erzeugung  Infrastruktur  Nutzung	Score 5,35/10											
	Projektstatus Idee → in Planung → in Umsetzung → umgesetzt	<table border="1"><tr><td></td><td>Klimaschutz:</td><td></td></tr><tr><td></td><td>Wettbewerbsfähigkeit:</td><td></td></tr><tr><td></td><td>Umsetzung:</td><td></td></tr><tr><td></td><td>Strategie:</td><td></td></tr></table>		Klimaschutz:			Wettbewerbsfähigkeit:			Umsetzung:			Strategie:
	Klimaschutz:												
	Wettbewerbsfähigkeit:												
	Umsetzung:												
	Strategie:												
Realisierung: 03.2023	Kurzbeschreibung <ul style="list-style-type: none">Entwicklung einer Lösung für die lokale und autonome Energieerzeugung auf der Grundlage von Wasserstoff												
Projektpartner ▶ ...	Standort Niederlassung in Kiel (Bunsenstraße 4, 24145 Kiel)												

Kreishafen Rendsburg



Abfallwirtschaft Rendsburg-Eckernförde GmbH (AWR)



KVG

 <p>KVG fahr ich gern!</p>	<p>Kategorie</p> <p> Erzeugung  Infrastruktur  Nutzung</p> <p>Projektstatus</p> <p>Idee → in Planung → in Umsetzung → umgesetzt</p>	<p>Score ??/10</p> <p> Klimaschutz:</p> <p> Wettbewerbsfähigkeit:</p> <p> Umsetzung:</p> <p> Strategie:</p>
<p>Realisierung:</p>		<p>Kurzbeschreibung</p> <ul style="list-style-type: none">• Gespräch steht noch aus <p> Standort</p> <p>...</p>
<p>Projektpartner</p> <p>▶ ...</p>		

Uni Kiel

	<p>Kategorie</p> <p> Erzeugung  Infrastruktur  Nutzung</p> <p>Projektstatus</p> <p>Idee → in Planung → in Umsetzung → umgesetzt</p>	<p>Score 5,7/10</p> <table border="1"><tr><td></td><td>Klimaschutz:</td><td></td></tr><tr><td></td><td>Wettbewerbsfähigkeit:</td><td></td></tr><tr><td></td><td>Umsetzung:</td><td></td></tr><tr><td></td><td>Strategie:</td><td></td></tr></table>		Klimaschutz:			Wettbewerbsfähigkeit:			Umsetzung:			Strategie:	
	Klimaschutz:													
	Wettbewerbsfähigkeit:													
	Umsetzung:													
	Strategie:													
<p>Realisierung: 2023 - 2030</p>		<p>Kurzbeschreibung</p> <ul style="list-style-type: none">• Konzeptionierung Brennstoffzellensystem für den Fährbetrieb• Versuchsträger bis Prototyp <p>Standort</p> <p>Kiel</p>												
<p>Projektpartner</p> <ul style="list-style-type: none">▶ CAPTN Energy														

Verkehrsbetriebe Kreis Plön GmbH



**Verkehrsbetriebe
Kreis Plön GmbH**

Kategorie

 Erzeugung
  Infrastruktur
  Nutzung

Projektstatus

Idee
in Planung
in Umsetzung
umgesetzt

Score 7/10

- 🌱 Klimaschutz:
- 👥 Wettbewerbsfähigkeit:
- 💡 Umsetzung:
- ♟️ Strategie:

Realisierung: Sommer 2023 - 2026

Projektpartner

▶ ...

Kurzbeschreibung

- Prüfung der Flottenumstellung auf Wasserstoffbusse

📍 Standort

Kreis Plön: Betriebshöfe in Plön, Preetz, Schönberg, Lütjenburg, Bornhöved

HIP Kiel-Wellsee

 <p>Handels- und Industriepark Kiel-Wellsee e.V.</p>	<p>Kategorie</p> <p> Erzeugung  Infrastruktur  Nutzung</p> <p>Projektstatus</p> <p>Idee → in Planung → in Umsetzung → umgesetzt</p>	<p>Score ??/10</p> <p> Klimaschutz:</p> <p> Wettbewerbsfähigkeit:</p> <p> Umsetzung:</p> <p> Strategie:</p>
<p>Realisierung:</p>		<p>Kurzbeschreibung</p> <ul style="list-style-type: none">• 180 LOI-Geber, die an einem klimaneutralen Industriepark interessiert sind• Wasserstoff für die Mobilität, Abwärme für Unternehmen <p>↔ Standort</p> <p>Stadt Kiel, KN Druckzentrum</p>
<p>Projektpartner</p> <ul style="list-style-type: none">▶ Deutsche Post▶ Logistikunternehmen▶ Großwäscherei		

HÖRMANN Vehicle Engineering GmbH

	<p>Kategorie</p> <p> Erzeugung  Infrastruktur  Nutzung</p> <p>Projektstatus</p> <p>Idee → in Planung → in Umsetzung → umgesetzt</p>	<p>Score 4/10</p> <table border="1"><tr><td></td><td>Klimaschutz:</td><td></td></tr><tr><td></td><td>Wettbewerbsfähigkeit:</td><td></td></tr><tr><td></td><td>Umsetzung:</td><td></td></tr><tr><td></td><td>Strategie:</td><td></td></tr></table>		Klimaschutz:			Wettbewerbsfähigkeit:			Umsetzung:			Strategie:	
	Klimaschutz:													
	Wettbewerbsfähigkeit:													
	Umsetzung:													
	Strategie:													
<p>Realisierung: 2030</p>		<p>Kurzbeschreibung</p> <ul style="list-style-type: none">• Entwicklung Wasserstoff-Straßenbahn• Konzeptstudie (Prototyp 2025/2026 in Görlitz) <p>Standort</p> <p>Kiel</p>												
<p>Projektpartner</p> <p>▶ KVG?</p>														

Agenda

- ▶ Methodik
- ▶ Auswertung der Projekte
- ▶ **Empfehlungen**

Auf der Grundlage der Punktzahlen empfehlen wir, diese Projekte im HyExperts zu betrachten.

Projektauswahl

	Erzeugung	Infrastruktur	Nutzung
Prio 1			   
Prio 2	 	 	

Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit.

HyExperts KielRegion Handels- und Industriepark Kiel- Wellsee

2. Workshop



Inhalt und Zielsetzung des Foliensatzes

- ▶ Im Rahmen des zweiten Workshops zum Handels- und Industriepark Kiel-Wellsee konnten zwei beispielhafte Gewerbe identifiziert werden für eine Dekarbonisierung. Dabei handelt es sich um Großbäckereien und Großwäschereien. Dieser Foliensatz beinhaltet Beispiele für erneuerbare Alternativen zu bestehenden Prozessen und setzt diese in wirtschaftlichen Kontext. Zusätzlich wird das Feld der Wasserstoffmobilität beleuchtet.
- ▶ Zu den Fragestellungen gehören:
 - ▶ Welche Prozesse können technisch auf erneuerbare Gase umgestellt werden?
 - ▶ Mit welchen Gestehungskosten ist zu rechnen?
 - ▶ Wie setzen sie sich zusammen und welche Faktoren haben maßgeblichen Einfluss?
 - ▶ Wie kann Abwärme nutzbar gemacht werden?
 - ▶ Welche Gestehungskosten ergeben sich?

Wärme



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr



NOW - GMBH . DE



Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich



KielRegion

The background is a dark blue color. It features several thin, bright yellow lines that form a complex, abstract pattern. These lines create a series of interconnected shapes, including a large, rounded rectangular area on the left and a series of lines that extend towards the right, resembling a stylized arrow or a path. The overall effect is modern and technical.

Prozesswärme

Derzeitige Bereitstellung der Prozesswärme in Großbäckereien und Großwäschereien.

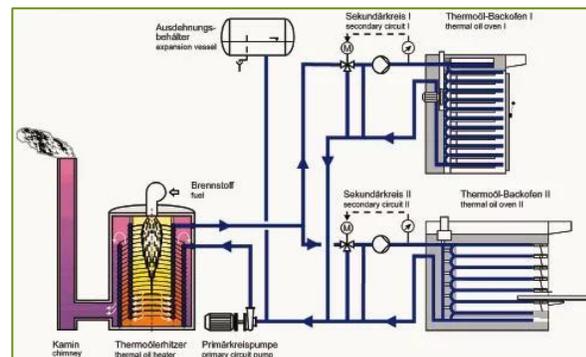
Energetische Prozesse in Großbäckereien und Großwäschereien

Großbäckerei

- Zentrale Energieversorgung für gemeinsame und zugleich maßgeschneiderte Wärmeversorgung mehrerer Backöfen (Backkammern)
- Wärmeerzeugung i.d.R. außerhalb der Backstube über zentrale Thermoölerhitzung
- Teilweise auch direkte Wärmeerzeugung im Backofen selbst (Stikkenofen)

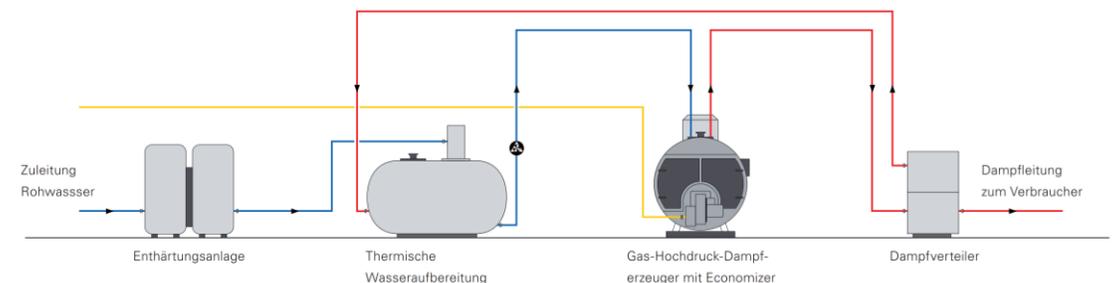
Thermischer Kreislauf der Prozesswärme mit Thermoölmwälzung

Prozesstechnik Industrie 2003



Großwäscherei

- Zentrale Dampferzeugung in einem separaten Dampfraum und Verteilung zu den einzelnen Verbrauchseinrichtungen über Dampfleitung
 - Waschmaschinen, Glättung der Textilien, Beheizung der Trockner, Bügeln, Mangeln, Finisher
- Teilweise auch direkte Beheizung der Geräte



Aufbau Dampferzeugung und -verteilung (Speisepumpe und Kondensatentspanner nicht abgebildet)

Vießmann 2014

Mit Erdgas betriebene Erhitzer oder Dampfkessel können bereits heute zu H₂-ready Wärmeerzeugern umgebaut werden.

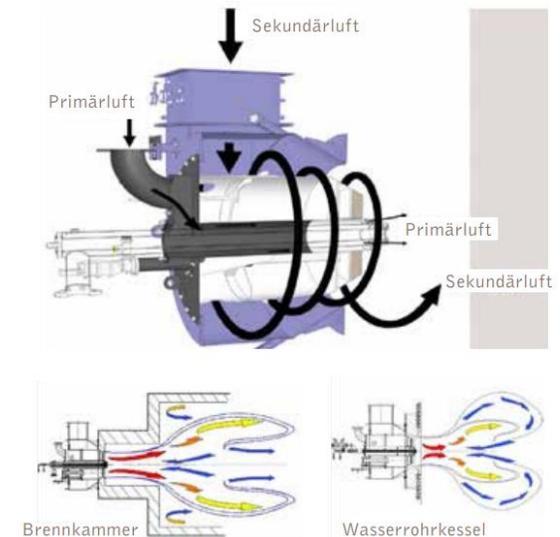
Produktbeispiele für H₂-Brenner oder H₂-Hybriderhitzer und H₂-Verdampfer



Hybrid Thermoölerhitzer mit H₂-Verbrennungsmöglichkeit
(Webbäcker/HEUFT)



H₂-ready-Hockdruckdampfkessel
bis 5.2 t/h Leistung und bis 300° C
Heißdampferzeugung (BOSCH)



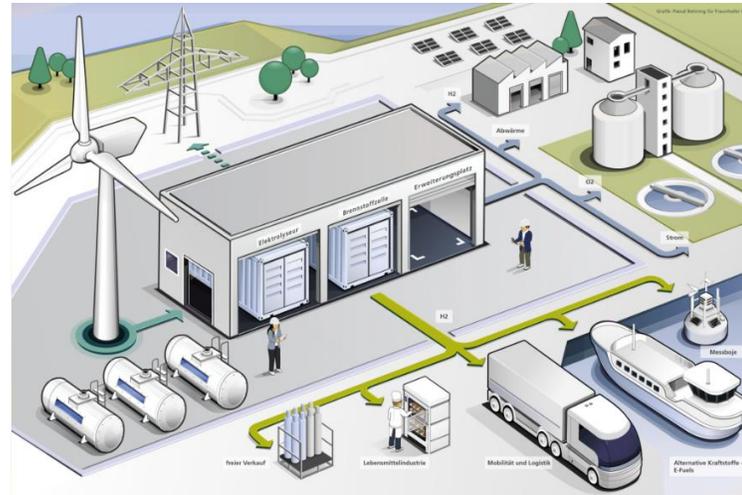
H₂-Brenner im MW-Bereich bis zu
100% reiner H₂-Anteil möglich
(SAACKE)

H₂-Öfen und H₂-Verdampfer werden schon heute in Pilotprojekten in Deutschland oder Europa erfolgreich erprobt.

Anwendungsbeispiele für H₂-Brenner oder H₂-Kessel und H₂-Verdampfer



Direkt befeuerter H₂-Backofen von Den Boer
(Brot und Backwaren/Den Boer 2021)



Entwicklung eines H₂-Backofens im Rahmen des Forschungsprojekts „Wasserstoff – grünes Gas für Bremerhaven“ (Wind-Wasserstoff-Bremerhaven)



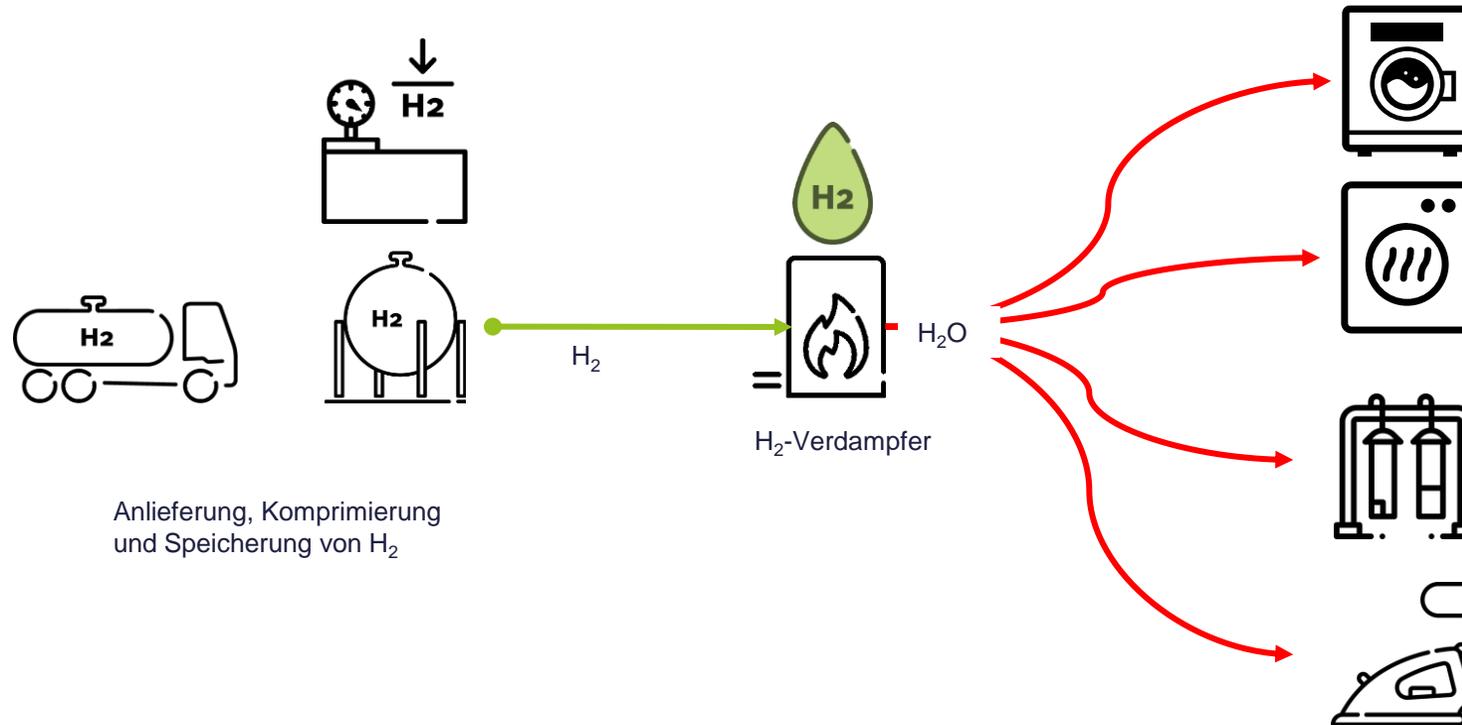
H₂-Brenner im Einsatz bei einem Spezialchemikalienunternehmen in Nordrhein-Westfalen (SAACKE)



H₂-Dampfkessel mit einer Leistung von 12t/h für ein polnisches Chemieunternehmen (BOSCH)

H₂-basierte Wärmeerzeugungstechnologien können sehr gut in die Energieprozesse einer Großwäscherei integriert werden.

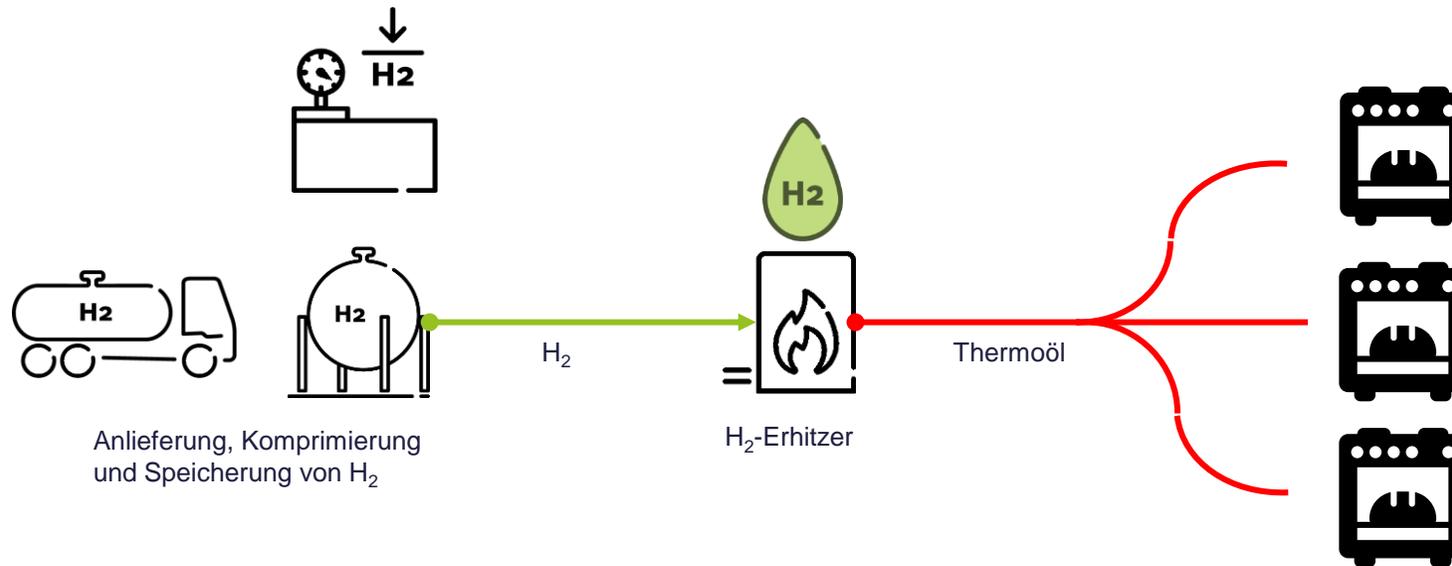
Schaubild der H₂-basierten Wärmeerzeugung in einer Großwäscherei



Beschreibung und Darstellung der Verbrauchsanlagen ;Icons

H₂-basierte Wärmeerzeugungstechnologien können sehr gut in die Energieprozesse einer Großbäckerei integriert werden.

Schaubild der H₂-basierten Wärmeerzeugung mit Thermoöllumlauf in einer Großbäckerei



Beschreibung und Darstellung der Verbrauchsanlagen; Icons

Durch technische Features können erhöhte Umweltrisiken und Sicherheitsrisiken von der H₂-Verbrennung signifikant reduziert werden.

Umweltbilanz und Betriebssicherheit bei Verbrennung von H₂

- Bei H₂ schnellere **Entflammung**, größere **Flammtemperatur** und größerer **Entflammbarkeitsbereich** als bei Erdgas
- 3 Mal höheres **NO_x-Emissionen** bei der Verbrennung von H₂ als bei der Verbrennung von Erdgas
- **Reduktion** der NO_x-Emissionen (auf Erdgasniveau) durch **Rauchgaszirkulation (Abgaszirkulation** zur Reduktion der Flammtemperatur), **Flammenrückschlagsicherung** und adaptiertes Design bei der **Gaseindüsung**
 - ▶ **Herstellerangaben** von < 60 mg/Nm³

Großbäckereien und Großwäschereien sind repräsentative und zugleich unterschiedliche Anwendungsfälle im Bereich der Prozesswärme.

Annahmen & Rahmenbedingungen Prozesswärme

Großbäckerei

- Etagendurchlauföfen mit Thermoölmwärmung
 - ▶ Thermoölerhitzung über Erhitzer
- Jährlicher Wärmebedarf von 3,5 GWh
 - ▶ Maximale Leistung ≈ 1.100 kW
- Gas-Substitution durch H_2 -Brenner für bestehenden Erhitzer bzw. neuen H_2 -ready-Erhitzer
- Mobiler Wasserstoffspeicher
 - ▶ Belieferung über H_2 -Trailer
- Betrachtungszeitraum 20 Jahre
 - ▶ Zinssatz 7% p.a.
 - ▶ Betrachtung ohne Förderung
- Benötigte Elektrolyseurleistung: $2,5 \text{ MW}_{el}$

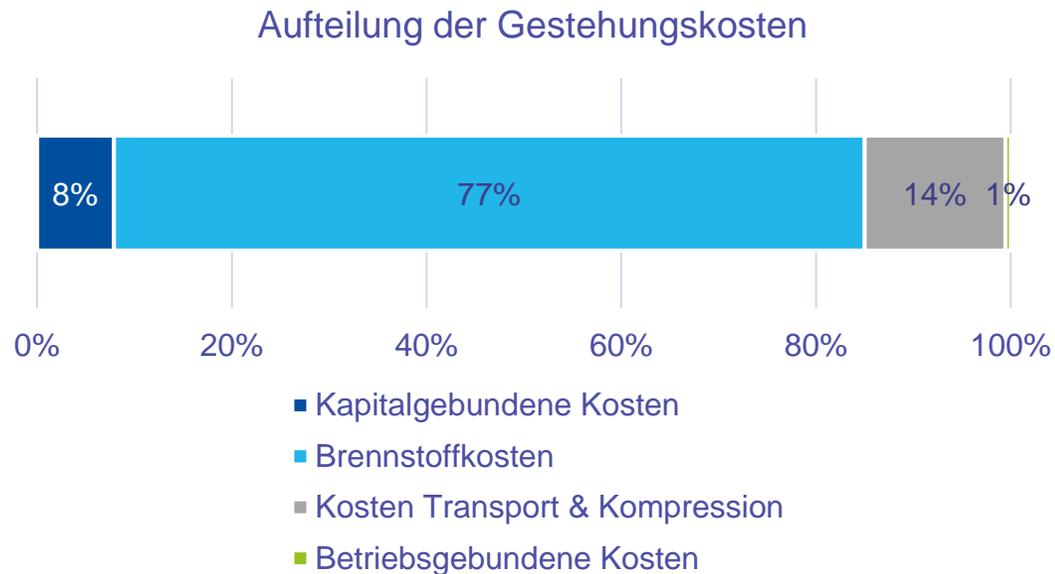
Großwäscherei

- Fokus: Hochdruckdampfkessel (weitere Prozesse ausgeklammert)
- Jährlicher Wärmebedarf von 6,3 GWh
 - ▶ Maximale Leistung ≈ 2.000 kW (Erzeugungsauslegung 4.000 kW)
- Gas-Substitution durch H_2 -Brenner für bestehenden Verdampfer bzw. neuen H_2 -ready Verdampfer
- Mobiler Wasserstoffspeicher
 - ▶ Belieferung über H_2 -Trailer
- Betrachtungszeitraum 20 Jahre
 - ▶ Zinssatz 7% p.a.
 - ▶ Betrachtung ohne Förderung
- Benötigte Elektrolyseurleistung: 4 MW_{el}

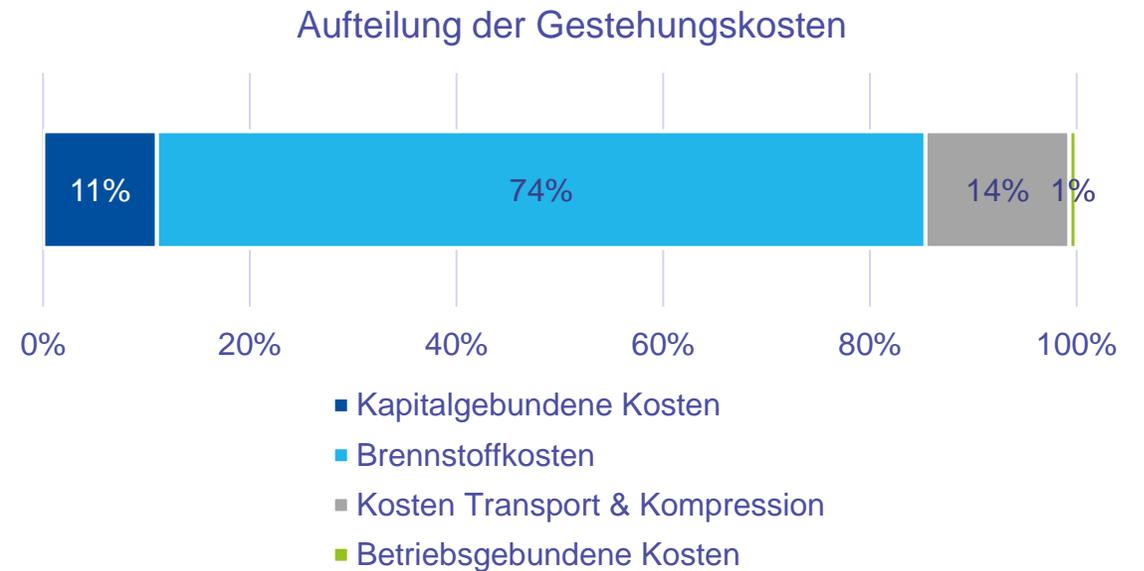
Das H₂-System ist aufgrund hoher Brennstoffkosten im Vergleich mit dem bestehenden System nicht wirtschaftlich.

Ergebnisse Prozesswärme: Wärmegestehungskosten je Anwendungsfall

Großbäckerei mit H₂-Erhitzer: 38 ct./kWh



Großwäscherei mit H₂-Verdampfer: 35 ct./kWh



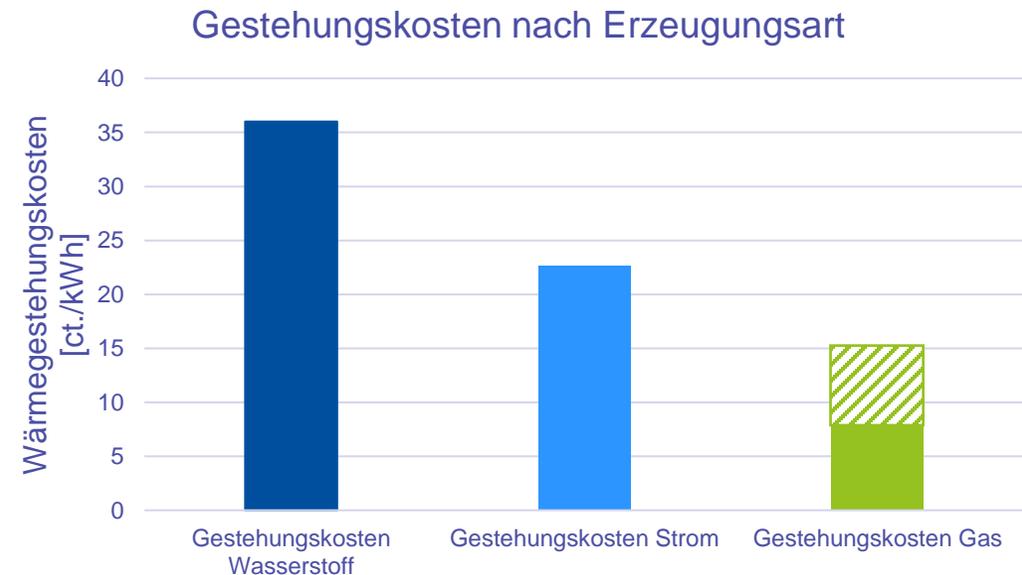
Ein Elektrodenheizstab ist im Vergleich mit dem bestehenden System aufgrund hoher Stromkosten nicht wirtschaftlich.

Ergebnisse Prozesswärme: Wärmegestehungskosten je Erzeugungsart

Großbäckerei mit Heizstab: 22,5 ct./kWh



Großwäscherei mit Heizstab: 22,6 ct./kWh



Der Wasserstoffpreis verändert die Gesteungskosten eines H₂-Systems signifikant.

Sensitivität Gesteungskosten für Prozesswärme

Allerdings ist das H₂-System auch bei sehr niedrigem Wasserstoffpreis im Vergleich mit dem bestehenden System nicht wirtschaftlich.

Großbäckerei: 36 ct./kWh bei 8 €/kg H₂



Großwäscherei: 35 ct./kWh bei 8 €/kg H₂



Abwärmeeinbindung

The background features a dark blue field with several thin, bright yellow lines. These lines form a series of interconnected, angular shapes that resemble a stylized, abstract architectural or technical drawing. The lines are primarily vertical and diagonal, creating a sense of depth and structure.

Abwärme unterschiedlichster Temperaturen kann mit Hilfe von Wärmepumpen nutzbar gemacht werden.

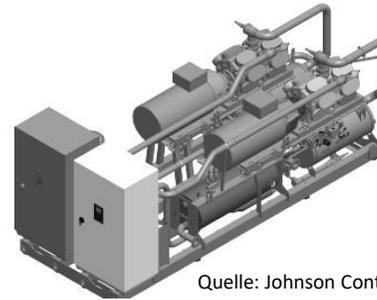
①



Quelle: GP Joule



②



Quelle: Johnson Controls

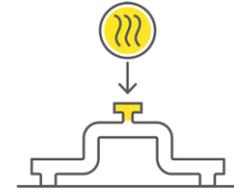
80 °C VL



55 °C RL

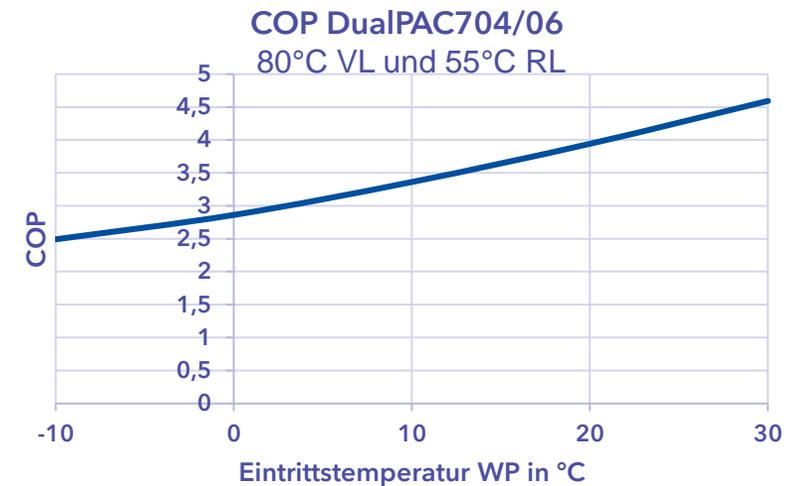


③



- ① Luft erwärmt Flüssigkeit in V-Kühlern oder Tischkühlern
- ② Wärmepumpe nutzt gewonnene Wärme und erhöht deren Temperatur mit Hilfe von Strom
- ③ Wärmepumpe gibt die Wärme an das Fernwärmenetz ab

Der Abwärmenutzung ist technisch machbar und wirtschaftlich sinnvoll.



Zur Verringerung der Heizlast kann überschüssige Abwärme in Puffern gespeichert werden.

Kombination mit Pufferspeicher zur Flexibilisierung der Betriebsweise



84 m³ Pufferspeicher in Bosbüll (GP JOULE)

Bei steigenden Bedarfen, kann die gespeicherte Wärme an den Heizkreislauf abgegeben werden.

Pufferspeicher

- Speicherung als Warmwasser
- Volumen individuell skalierbar
 - ▶ 50m³-3000m³
- Wartungsarm, erprobt und umweltfreundlich

Die Abwärme der Produktion kann für die Gebäudeheizung weiterverwendet werden und senkt dadurch Betriebskosten.

Anforderungen an bestehende Gebäudeheizung

- Einbindung der Wärmezuleitung
 - ▶ DN20 / DN25 Anschlussstelle
- Vorlauftemperatur 75-80°C
- Rücklauftemperatur 55-60°C

Effektiv erhöht sich die Effizienz der eingesetzten Anlagen.



Bildquelle GP Joule

Die notwendige Wärme wird über eine Übergabestation an die Gebäude übergeben.

Die Wärme-Übergabestation des Herstellers YADOS

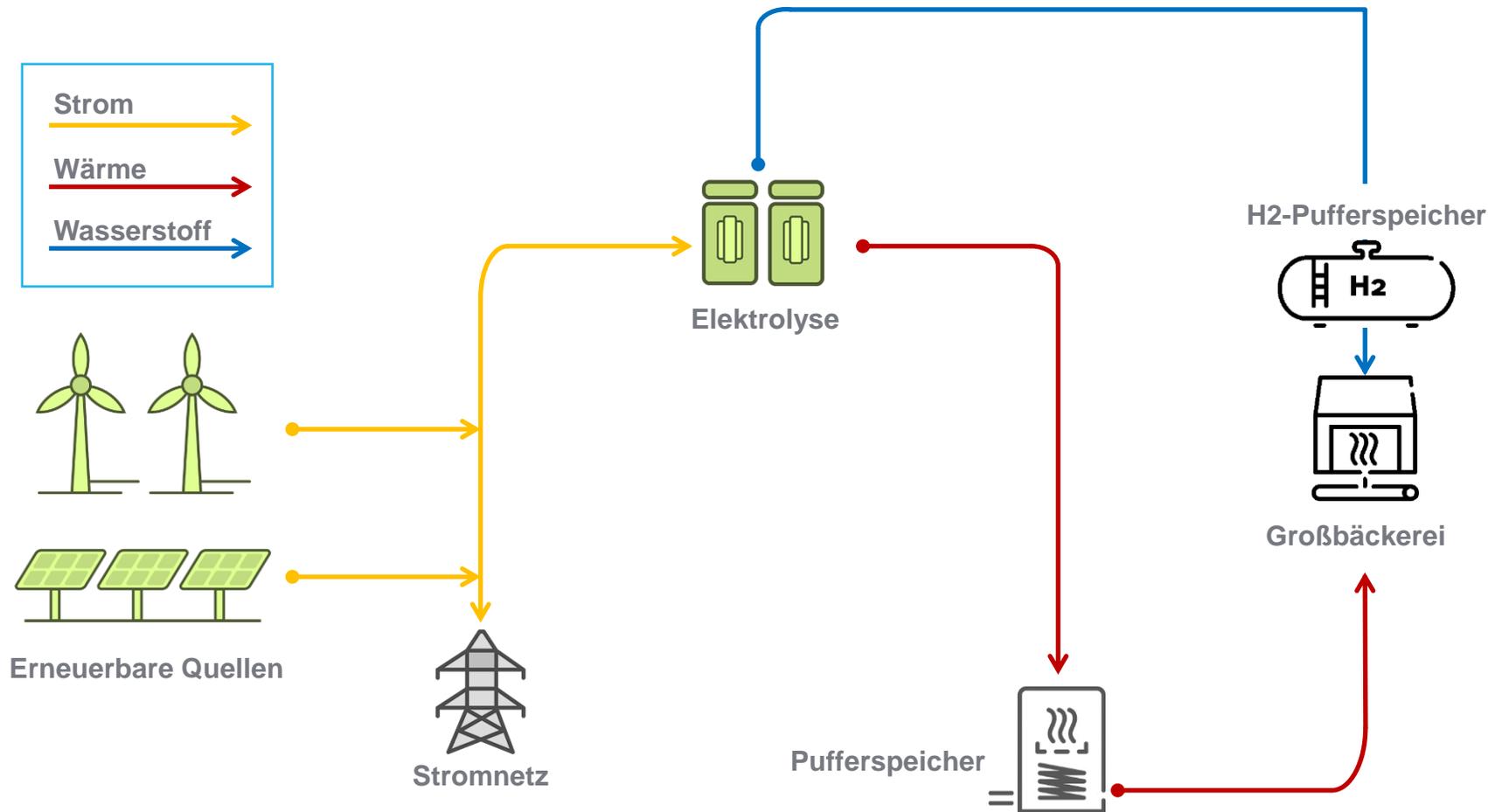


Übergabestation Quelle YADOS GmbH

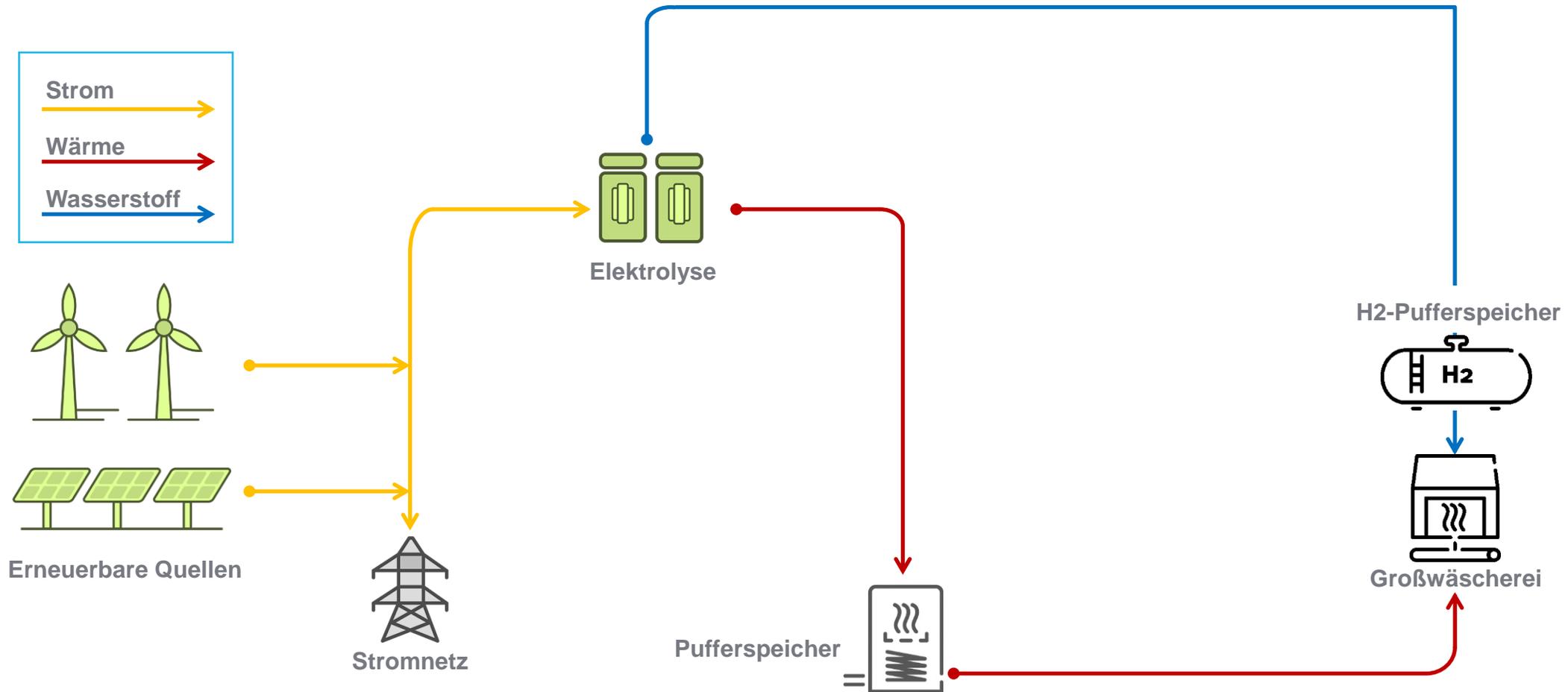
Weitere Wärmequellen können oft ohne erneuten Austausch der Übergabestation hinzukommen.

- Steuert mehrere Heizkreisläufe
- Bedienung per Touchdisplay
- Fernwartung durch eigenes Datenkabel

Konzepte zur Versorgung potenzieller Unternehmen können auf unterschiedlichste Weise, auch in Kombination, realisiert werden.



Konzepte zur Versorgung potenzieller Unternehmen können auf unterschiedlichste Weise, auch in Kombination, realisiert werden.



Großbäckereien und Großwäschereien sind repräsentative und zugleich unterschiedliche Anwendungsfälle im Bereich der Abwärmeeinbindung.

Annahmen & Rahmenbedingungen Abwärmeeinbindung für Raumwärme

Großbäckerei

- Voraussetzung: Fußbodenheizung/zentrales Lüftungssystem (Vorlauftemperatur $\approx 60^\circ \text{C}$)
- Jährlicher Wärmebedarf von 350 MWh
 - ▶ Maximale Leistung $\approx 318 \text{ kW}$
- Abwärmenutzung eines Elektrolyseurs über Nahwärmezuleitung
- 2-MW-Elektrolyseur mit $\approx 6.500 \text{ VBH}$
 - ▶ Erzeugungsprofil PV-Wind-Strom
 - ▶ $\approx 360 \text{ kW}$ Abwärmeleistung*
- Bestehende Heizungsanlage als Redundanz
- Betrachtungszeitraum 20 Jahre
 - ▶ Zinssatz 7% p.a.
 - ▶ Investförderung 20% (BEG-Förderung)

Großwäscherei

- Voraussetzung: Fußbodenheizung/zentrales Lüftungssystem (Vorlauftemperatur $\approx 60^\circ \text{C}$)
- Jährlicher Wärmebedarf von 720 MWh
 - ▶ Maximale Leistung $\approx 790 \text{ kW}$
- Abwärmenutzung eines Elektrolyseurs über Nahwärmezuleitung
- 3-MW-Elektrolyseur mit $\approx 5.800 \text{ VBH}$
 - ▶ Erzeugungsprofil PV-Wind-Strom
 - ▶ $\approx 540 \text{ kW}$ Abwärmeleistung*
- Bestehende Heizungsanlage als Redundanz
- Betrachtungszeitraum 20 Jahre
 - ▶ Zinssatz 7% p.a.
 - ▶ Investförderung 20% (BEG-Förderung)

* Auf Basis des gemittelten Abwärmewirkungsgrades im Lebenszyklus von 18%

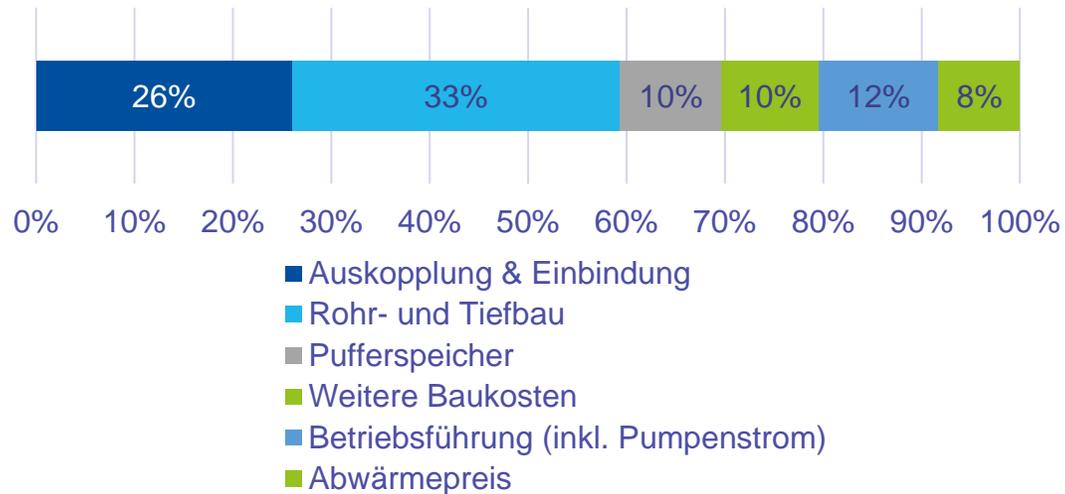
Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)

Wirtschaftlichkeit gegenüber bestehendem System insbesondere abhängig von der Wärmeliniedichte der Zuleitung.

Ergebnisse Abwärmeeinbindung: Wärmegestehungskosten je Anwendungsfall

Großbäckerei mit 500-Meter-Zuleitung: 21 ct./kWh

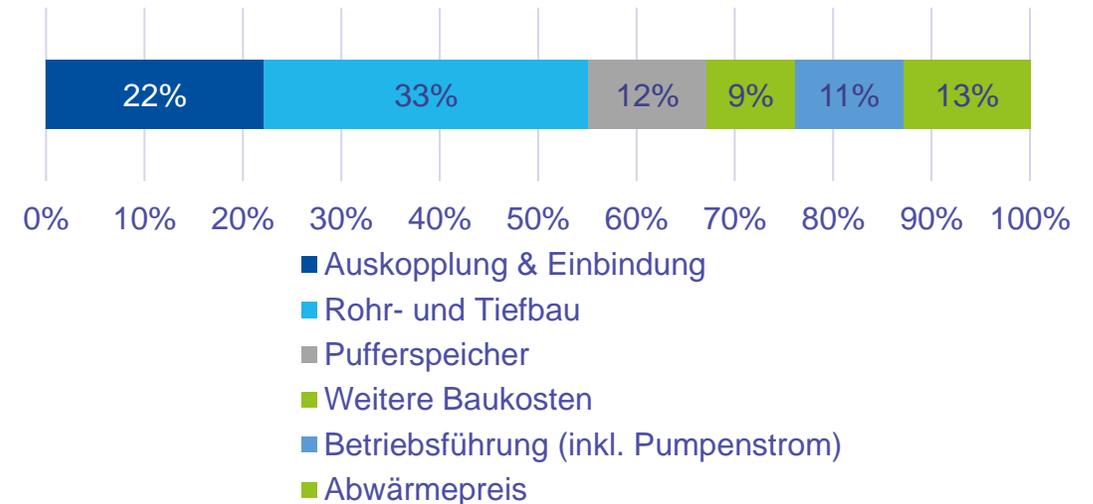
Aufteilung der Gestehungskosten



➤ Nutzung von 18% des Abwärmepotenzials

Großwäscherei mit 500-Meter-Zuleitung: 12,7 ct./kWh

Aufteilung der Gestehungskosten



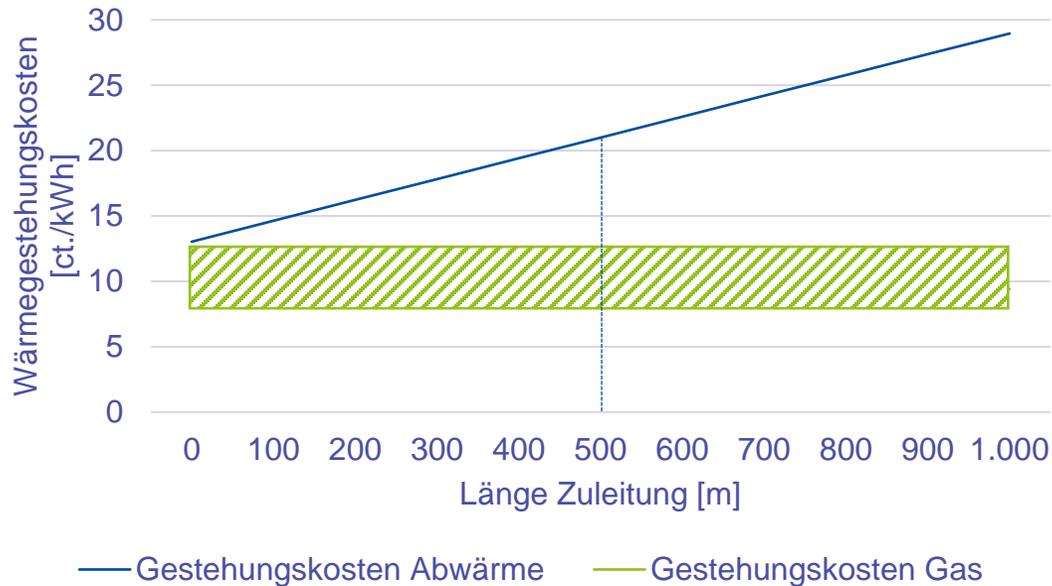
➤ Nutzung von 26% des Abwärmepotenzials

Die Länge der Zuleitung verändert die Gesteungskosten eines H₂-Systems signifikant.

Sensitivität I Gesteungskosten für Abwärmeeinbindung

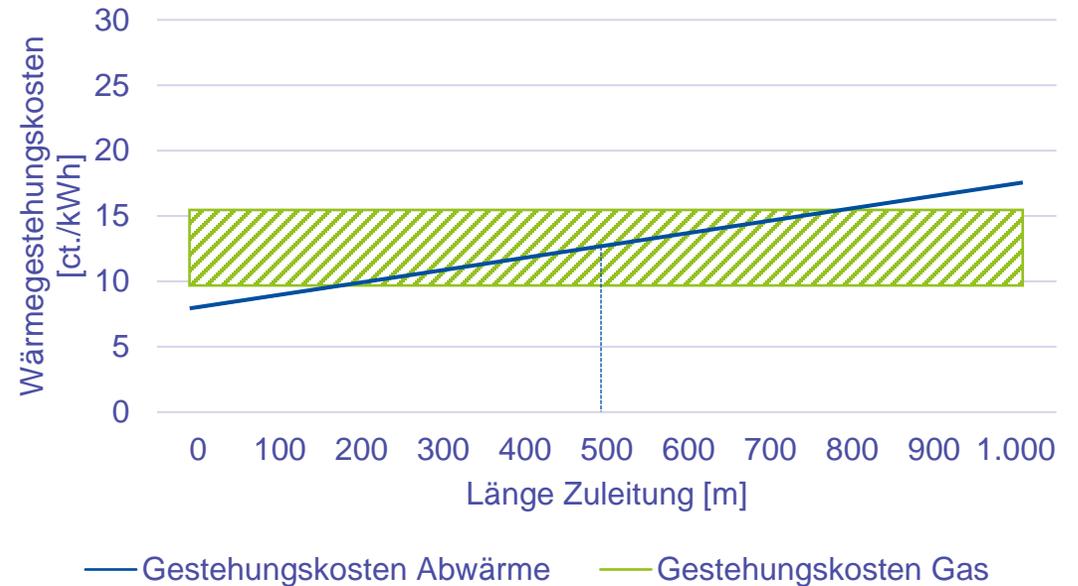
Das H₂-System kann bei niedrigeren Zuleitungslängen im Vergleich zum bestehenden System wirtschaftlich sein.

Großbäckerei 21 ct./kWh bei 500-Meter-Zuleitung:



Inkl. Veränderter Netzverluste in Abhängigkeit der Zuleitungslänge.

Großwäscherei 12,7 ct./kWh bei 500-Meter-Zuleitung

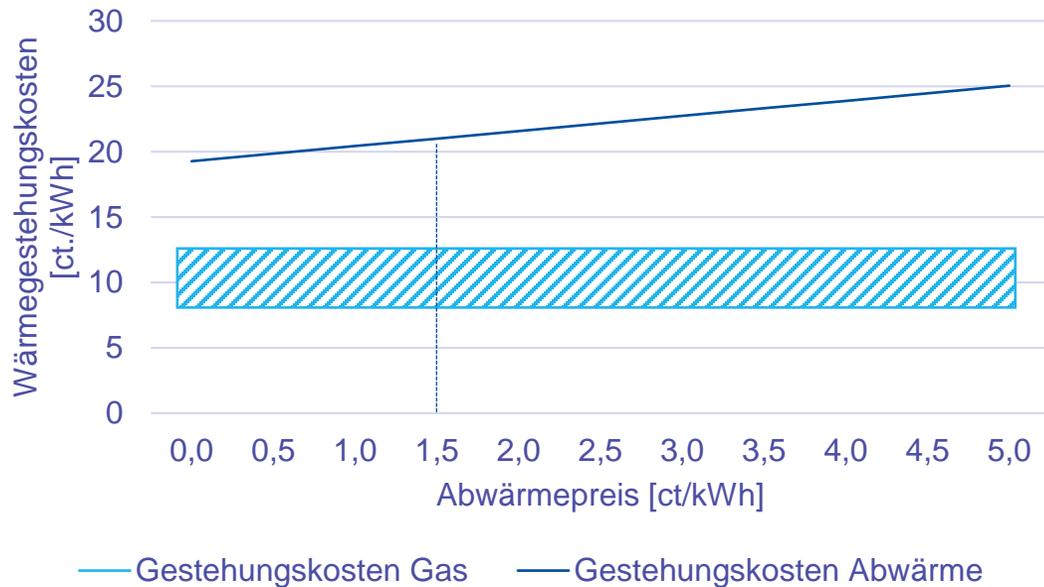


Der Preis für die Abwärme verändert die Gesteungskosten eines H₂-Systems signifikant.

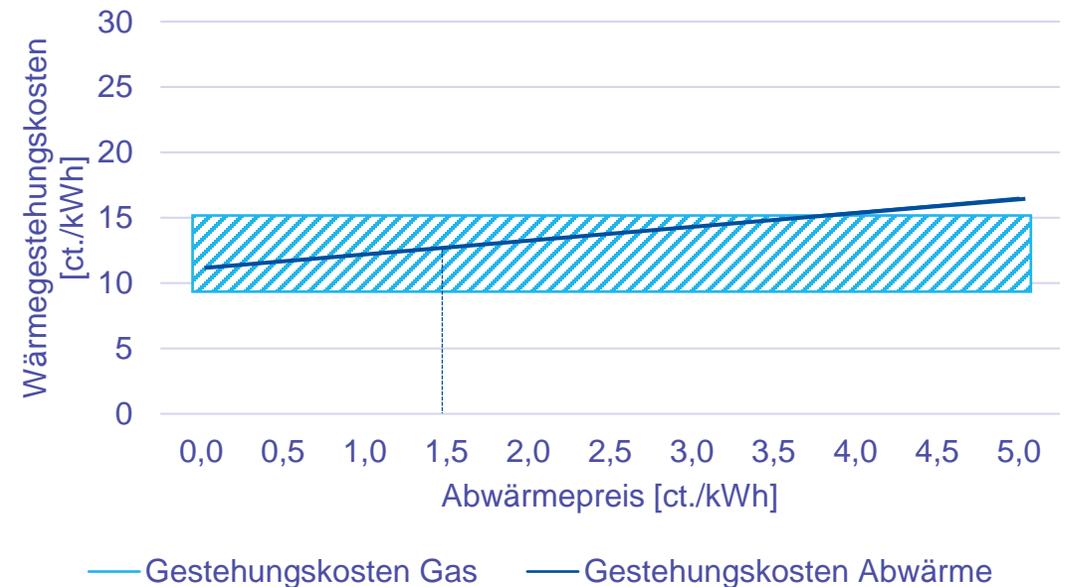
Sensitivität II Gesteungskosten für Abwärmeeinbindung

Das H₂-System kann bei niedrigeren Abwärmepreisen im Vergleich zum bestehenden System wirtschaftlich sein.

Großbäckerei 21 ct./kWh bei Abwärme für 1,5 ct./kWh:



Großwäscherei 12,7 ct./kWh bei Abwärme für 1,5 ct./kWh:



Mobilität

Brennstoffzellen-LNF

Technologiebeschreibung

Unter dem Begriff der leichten Nutzfahrzeuge (LNF) werden in diesem Steckbrief Nutzfahrzeuge der Gewichtsklasse <3,5 t zusammengefasst (Transporter und Sprinter). BZ-LNF nutzen gasförmigen Wasserstoff und können sowohl 350 als auch 700 bar betankt werden. Sie emittieren ausschließlich Wasserdampf und sind damit lokal CO₂-frei.

Technische Parameter

Reichweite: 350-450 km

Verbrauch: 1-1,8 kg/100km

Betankungsdruck: 350/700 bar

Tankvolumen: 4-5 kg

Betankungsdauer : 3-5 min

Kosten

Anschaffungskosten zwischen 50.000 – 80.000 € (CAPEX)¹

Förderung

80% der Investitionsmehrkosten im Vergleich zu einem Verbrennerfahrzeug² · KsNI Richtlinie des Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV)

Brennstoffzellen LNF



Vorteile und Herausforderungen

- Hohe Reichweite: Über 400 km
- Keine lokalen Emissionen und geringe Geräuschbelastung
- Kurze Betankungszeit
- Aufbau einer Tankinfrastruktur notwendig (wenn nicht öffentlich vorhanden)
- Kurz- bis mittelfristig höhere Investitionskosten(als Verbrennerfahrzeuge)

¹ Die Anschaffungskosten basieren auf öffentlich bekannten Preisen und Angeboten von Herstellern

² Bundesministerium für Verkehr und digital Infrastruktur

Brennstoffzellen-LNF

Marktübersicht Hersteller

- Renault – Kangoo/Master Z.E. Hydrogen (BZ-REX-Transporter, Einzelne Fahrzeuge seit 2015 ausgeliefert)
- Opel, Transporter, Vivaro-e Hydrogen, BZ-Transporter, in Serie
- Citroën, Transporter, ë-Jumpy Hydrogen, in Serie
- Peugeot, Transporter, e-Expert Hydrogen, in Serie

Best-Practice Projekt

Auslieferung des ersten Opel Vivaro-e Hydrogen in 2021¹

- Kunde: Hausgerätehersteller Miele
- Einsatz im Außendienst im Rhein-Main-Gebiet
- Nutzung als Kastenwagen

¹ <https://insideevs.de/news/553619/opel-vivaroe-hydrogen-wasserstofftransporter-gestartet/>, abgerufen 22.11.22
30.11.2023

Brennstoffzellen-SNF

Technologiebeschreibung

Unter dem Begriff der schweren Nutzfahrzeuge (SNF) werden in diesem Steckbrief vereinfachend Nutzfahrzeuge der Gewichtsklasse > 3,5 t zusammengefasst. BZ-SNF sind als Solo-Lkw, Gliederzug und Sattelschlepper in verschiedenen Gewichtsklassen auf dem Markt. Sie nutzen heute primär gasförmigen, ab ca. 2025 auch flüssigen Wasserstoff. BZ-SNF emittieren ausschließlich Wasserdampf und sind damit lokal CO₂-frei.

Technische Parameter

Reichweite: 400-1200 km

Verbrauch: 7-10 kg/100 km

Betankungsdruck: Heute 350 bar, ab 2023 700 bar, ab 2025 auch flüssig

Tankvolumen: > 35 kg

Betankungsdauer : 8-15 min

Kosten

Anschaffungskosten zwischen 350.000 – 800.000 € (CAPEX)¹

Förderung

80% der Investitionsmehrkosten im Vergleich zu einem Verbrennerfahrzeug² - KsNI Richtlinie des Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV)

Brennstoffzellen SNF



Weiss / J.Scheutzwow

Vorteile und Herausforderungen

- Hohe Reichweite: Heute 400-500 km, zukünftig bis 1500 km
- Keine lokalen Emissionen und geringe Geräuschbelastung
- Tankzeit vergleichbar mit Diesel-Lkw
- Aufbau einer Tankinfrastruktur notwendig (wenn nicht öffentlich vorhanden)
- Kurz-bis mittelfristig höhere Investitionskosten (als Verbrennerfahrzeuge)

¹ Die Anschaffungskosten basieren auf öffentlich bekannten Preisen und Angeboten von Herstellern

² Bundesministerium für Verkehr und digital Infrastruktur

Brennstoffzellen-SNF

Marktübersicht Hersteller

- Hyundai – Motorwagen, Xcient Fuel Cell, 36 t zGG, 350 bar, in Serie
- Hyundai – Sattelzugmaschine, 40 t zGG, Prototyp, ab ca. 2024 erhältlich
- Hyzon Motors – Motorwagen/Sattelzugmaschine, HyMax 250/450, 40-42 t zGG, 350 bar, in Serie
- Clean Logistics – Sattelzugmaschine, Fyuriant, 40 t zGG, 250 bar, in Serie
- Daimler/Benz – Sattelzugmaschine, Actros HyBatt, 40 t zGG, 350 bar, erste Fahrzeuge im Mietmodell (hylane) erhältlich
- MAN/Framo – Sattelzugmaschine, FC 260/280 Wechselbrücke, 26 t zGG, 350 bar, erste Fahrzeuge im Mietmodell (hylane) erhältlich
- Quantron - Sattelzugmaschine, QHM FCEV, 44 t zGG, 700 bar Betankung, SOP Q2 2023
- Paul Nutzfahrzeuge – Sattelzugmaschine, PHP2 truck, 16 z zGG Solo / 24 t zGG mit Anhänger, ab 2023 in Serie
- Nicola/ IVECO – Sattelzugmaschine, Tre, FCEV, 44 t zGG, 700 bar, ab 2024

Weitere Hersteller in Entwicklung/vor Markteintritt (unvollständig): Faun, Scania, Toyota (nicht für europ. Markt), VDL

Best-Practice Projekt

Einsatz von Hyundai Brennstoffzellen-LKWs in der Schweiz¹:

- Projektstart 2020, Vorteil der Einsparung der LSVA-Straßensteuer
- Bisher sind etwa 50 Fahrzeuge im Einsatz
- Leasing auf einer „Pay-Per-Use“ Basis
- Bis 2025 plant Hyundai den Einsatz von 1600 Fahrzeugen in der Schweiz

BZ-Lkw im Mietmodell durch hylane in Deutschland

- Projektstart 2022, 4 verschiedene BZ-Hersteller
- Sattelschlepper und Hängerzüge im Angebot

¹ Hyundai Hydrogen Mobility (HHM)
30.11.2023

Die Verwendung von Wasserstoff in Kleintransportern ist bereits wettbewerbsfähig mit den Kosten von Diesel.

TCO*-Betrachtung der Sprinter

Großbäckerei

(Laufleistung: 60.000 km/a)



Großwäscherei

(Laufleistung: 20.000 km/a)



*Total Cost of Ownership

Anschaffungskosten FCEV: 37.550 €, Diesel: 32.985 €, Wasserstoffpreis: 9,00 €/kg (netto), Dieselpreis: 2,20 €/l, Wasserstoffverbrauch: 1,56 kg/100km, Dieselpverbrauch: 8,60 l/100km, Abschreibungsperiode – Lebensdauer des System FCEV: 6 a, Diesel: 6 a, Kalkulatorischer Zinssatz: 0,07 [-]

Mit Fördermitteln werden die Kapitalkosten von FCEV-SNF mit Diesel-SNF vergleichbar.

TCO-Betrachtung der Schwernutzfahrzeuge

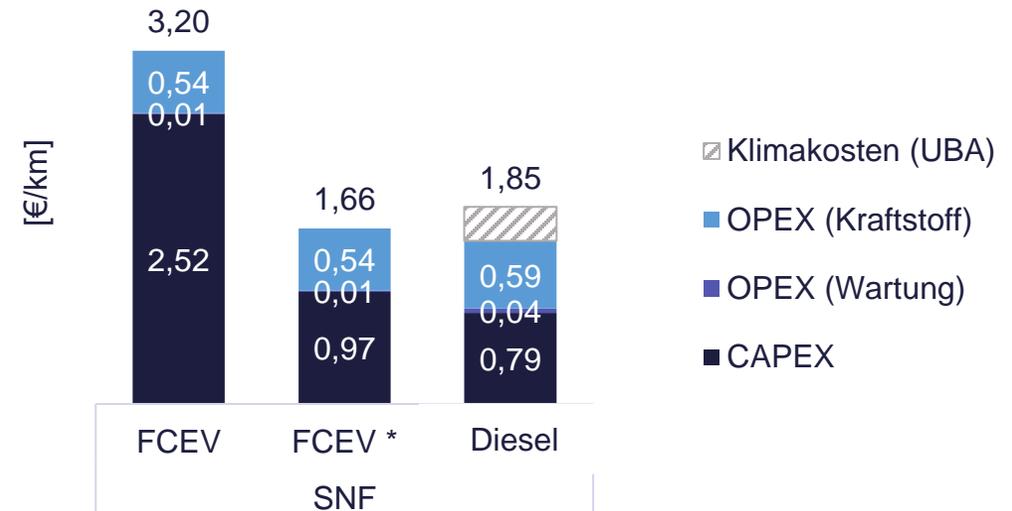
Großbäckerei

(Laufleistung: 60.000 km/a)



Großwäscherei

(Laufleistung: 30.000 km/a)



Anschaffungskosten FCEV: 360.000 €, Diesel: 84.000 €, Wasserstoffpreis: 7,98 €/kg, Dieselpreis: 2,20 €/l, Wasserstoffverbrauch: 6 kg/100km, Dieselpverbrauch: 26,70 l/100km, Abschreibungsperiode – Lebensdauer des System FCEV: 6 a, Diesel: 4 a, Kalkulatorischer Zinssatz: 0,07 [-]



HyExperts KielRegion Gewerbegebiet Blaupause



Einleitung

Bezug, Inhalt und Zielsetzung des Foliensatzes

Im Rahmen des Projektes HyExperts KielRegion entstand der Wunsch nach einer „Blaupause“ für zukünftige Gewerbegebiete.

Diese Gewerbegebiete sollten von Beginn an die optimale Nutzung von Wasserstoff und Abwärme ermöglichen, um zukunftssicher zu sein und die Ergebnisse des Projektes anzuwenden.

Dieser Foliensatz fasst einige wichtige Informationen für eine erfolgreiche Planung solcher Gewerbegebiete zusammen und befasst sich mit den Fragestellungen:

- Welche generellen Anforderungen sind zu erfüllen? (Flächenbedarfe, Spartenanschlüsse, Temperaturniveaus)
- Wie können Wärmepumpen und Elektrolyseure zur Deckung des Wärmebedarfs eingesetzt werden?

Anforderungen an erneuerbare Wärmenetze bei der Planung neuer Gewerbegebiete

Anforderungen für die Realisierung eines Nahwärmenetz in einem Gewerbeprojekt (1 von 2)

- **Flächenbedarf** für die Heizzentrale (s. nächste Folie)
 - ▶ Abhängig von der **Größe des Wärmebedarfs** und den ausgewählten **Erzeugungstechnologien**
 - ▶ Planung der Heizzentrale außerhalb von **Wasserschutzgebieten**
 - ▶ Bei Planung der Heizzentrale Berücksichtigung der **länderspezifischen Bauordnung**
- **Geteerte Anbindung** der Heizzentrale an das öffentliche Straßennetz
 - ▶ Bau, Installation und Betriebsführung der Heizzentrale
 - ▶ Ggf. für Zulieferung von Brennstoffen (Biomasse oder Biomethan)
- Berücksichtigung von **Abstandregelungen** zwischen Heizzentrale und (Wohn)bebauung gemäß [BlmSchG](#)
 - ▶ Errichtung Luftwärmepumpe bei einer Distanz von $\approx > 200 \text{ m}^*$ i.d.R. ohne **Schallschutzmaßnahmen** umsetzbar
- Rechtzeitige Prüfung der **Netzanschlusssituation**
 - ▶ Je nach elektrischem Leistungsbedarf der Heizzentrale im **Nieder- oder Mittelspannungsbereich**
 - Bei Mittelspannung: freie Kapazität am nächstgelegenen Netzverknüpfungspunkt prüfen
 - Bei Niederspannung: freie Kapazität im Ortsnetz prüfen

*sehr standortabhängig (weitere Schallquellen, freies Gelände etc.) und abhängig von der Größe der Wärmepumpe

Anforderungen an erneuerbare Wärmenetze bei der Planung neuer Gewerbegebiete

Anforderungen für die Realisierung eines Nahwärmenetz in einem Gewerbeprojekt (2 von 2)

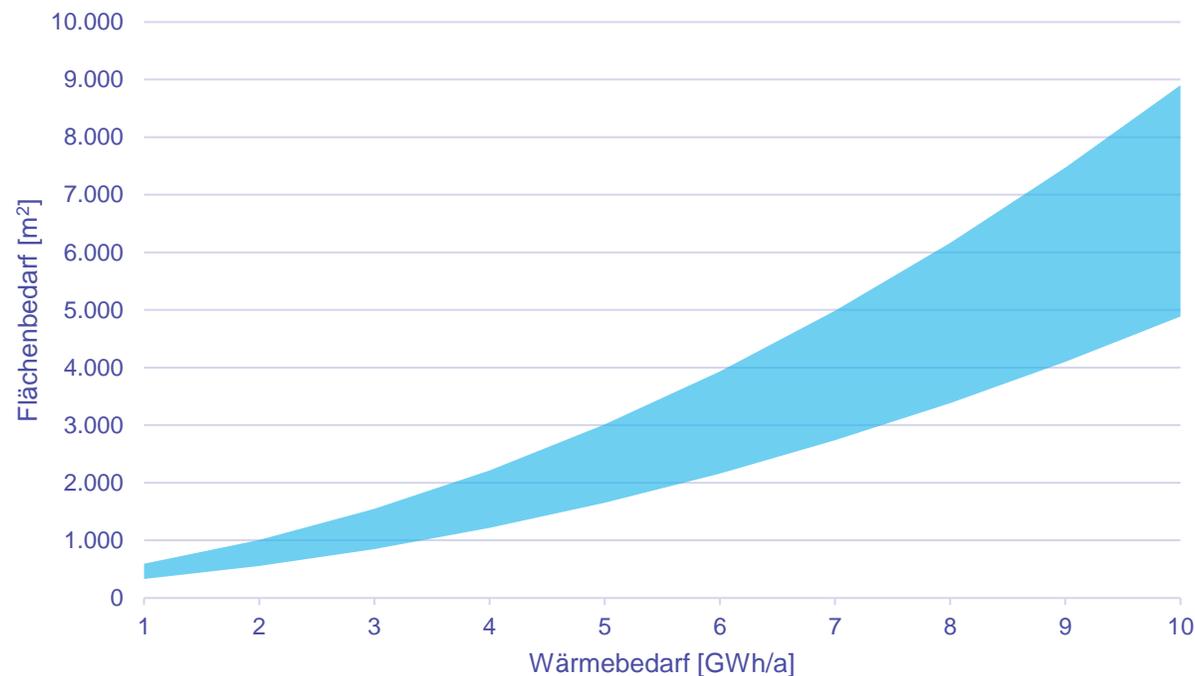
- Anschlussnehmergerechte **Vorlauftemperatur**
 - ▶ Bei Nutzung von Großwärmepumpen Vorlauftemperatur zwischen **75° und 80° C** realistisch
 - ▶ Vorlauftemperatur i.d.R. ausreichend zur Deckung von **Raum- und Warmwasserbedarf**
 - Insbesondere bei Gebäuden, die nach KfW-Effizienzstandard errichtet werden
 - ▶ Allerdings steigende Temperaturverluste mit steigender Netzlänge (durch Netzverluste)
 - Ø 1,3 °C Temperaturverlust je km Nahwärmenetz ab Heizzentrale*
 - ▶ Deckung der **Prozesswärmebedarf** i.d.R. durch separate, dezentrale Erzeugungsanlagen
- Berücksichtigung der weiteren **Spartenpläne**
 - ▶ Strom, Wasser (und Gas)
- **Geländeprofil** für betriebsgerechten Netzpumpenbetrieb (je nach Nenndruckauslegung des Speichers)
 - ▶ Höhendifferenz sollte zwischen Heizzentrale und dem höchsten Netzknoten bei einem Nenndruck von 3 bar 30 m nicht überschreiten

* Bei einer Vorlauftemperatur von 75°C und einer durchschnittlichen Fließgeschwindigkeit von 1,0 m/s

Kompaktbauweise einer Heizzentrale mit Wärmepumpe, Spitzenlastkessel und Pufferspeicher auf einem quadratischen Grundstück

Flächenbedarf der Heizzentrale in Abhängigkeit des jährlichen Wärmebedarfs

(Projektspezifische Abweichungen außerhalb des Korridors nicht ausgeschlossen)



Annahmen: 1.700 Vollaststunden; Auslegung von Wärmepumpe und Kessel auf Spitzenlast; Pufferspeicher ausgelegt auf 4 Stunden Spitzenlastdeckung, Komponenten der Heizzentrale können kompakt aneinander gebaut werden; bei größeren Nahwärmenetzen Einsatz mehrerer Wärmepumpen; proportionaler Anstieg des Flächenbedarfs von Wärmepumpe, Regelungstechnik und Spitzenlastkessel; Anstieg des Flächenbedarfs vom Pufferspeicher überproportional

Gelungene Integration einer Heizzentrale mit Nahwärmenetz, Wärmepumpe, Spitzenlastkessel und Speicher

Beispielprojekt Ørum, Dänemark

- Wärmepumpe mit 2,5 MW thermischer Leistung
- Erzeugung von ca. 10.000 MWh/a Wärme
- Kombination mit Pufferspeicher zur Flexibilisierung der Fahrweise

Heizzentrale mit
Wärmepumpe



Pufferspeicher

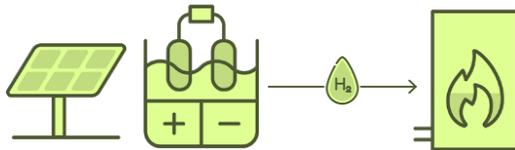
Kühler für Wärmepumpe

Aalborg CSP

Die Wärmepumpe als wirtschaftlichste regenerative Erzeugungstechnologie für neue Nahwärmenetze

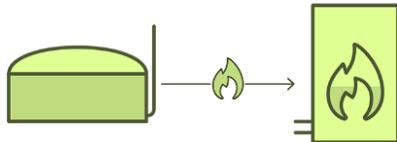
Vergleich von Erzeugungstechnologien*

Wasserstoff



- Erzeugung von Wasserstoff beispielsweise über PV-Strom
- Anschließende Wärmeerzeugung über Kessel
- Vergleichsweise teuer → ca. 5,5-6,5 €/kg → ca. 20 ct./kWh Wärme

Biomethan



- Biomethanbezug über Erdgasnetz
- Anschließende Wärmeerzeugung über Kessel/BHKW
- ca. 12 ct/kWh Brennstoffkosten, Biomethanverfügbarkeit momentan gering

Wärmepumpe

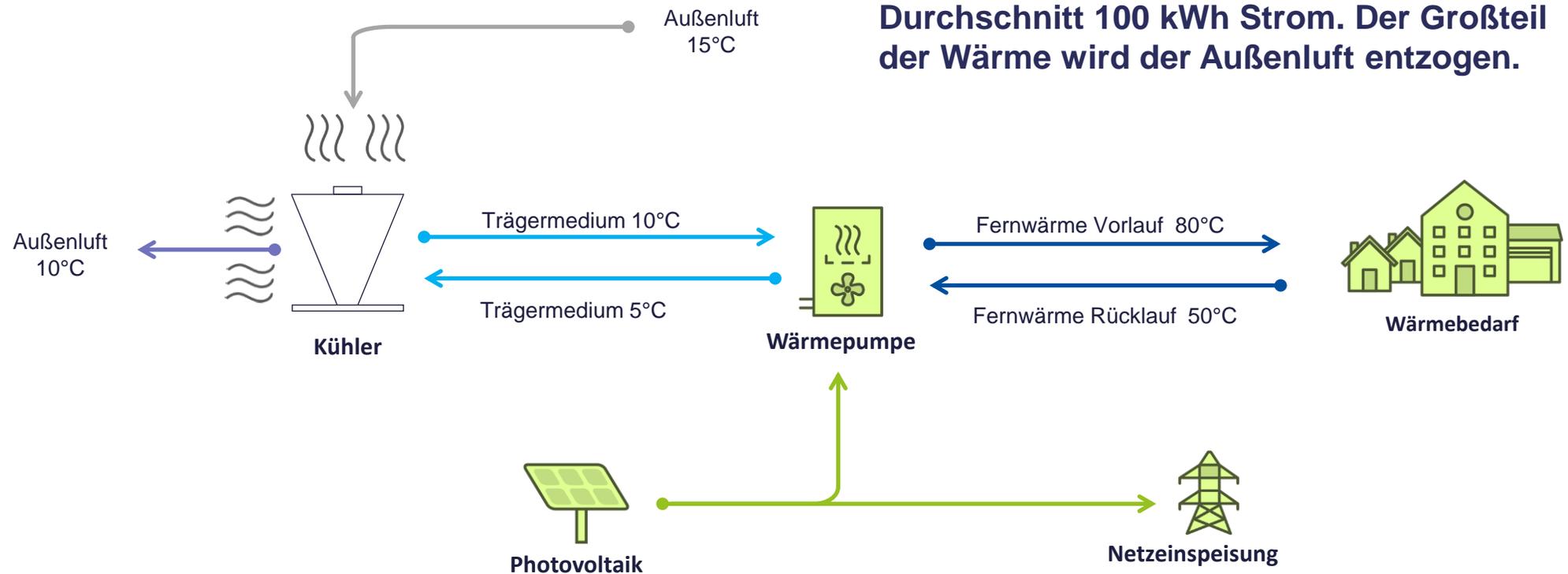


- Erzeugung von Wärme mit PV-Strom über Wärmepumpe → Nutzung von Umweltwärme bzw. weiterem Abwärmepotenzial im Gewerbegebiet
- Bei Eigenstromversorgung von 9 ct./kWh und Jahresarbeitszahl = 3 der Wärmepumpe: 3 ct./kWh Gestehungskosten*

*Gestehungskosten ohne Baukosten für das Wärmenetz // Investkosten- und/oder Betriebskostenförderungen wie die BEW oder die BEG können die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpentechnologie nochmal signifikant erhöhen

Woher stammt die in der Wärmepumpe erzeugte Wärme?

Funktionsweise der Luftwärmepumpe

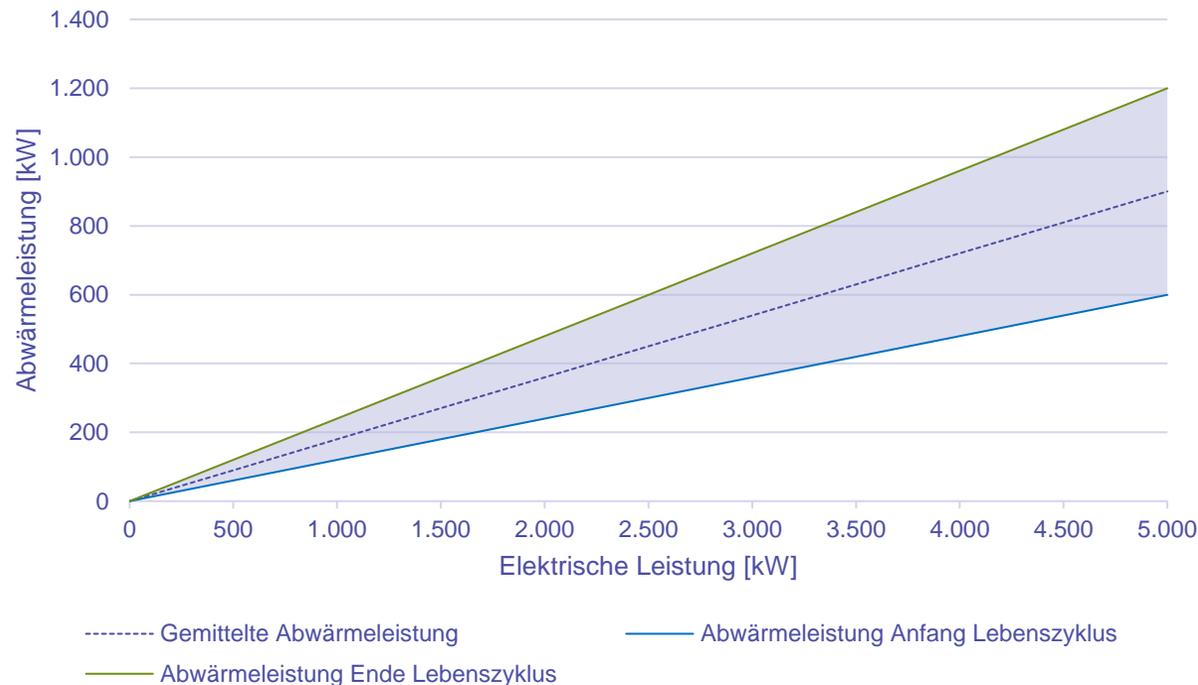


Für die Erzeugung von 300 kWh Wärme benötigt die Wärmepumpe im Durchschnitt 100 kWh Strom. Der Großteil der Wärme wird der Außenluft entzogen.

Steigende Abwärmeleistung des Elektrolyseurs im Laufe des Lebenszyklus

Abwärmeleistung des Elektrolyseurs in Abhängigkeit der elektrischen Leistung

(Projektspezifische Abweichungen außerhalb des Korridors nicht ausgeschlossen)

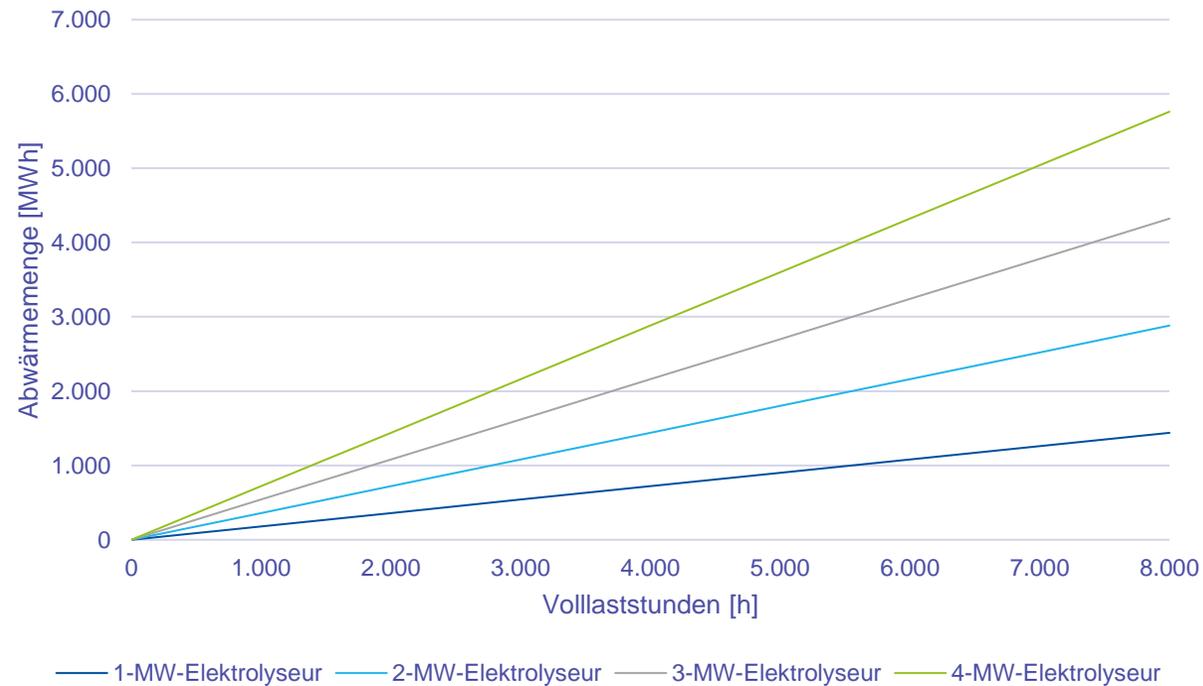


Die Abwärmeleistung des Elektrolyseurs steigt im Laufe des Lebenszyklus um ungefähr 100% an. Der gemittelte Abwärmewirkungsgrad während des Lebenszyklus beträgt zusätzlich zum Elektrolysewirkungsgrad ungefähr 18%.

Annahmen: Abwärmewirkungsgrad Beginn Lebenszyklus: 12% | Abwärmewirkungsgrad Ende Lebenszyklus: 24% | Gemittelter Abwärmewirkungsgrad 18%
Theoretisch maximale Abwärmeleistung zwischen 17% und 35% der elektrischen Leistung (H-TEC-Systems: 2023)

Die Abwärmemenge des Elektrolyseurs wird durch die Betriebsart und die jährlichen Volllaststunden beeinflusst

Abwärmemenge des Elektrolyseurs in Abhängigkeit der Volllaststunden



Ein 3-MW-Elektrolyseur erzeugt im Mittel des Lebenszyklus bei 4.000 Volllaststunden mehr als 2 GWh Abwärme pro Jahr.

Annahmen: Abwärmewirkungsgrad Beginn Lebenszyklus: 12% | Abwärmewirkungsgrad Ende Lebenszyklus: 24% | Gemittelte Abwärmewirkungsgrad 18%
Theoretisch maximale Abwärmeleistung zwischen 17% und 35% der elektrischen Leistung (H-TEC-Systems: 2023)

Vielen Dank!



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr



NOW - GMBH . DE



Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich



KielRegion



Dr. Hanno Butsch & Shaun Pick | Kiel | 27. Juni 2023

1. Workshop zum H2-Erzeugungskonzept

Agenda

➤ Ziel des Workshops	10 min	10:00 – 10:10 Uhr
➤ Vorstellungsrunde	30 min	10:10 – 10:40 Uhr
➤ Aktuelle reg. & wirt. Rahmenbedingungen	30 min	10:40 – 11:10 Uhr
➤ Aktuelle Puzzleteile und potenzielle Rollen der Akteure	30 min	11:10 – 11:40 Uhr
➤ Pause	30 min	11:40 – 12:10 Uhr
➤ Entwicklung einer Konzeptidee	140 min	12:10 – 14:30 Uhr
➤ Schlussfolgerungen	30 min	14:30 – 15:00 Uhr

Agenda

➤ Ziel des Workshops	10 min	10:00 – 10:10 Uhr
➤ Vorstellungsrunde	30 min	10:10 – 10:40 Uhr
➤ Aktuelle reg. & wirt. Rahmenbedingungen	30 min	10:40 – 11:10 Uhr
➤ Aktuelle Puzzleteile und potenzielle Rollen der Akteure	30 min	11:10 – 11:40 Uhr
➤ Pause	30 min	11:40 – 12:10 Uhr
➤ Entwicklung einer Konzeptidee	140 min	12:10 – 14:30 Uhr
➤ Schlussfolgerungen	30 min	14:30 – 15:00 Uhr

Agenda

> Ziel des Workshops	10 min	10:00 – 10:10 Uhr
> Vorstellungsrunde	30 min	10:10 – 10:40 Uhr
> Aktuelle reg. & wirt. Rahmenbedingungen	30 min	10:40 – 11:10 Uhr
> Aktuelle Puzzleteile und potenzielle Rollen der Akteure	30 min	11:10 – 11:40 Uhr
> Pause	30 min	11:40 – 12:10 Uhr
> Entwicklung einer Konzeptidee	140 min	12:10 – 14:30 Uhr
> Schlussfolgerungen	30 min	14:30 – 15:00 Uhr

In der KielRegion sollen die Puzzleteile für eine H2- Erzeugung zusammengesetzt werden.

Ausgangssituation

- ▶ In der Kiel Region gibt es aktuell:
 - zwei potenzielle H2-Abnehmer, für die ein Versorgungskonzept benötigt wird.
 - verschieden Akteure, die für ein H2-Versorgungskonzept wichtige Aufgaben übernehmen könnten.
 - Noch keine Vernetzung der relevanten Akteure für ein H2-Erzeugungskonzept.



Zielsetzung des Projekts

- ▶ Die relevanten Akteure für eine H2-Erzeugungskonzept sollen miteinander Vernetzt werden.
- ▶ Es soll eine gemeinsame Idee zur H2-Erzeugung in der KielRegion entwickelt werden.
- ▶ Weitere Schritte mit der Zielrichtung Realisierung sollen identifiziert werden.

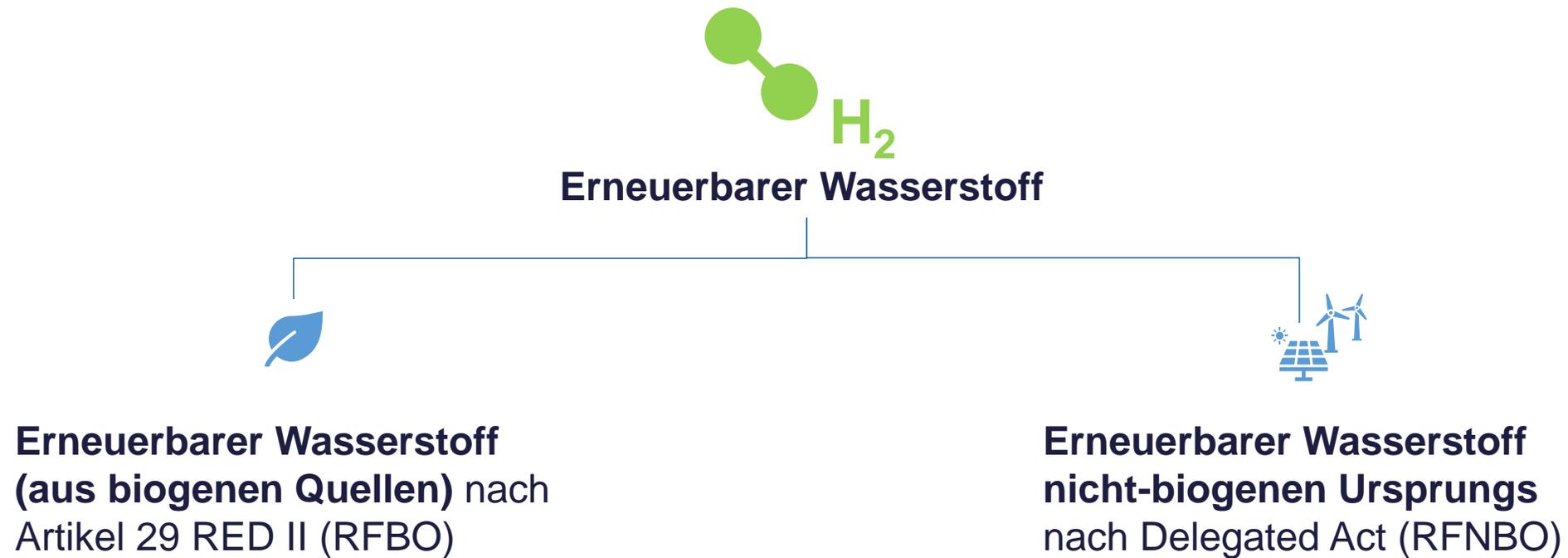
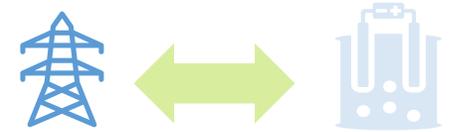
Agenda

> Ziel des Workshops	10 min	10:00 – 10:10 Uhr
> Vorstellungsrunde	30 min	10:10 – 10:40 Uhr
> Aktuelle reg. & wirt. Rahmenbedingungen	30 min	10:40 – 11:10 Uhr
> Aktuelle Puzzleteile und potenzielle Rollen der Akteure	30 min	11:10 – 11:40 Uhr
> Pause	30 min	11:40 – 12:10 Uhr
> Entwicklung einer Konzeptidee	140 min	12:10 – 14:30 Uhr
> Schlussfolgerungen	30 min	14:30 – 15:00 Uhr

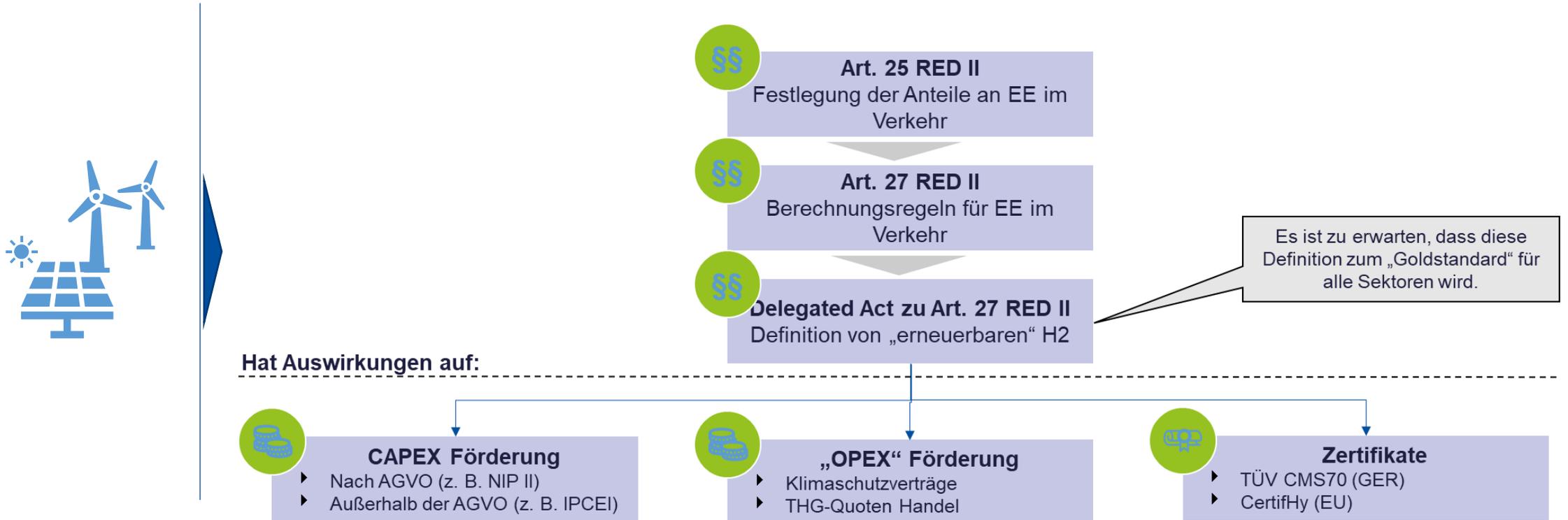
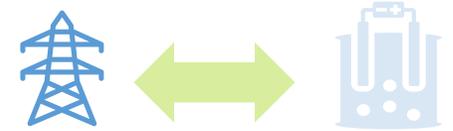
Agenda

> Ziel des Workshops	10 min	10:00 – 10:10 Uhr
> Vorstellungsrunde	30 min	10:10 – 10:40 Uhr
> Aktuelle reg. & wirt. Rahmenbedingungen	30 min	10:40 – 11:10 Uhr
> Aktuelle Puzzleteile und potenzielle Rollen der Akteure	30 min	11:10 – 11:40 Uhr
> Pause	30 min	11:40 – 12:10 Uhr
> Entwicklung einer Konzeptidee	140 min	12:10 – 14:30 Uhr
> Schlussfolgerungen	30 min	14:30 – 15:00 Uhr

Für die Erzeugung von erneuerbarem H₂ sind grundsätzlich zwei Pfade möglich.

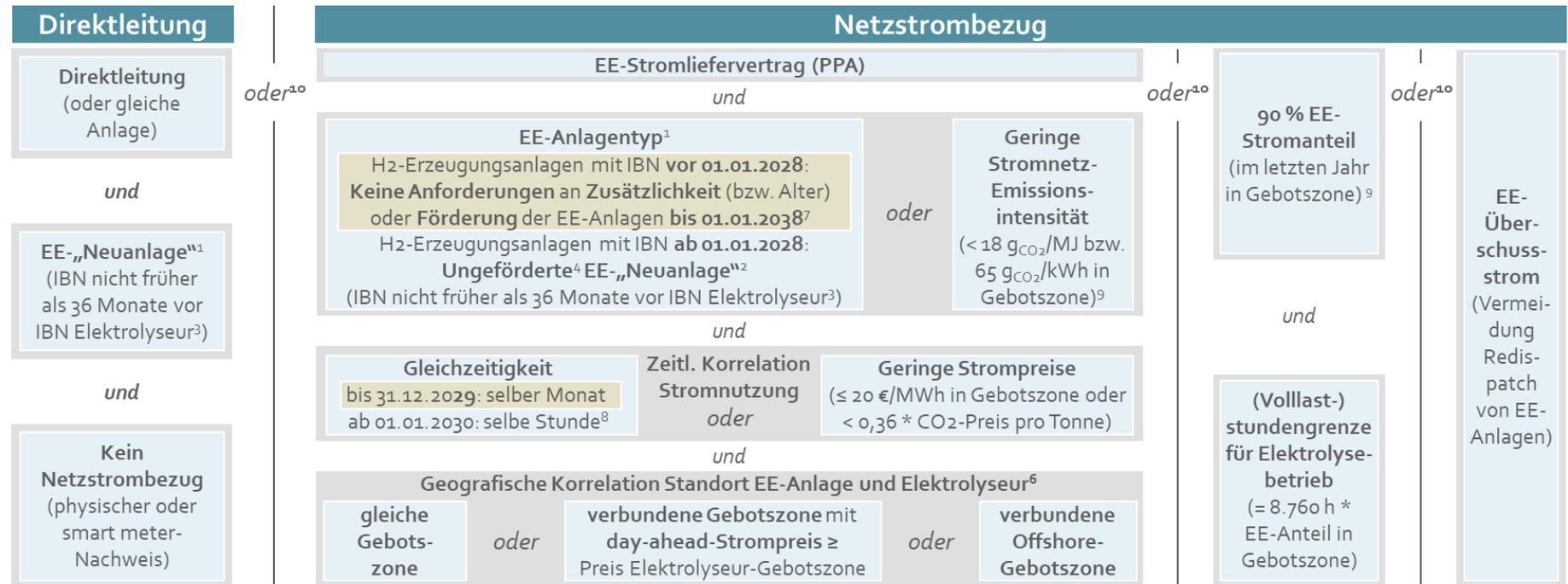
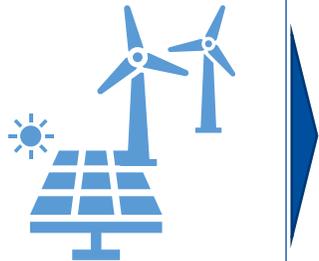


Für RFNBO's sind die Definitionen auf europäischer Ebene getroffen.



Quelle: Eigene Darstellung BBHC

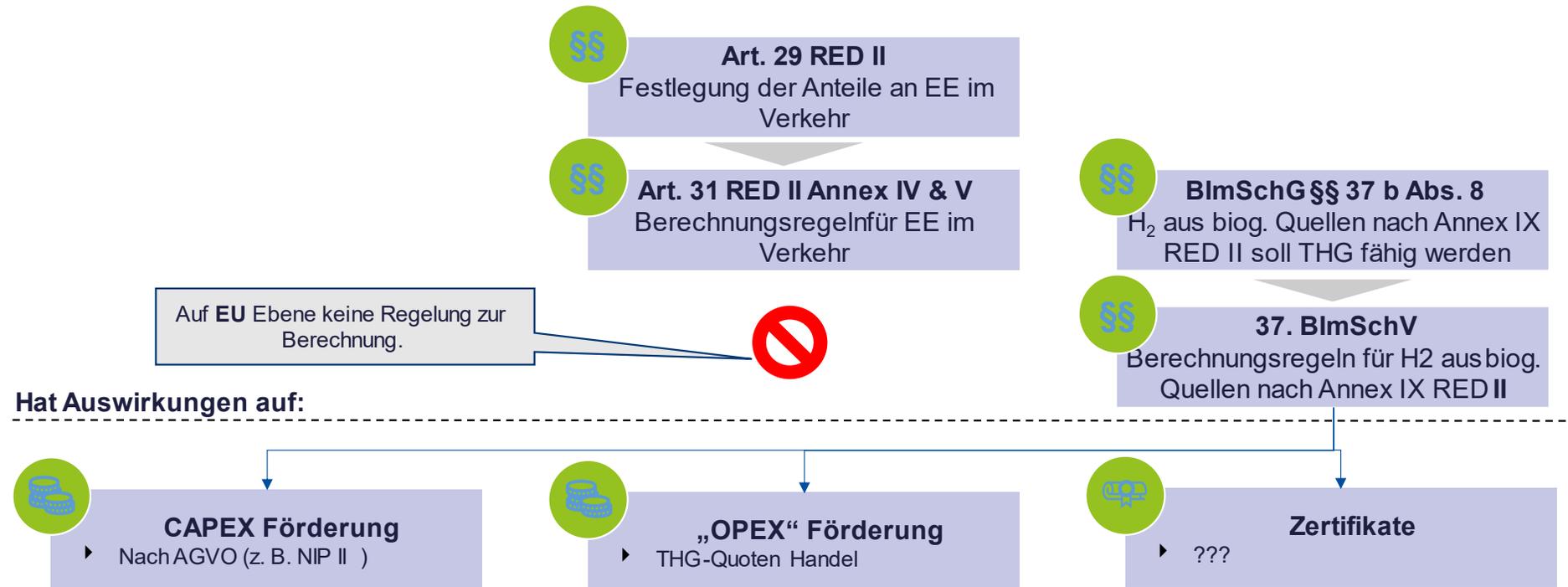
Je nach Verbindung zu EE-Anlage ergeben sich unterschiedliche Anforderungen.



IBN: Inbetriebnahme, ¹ Stromerzeugungsanlagen, die Biomasse nutzen sind ausgeschlossen, ² nach Ende eines PPA mit einer H2-Erzeugungsanlage erhalten Stromerzeugungsanlagen das IBN-Datum der H2-Erzeugungsanlage, mit der ein neuer PPA abgeschlossen wird, ³ Erweiterungen von H2-Erzeugungsanlagen innerhalb der ersten 36 Monate nach IBN erhalten das ursprüngliche IBN-Datum, ⁴ ausgenommen sind u. a. zurückgezahlte Förderungen und Förderungen vor einem Repowering, ⁵ EU-Mitgliedsstaaten können strengere Anforderungen erlassen, ⁷ gilt nicht für Kapazitäten, die ab dem 1.1.2028 hinzugebaut werden, ⁸ Zwischenspeicherung in neuer Anlage erlaubt; Mitgliedsstaaten können Anforderung der stündlichen Gleichzeitigkeit bereits ab 01.07.2027 festlegen, ⁹ Sofern Wert in einem Kalenderjahr erreicht wird, wird unterstellt, dass dies auch die folgenden 5 Kalenderjahre der Fall ist, ¹⁰ die vertikalen Pfade können beliebig miteinander kombiniert werden.

Quelle: Eigene Darstellung BBHC

Für RFBO's sollen die Definitionen zunächst nur auf Bundesebene getroffen werden.



Quelle: Eigene Darstellung BBHC

Aus den regulatorischen Vorgaben ergeben sich vier Parameter, die für die H₂-Produktion relevant sind.



Anschlusstyp



Direktleitung



Netzanschluss

Stromquelle



Volatile Stromerzeugung



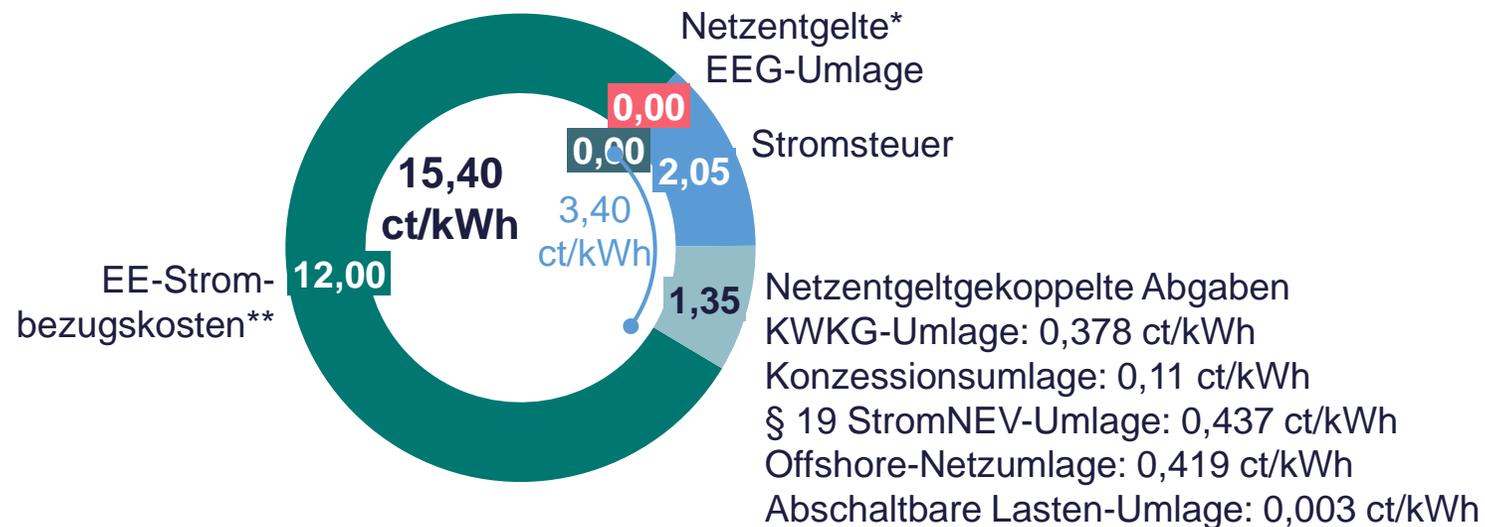
Konstante Stromerzeugung*

* Für eine konstante erneuerbare Stromerzeugung wird im Folgenden die Verstromung des biogenen Anteil durch eine Müllverbrennungsanlage / Wasserkraftwerk angenommen.

Stromnebenkosten sind nicht zu vernachlässigen.



Stromkosten = Strombezugskosten + Stromnebenkosten (= Abgaben & Umlagen)



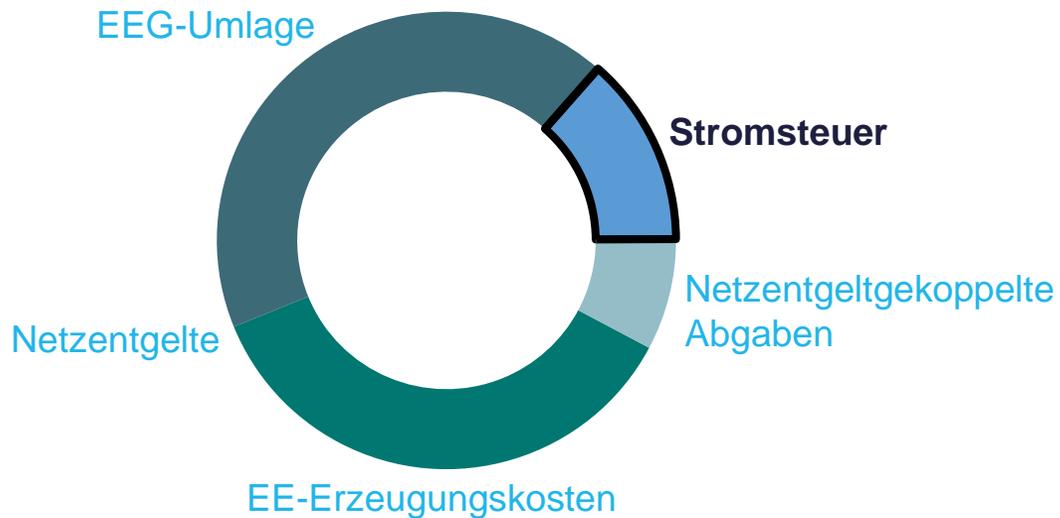
* Elektrolyseure sind nach § 118 Abs. 6 S. 1 und 7 EnWG für 20 Jahre von den Entgelten für die Nutzung des Stromnetzes befreit.

** Prognostizierte Ausschreibungsergebnisse für große PV-/Windenergieanlagen im Marktprämienmodell in der Direktvermarktung 2021

Unternehmen des produzierenden Gewerbes und Eigenversorgungen zahlen keine Stromsteuer.



Befreiung Stromsteuer



StromStG	
1	§ 9a Abs. 1 Nr. 1 StromStG ↓ auf 0 %
	▶ Unternehmen des produzierenden Gewerbes** (bestimmte Prozesse und Verfahren)
2	§ 9 Abs. 1 Nr. 1 und 3 StromStG ↓ auf 0 %
	▶ EE-Eigenversorgung am Ort der Stromerzeugung (> 2 MW) / Letztverbraucher im räumlichen Zusammenhang (≤ 2 MW) oder Inselnetz

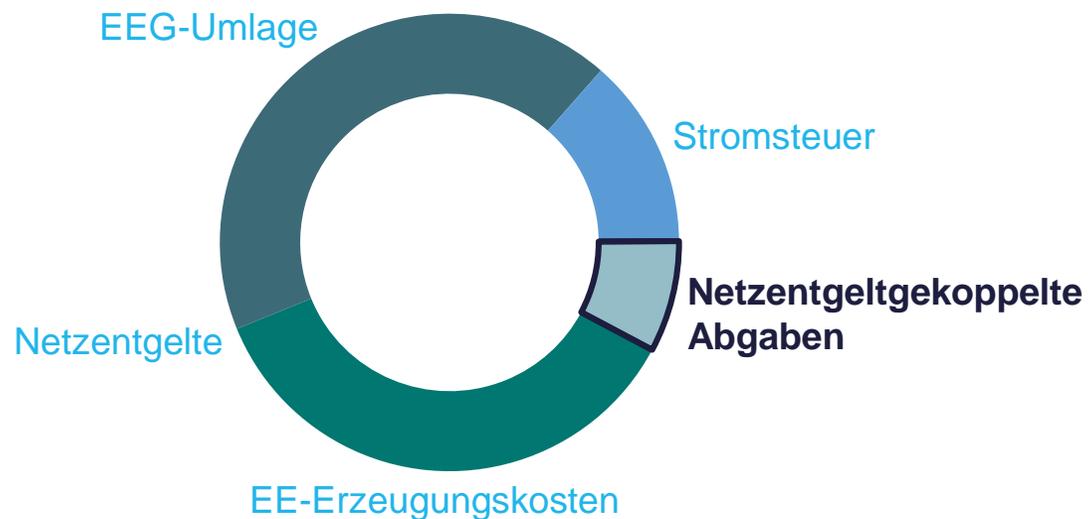
* Es sind nur die relevantesten „Hauptanforderungskriterien“ dargestellt. Im Normalfall ist die Erfüllung weiterer Kriterien nötig um von der Befreiung / Reduktion Gebrauch machen zu können.

** Unternehmen des Bergbaus, des verarbeitenden Gewerbes, des Baugewerbes und der Elektrizitäts-, Gas-, Fernwärme- oder Wasserversorgungswirtschaft

Für die Befreiung von netzentgeltgekoppelten Abgaben ist eine Direktleitung erforderlich.



Befreiung netzentgeltgekoppelte Abgaben



gesetzesunabhängig

Nicht-Netz-Nutzung

↓ auf 0 %

- ▶ Voraussetzung für eine Komplettbefreiung ist eine **Direktleitung** zwischen Stromerzeugungsanlage und Elektrolyseur
- ▶ Beim Strombezug seitens des Elektrolyseurs ab der Stromerzeugungsanlage per **Direktleitung** fallen keine netzentgeltgekoppelten Abgaben an.

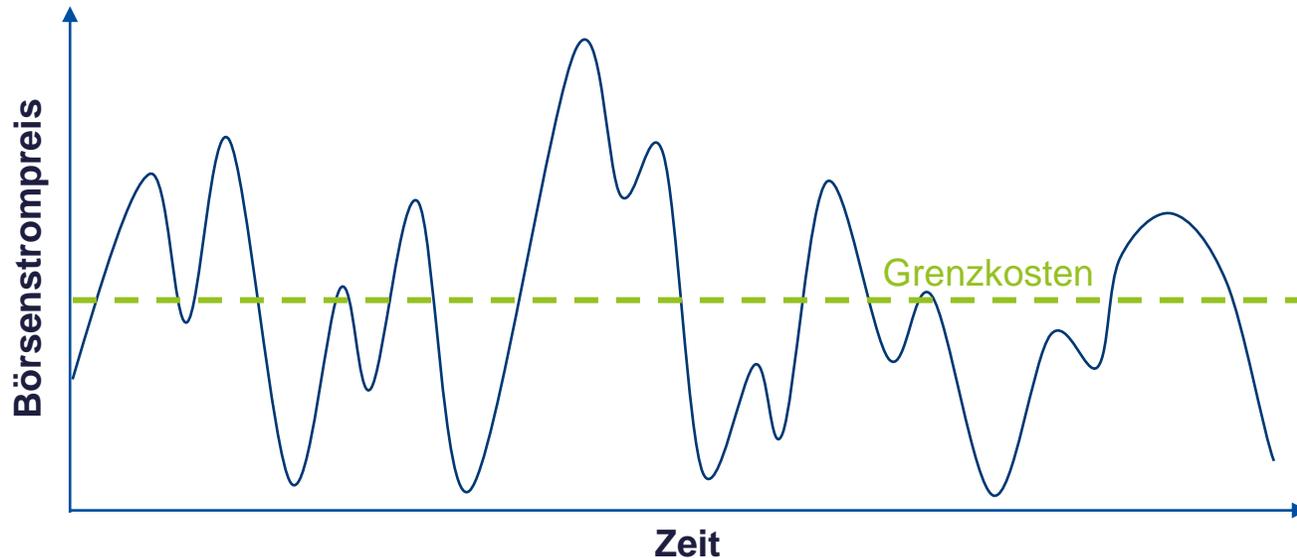
Aus den regulatorischen Vorgaben ergeben sich vier Parameter, die für die H₂-Produktion relevant sind.



Anschlusstyp	 Direktleitung	 Netzanschluss
Stromquelle	 Volatile Stromerzeugung	 Konstante Stromerzeugung*

* Für eine konstante erneuerbare Stromerzeugung wird im Folgenden die Verstromung des biogenen Anteil durch eine Müllverbrennungsanlage als auch durch Wasserkraftwerke angenommen.

Eine Grenzkostenoptimierung ist nur bei einer konstanten Stromerzeugungsquelle möglich.



Börsenstrompreis > Grenzkosten

Erlöse aus dem Stromverkauf sind höher als die möglichen Erlöse aus der H₂-Produktion.

→ Die Elektrolyse wird nicht betrieben.

Börsenstrompreis < Grenzkosten

Erlöse aus dem Stromverkauf sind geringer als die möglichen Erlöse aus der H₂-Produktion.

→ Die Elektrolyse wird betrieben.



Voraussetzung für eine Grenzkostenoptimierung ist eine konstante Stromerzeugung, da ansonsten keine ausreichenden Volllaststunden des Elektrolyseurs möglich sind. Mit PV und Wind ist dies nur sehr schwer möglich.

Eine Direktleitung mit konstanter EE-Stromquelle ist die optimale Lösung.



Direktleitung

Netzanschluss



Volatile Stromerzeugung



Konstante Stromerzeugung

Die Elektrolyse ist direkt mit PV und/oder Wind verbunden.

- Stromsteuer: Fallbetrachtung
- Netzentgeltgekoppelte Abgaben: Nein
- Grenzkostenoptimierung: Nein

→ Grundsätzlich positiv, Gegebenheiten nicht immer vorhanden

Die Elektrolyse ist direkt mit einer Müllverbrennungsanlage / Wasserkraftwerk verbunden.

- Stromsteuer: Fallbetrachtung
- Netzentgeltgekoppelte Abgaben: Nein
- Grenzkostenoptimierung: Ja

→ Optimaler Fall, Gegebenheiten selten vorhanden.

Der Strom wird über das öffentliche Netz bezogen und es besteht ein PPA mit PV oder Wind.

- Stromsteuer: Fallbetrachtung
- Netzentgeltgekoppelte Abgaben: Ja
- Grenzkostenoptimierung: Nein

→ Teuerste Variante, aber vermutlich die gängigste, da überall umsetzbar.

Der Strom wird über das öffentliche Netz bezogen und es besteht ein PPA mit einer Müllverbrennungsanlage / Wasserkraftwerk.

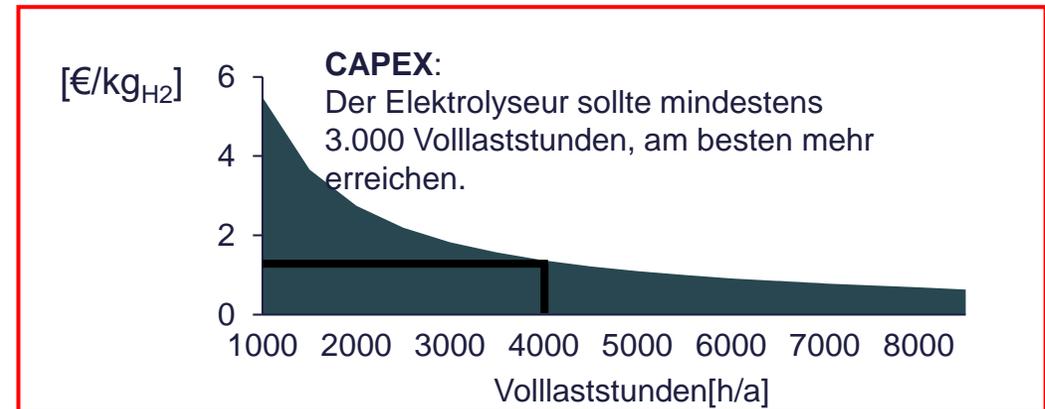
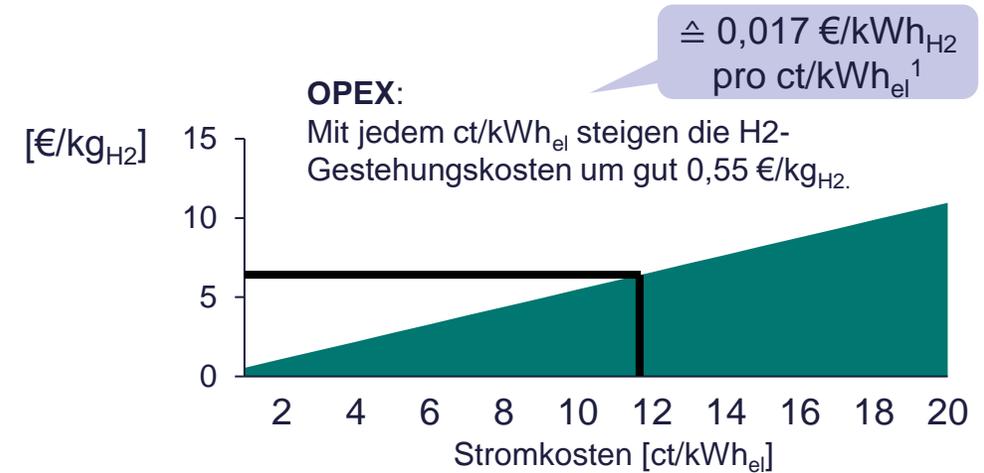
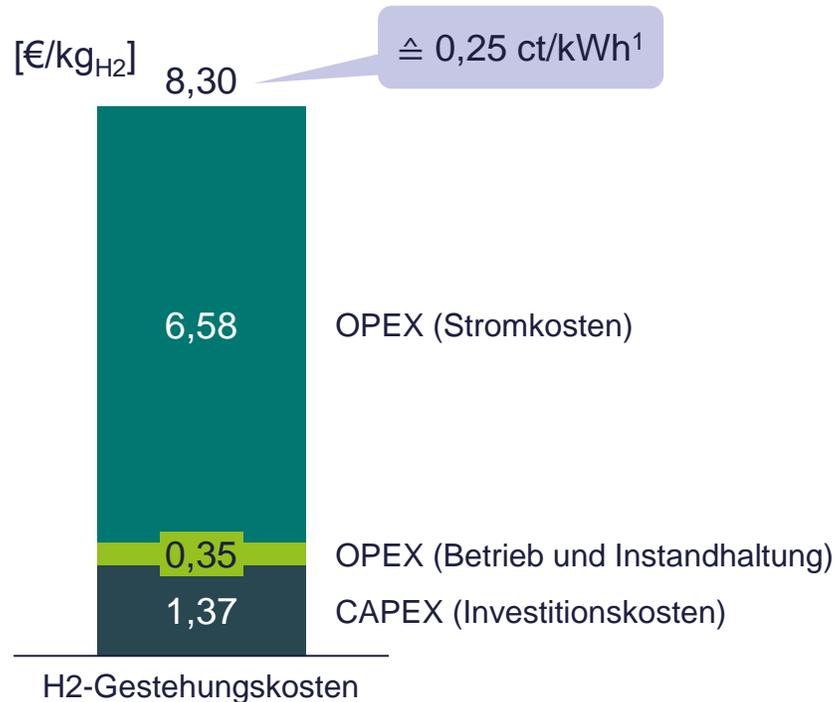
- Stromsteuer: Fallbetrachtung
- Netzentgeltgekoppelte Abgaben: Ja
- Grenzkostenoptimierung: Ja

→ Grundsätzlich positiv, Vertragspartner begrenzt.

Investitions- sowie Stromkosten sind die größten Kostentreiber.



Beispielhafte H2-Gestehungskosten

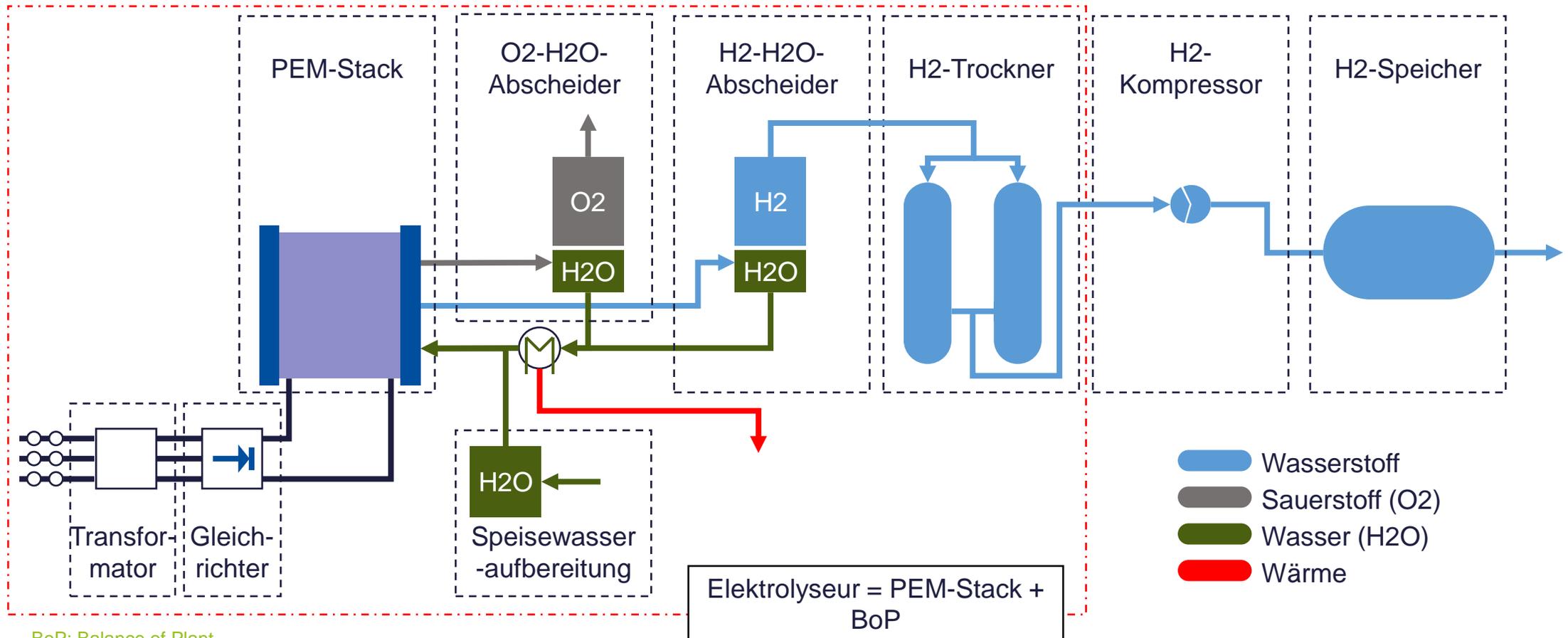


¹Annahmen zu H2-Gestehungskosten: 5-MW-Elektrolyseur (Auslastung: 4.000 Volllaststunden, Strombezugskosten: 12 ct/kWh, keine Entrichtung von Abgaben + Umlagen, Systemwirkungsgrad: 61 % (\cong 55 kWh_{el}/kg_{H2}), Systemkosten Elektrolyse (inkl. Ingenieursdienstleistungen und Genehmigungskosten): 5 Mio. €), ¹ LHV (unterer Heizwert) von Wasserstoff

Neben dem Stack besteht ein Elektrolyseur aus weiteren Komponenten, den sogenannten BoP.



Komponenten eines PEM-Elektrolyseurs

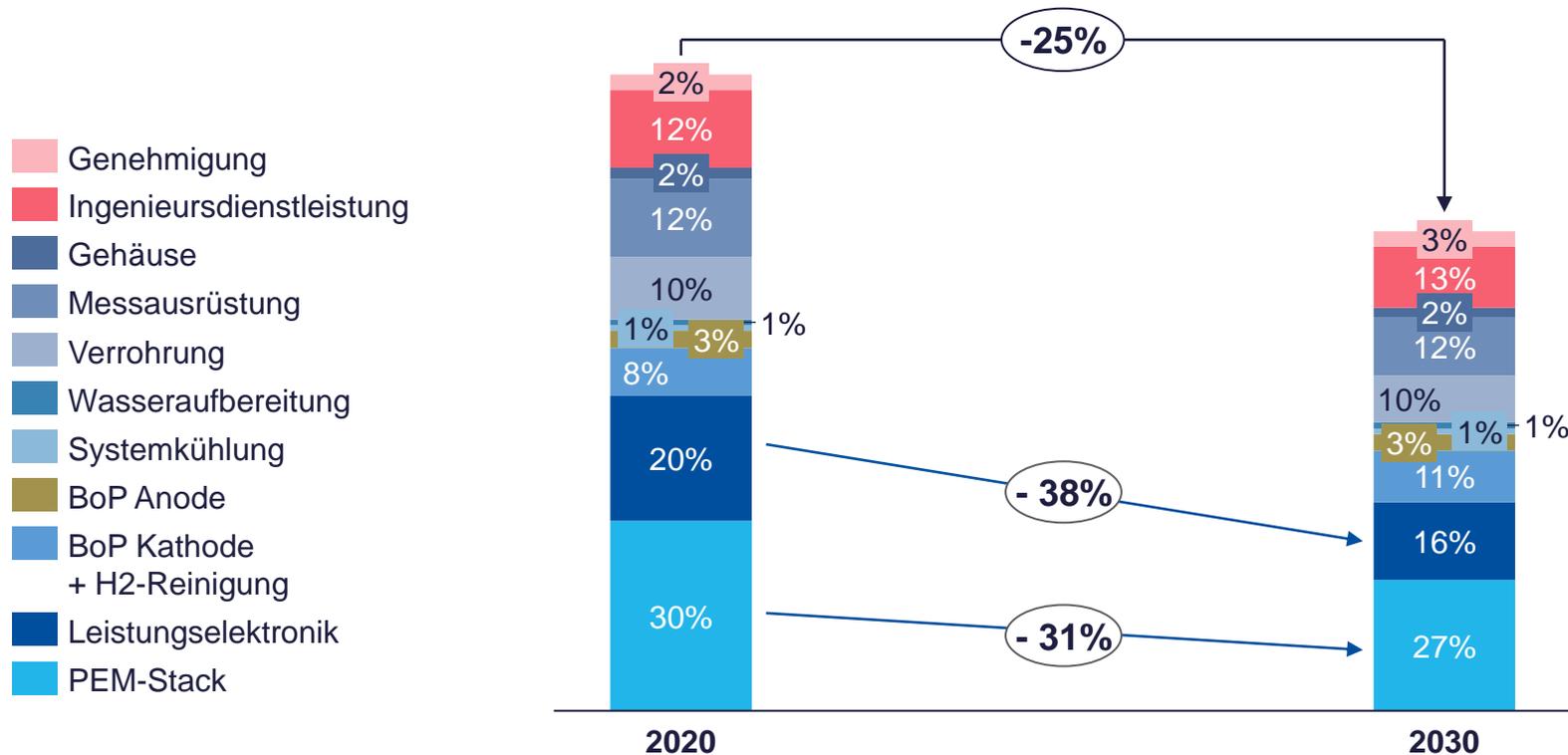


BoP: Balance of Plant

Es werden Kostenreduktionen von 25% in 10 Jahren erwartet.



(System-)Investitionskosten eines 5 MW_{el}-PEM-Elektrolyseurs über die Zeit

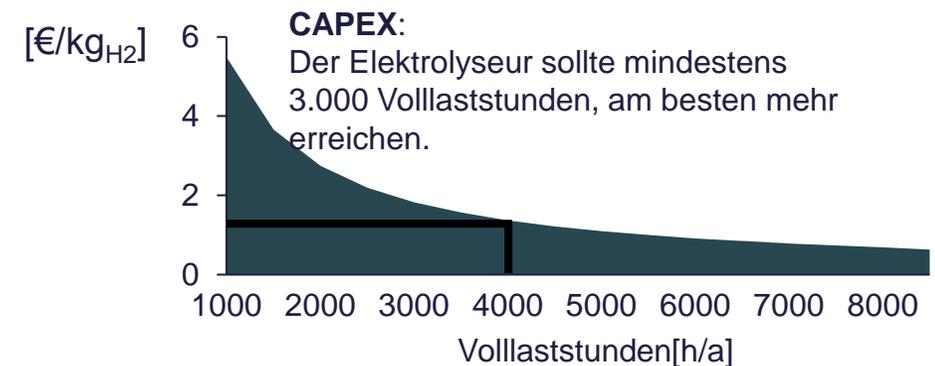
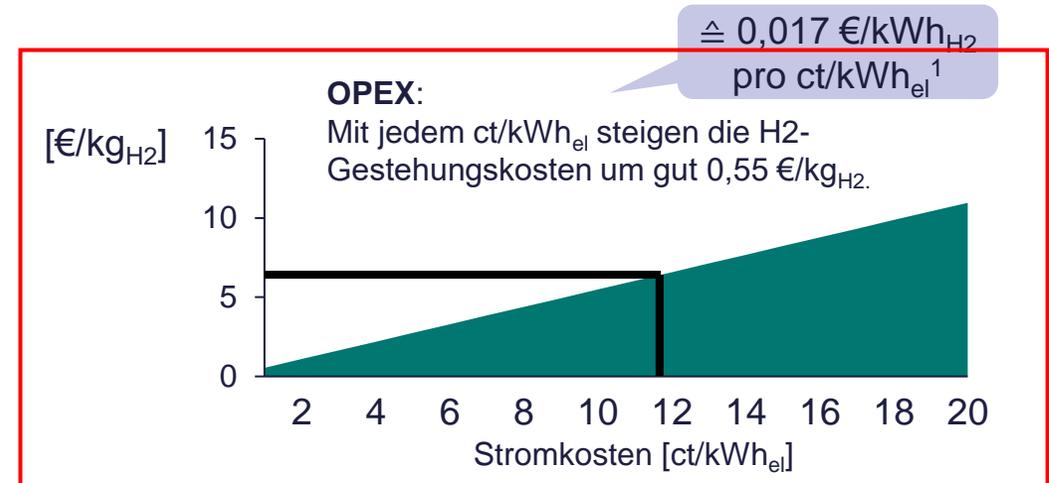
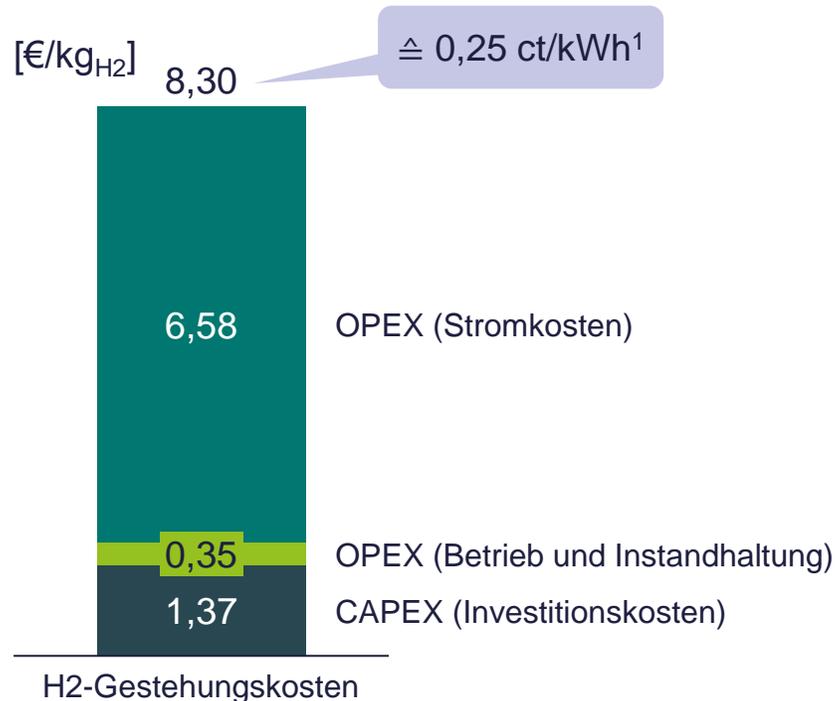


Quelle: Unterschiedliche Quellen, u. a. Cost-Forecast-Kostenprognose-PEM-Alkaline-Electrolysis-Elektrolyse, ISE-CATF, 2021 (Stack + BoP inkl. Ingenieursdienstleistungen und Genehmigungskosten)

Investitions- sowie Stromkosten sind die größten Kostentreiber.



Beispielhafte H2-Gestehungskosten

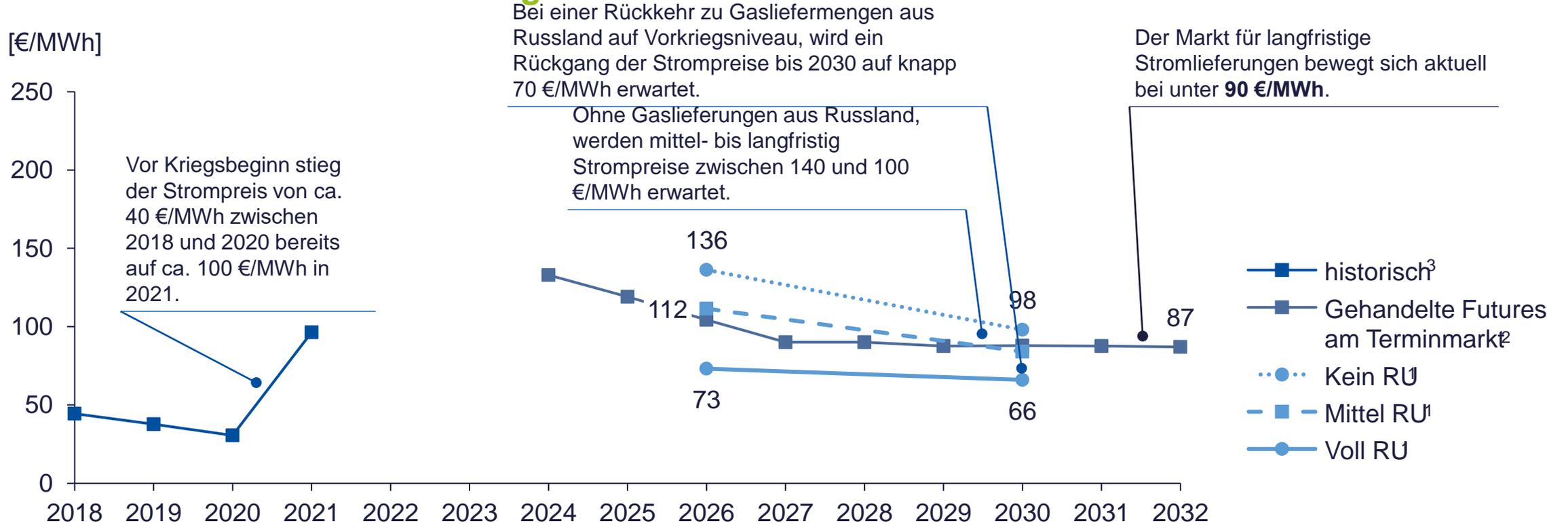


¹Annahmen zu H₂-Gestehungskosten: 5-MW-Elektrolyseur (Auslastung: 4.000 Volllaststunden, Strombezugskosten: 12 ct/kWh, keine Entrichtung von Abgaben + Umlagen, Systemwirkungsgrad: 61 % ($\cong 55 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{kg}_{\text{H2}}$), Systemkosten Elektrolyse (inkl. Ingenieursdienstleistungen und Genehmigungskosten): 5 Mio. €), ¹ LHV (unterer Heizwert) von Wasserstoff

Preise der Strom-Langfristbeschaffung liegen unter 90 €/MWh für ein BASE-Produkt.



Stromkosten: Preisentwicklungen



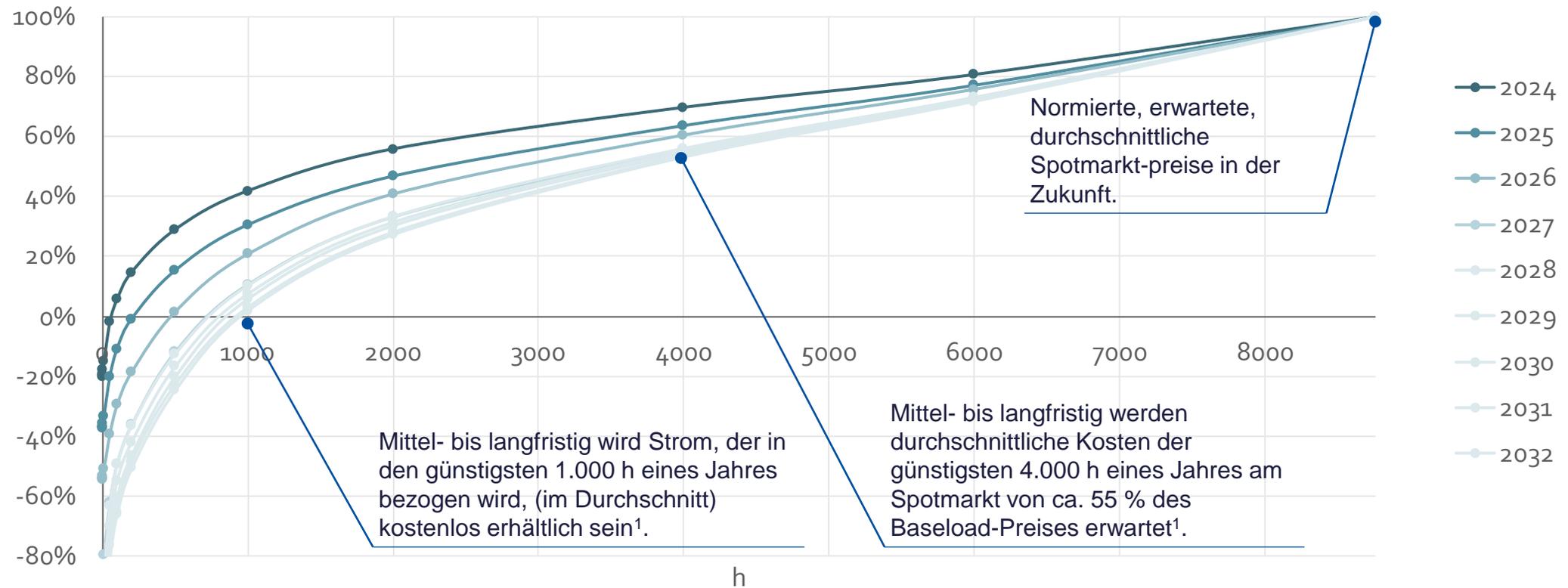
Quelle: ¹ Strompreisprognose, Prognos, 2022. Unsicherheit auf Angebotsseite: Voll RU: vollständige Verfügbarkeit russischen Gases (keine Importbeschränkungen, vollständige Nutzung der vorhandenen Infrastruktur (Pipeline + LNG)), Mittel RU: Sukzessive Reduktion der RU-Mengen, Erreichen der Unabhängigkeit von RU-Mengen im Sommer 2024, Kein RU: vollständiger Handelsstopp des Erdgashandels mit Russland

² EEX Phelix DE Futures (gehandelte Futures am Terminmarkt (Abrufdatum: 25.04.2023)), ³ EPEX DBDA

Durch marktpreisgetriebene Fahrweise können günstigere Strompreise erreicht werden.



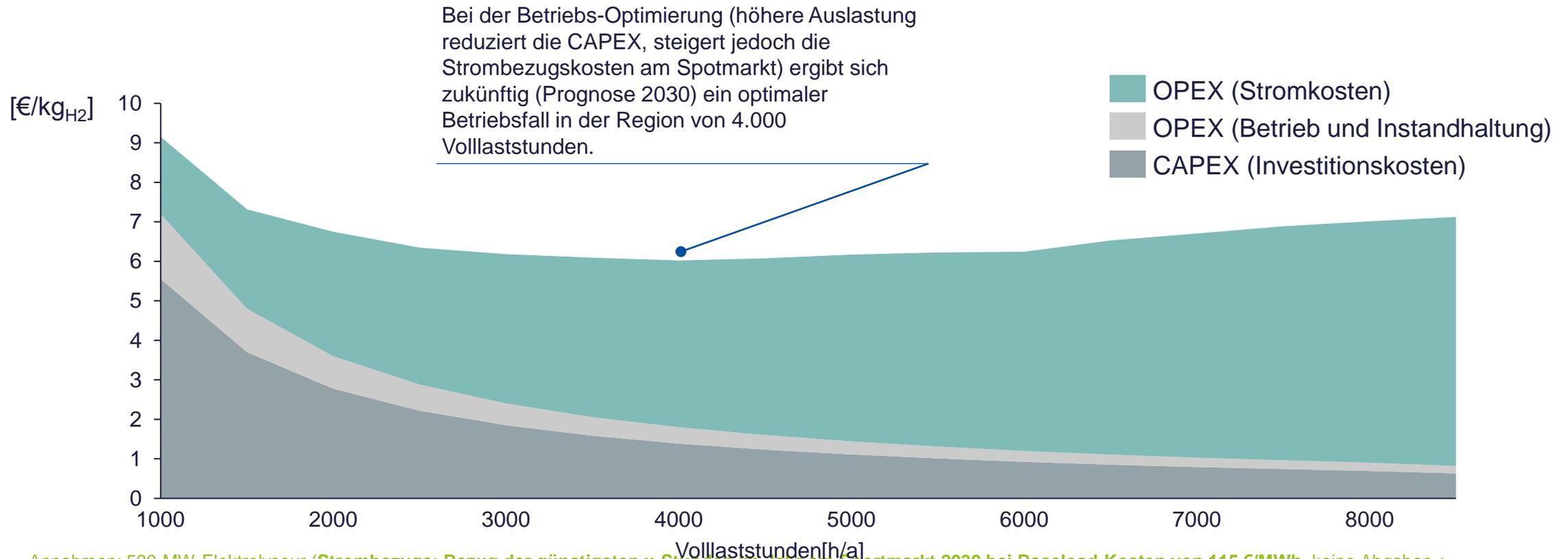
Relative Jahresdauerlinie der günstigsten Spotmarktpreise



¹ Durchschnittliche Stromkosten unter Berücksichtigung negativer Strompreise

CAPEX- (hohe Auslastung) und OPEX-Optimierung (günstige Stunden) sind ein Kompromiss.

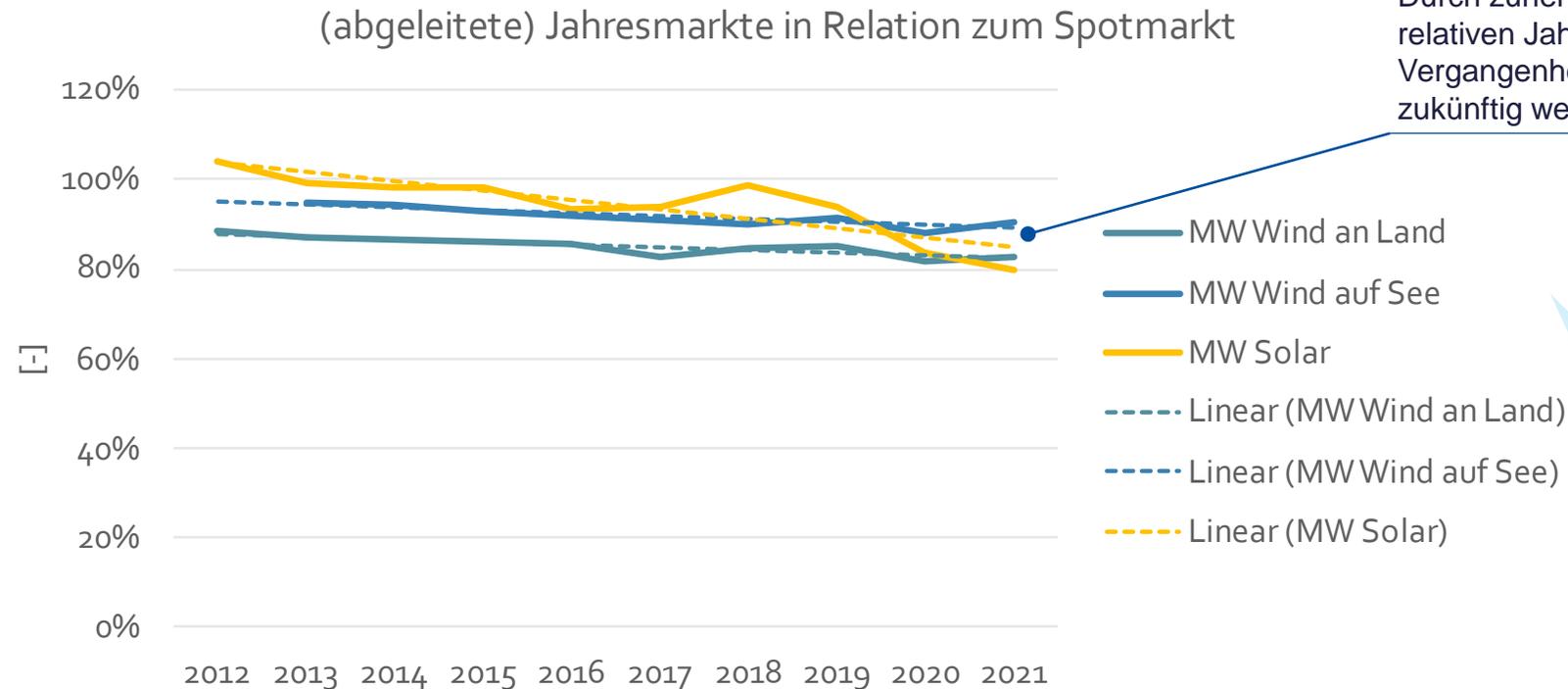
H2-Gestehungskosten



Annahmen: 500-MW-Elektrolyseur (Strombezugs: Bezug der günstigsten x-Stunden im Jahr am Spotmarkt 2030 bei Baseload-Kosten von 115 €/MWh, keine Abgaben + Umlagen, Systemwirkungsgrad: 61 % ($\cong 55 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$), Systemkosten Elektrolyse (inkl. Balance of Plant): 500 Mio. €, Betrieb & Instandhaltung: 3 %CAPEX), ¹ LHV (unterer Heizwert) von Wasserstoff

PV-/Wind-Anlagen weisen aktuell einen relativen Marktwert von ca. 80 % auf.

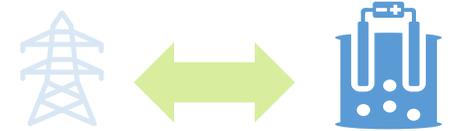
Relativer Jahresmarktwert



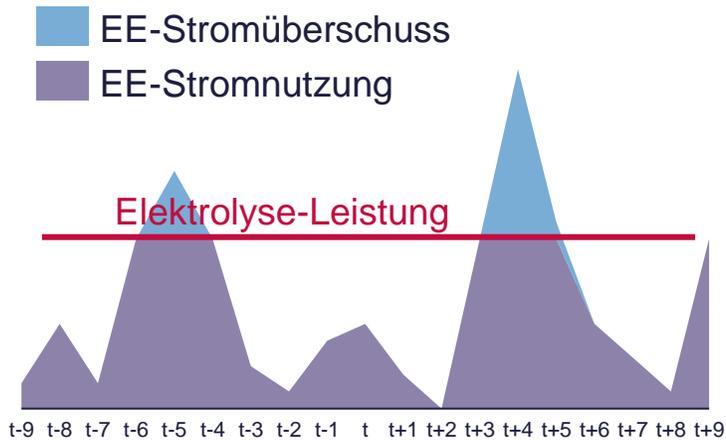
Der relative Jahresmarktwert von PV-/Wind-Anlagen („as-produced“) lag 2021 bei ca. 80 % des durchschnittlichen Spotmarktpreises (Baseload).
Durch zunehmenden EE-Anteil fielen die relativen Jahresmarktwerte in der Vergangenheit und werden vmtl. auch zukünftig weiter fallen.

Die Wertigkeit eines PV-/Wind-Stromprofils liegt bei 80 % relativem Technologiemarktwert für einen 110 €/MWh-Baseloadpreis bei ca. 88 €/MWh.
→ $80\% \times 110 \text{ €/MWh} = 88 \text{ €/MWh}$
→ \triangleq H₂-OPEX-Reduktion von ca. 1,2 €/kg_{H₂}

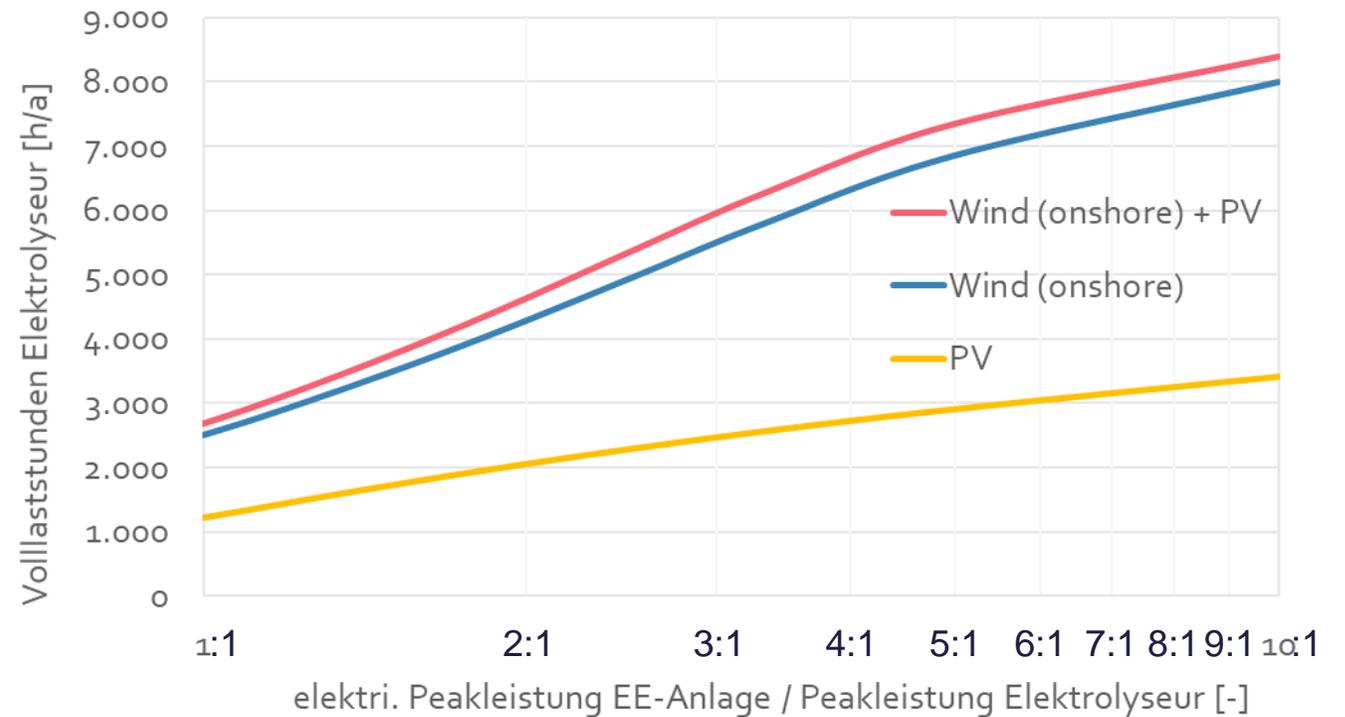
Durch eine Überdimensionierung der EE-Anlage können die VLS des Elektrolyseurs erhöht werden.



Volllaststunden des Elektrolyseurs bei unterschiedlichen EE-Anlagengrößen

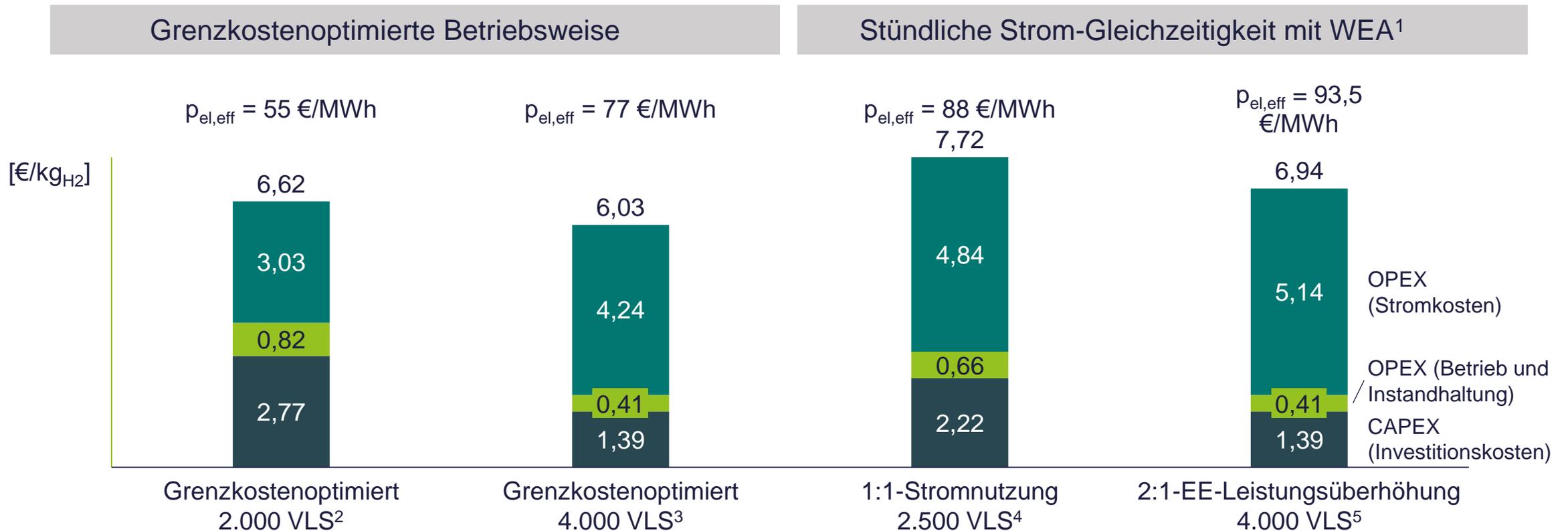


- ▶ Auslastung EE-Anlage: 30 % (\cong 2.600 h/a)
- ▶ Auslastung Elektrolyseur: 50 % (\cong 4.300 h/a)



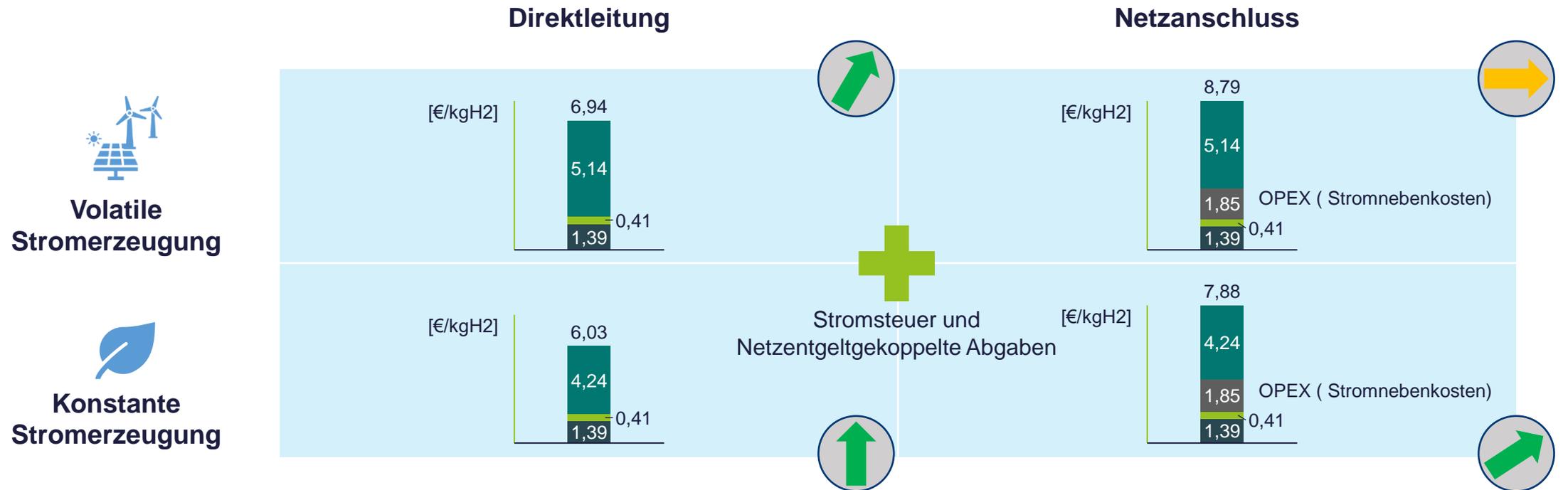
Die spotmarktpreis-optimierte Betriebsweise kann die H2-Gestehungskosten leicht reduzieren.

Elektrolyse-Betriebskonzepte



¹ WEA: Windenergieanlage, ^{2,3} Nutzung der günstigsten 2.000 (²) bzw. 4.000 (³) Stunden des Jahres am Strom-Spotmarkt, ^{4,5} Stromnutzung in stündlicher Gleichzeitigkeit aus Windenergieanlage mit gleicher Leistung wie Elektrolyseur (⁴), mit doppelter Leistung wie Elektrolyseur und Überschussstromvermarktung am Spotmarkt (⁵)

H2 kann zwischen 6,03 €/kg und 8,79 €/kg selbst erzeugt werden.



Sofern die Voraussetzungen der RED II bzw. der 37. BImSchV erfüllt sind können weitere Erlöse durch die Veräußerung von THG-Quoten erzielt werden.

Die THG-Quote adressiert die THG-Minderung im Verkehrssektor.

Hintergrund der THG-Minderungsquote

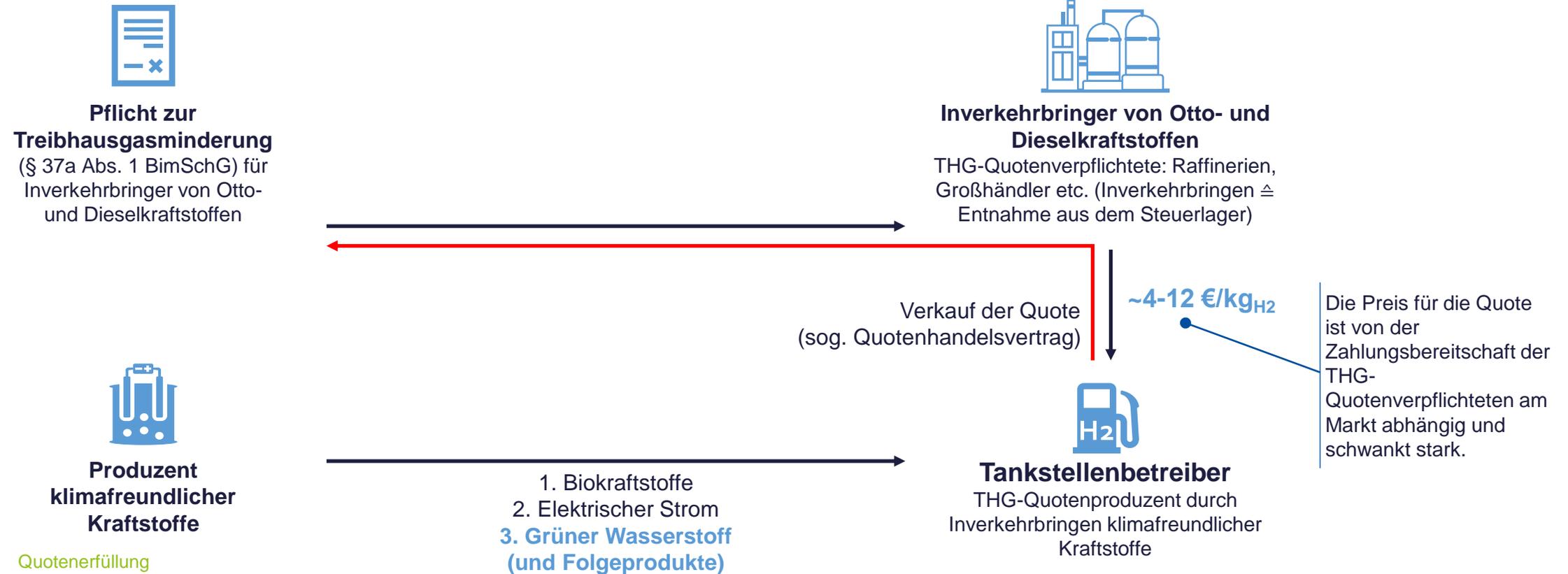
- Für die Erfüllung hat der Bundestag am 20. Mai 2021 das *Gesetz zur Weiterentwicklung der THG-Minderungsquote* verabschiedet (ehemals Biokraftstoffquote). Statt auf einen EE-Anteil wie in der RED II stellt der deutsche Gesetzgeber auf eine THG-Minderungsquote ab.
- Die Umsetzung dieses Gesetzes erfolgt im § 37a des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) sowie der 37. BImSchV.
- Quotenverpflichtete nach dem Energiesteuergesetz: Inverkehrbringer von Diesel- und Ottokraftstoffen

Was ist die THG-Minderungsquote?

- ▶ Die Quotenverpflichteten müssen ihre THG-Emissionen senken bzw. kompensieren, um die für sie geltende THG-Minderungsquote zu erfüllen.
- ▶ Die Senkung kann
 - a) durch Inverkehrbringung von **emissionsarmen/-freien Kraftstoffen** oder
 - b) durch Ankauf von THG-Quoten von anderen Inverkehrbringern von **emissionsarmen/-freien Kraftstoffen** erfolgen.

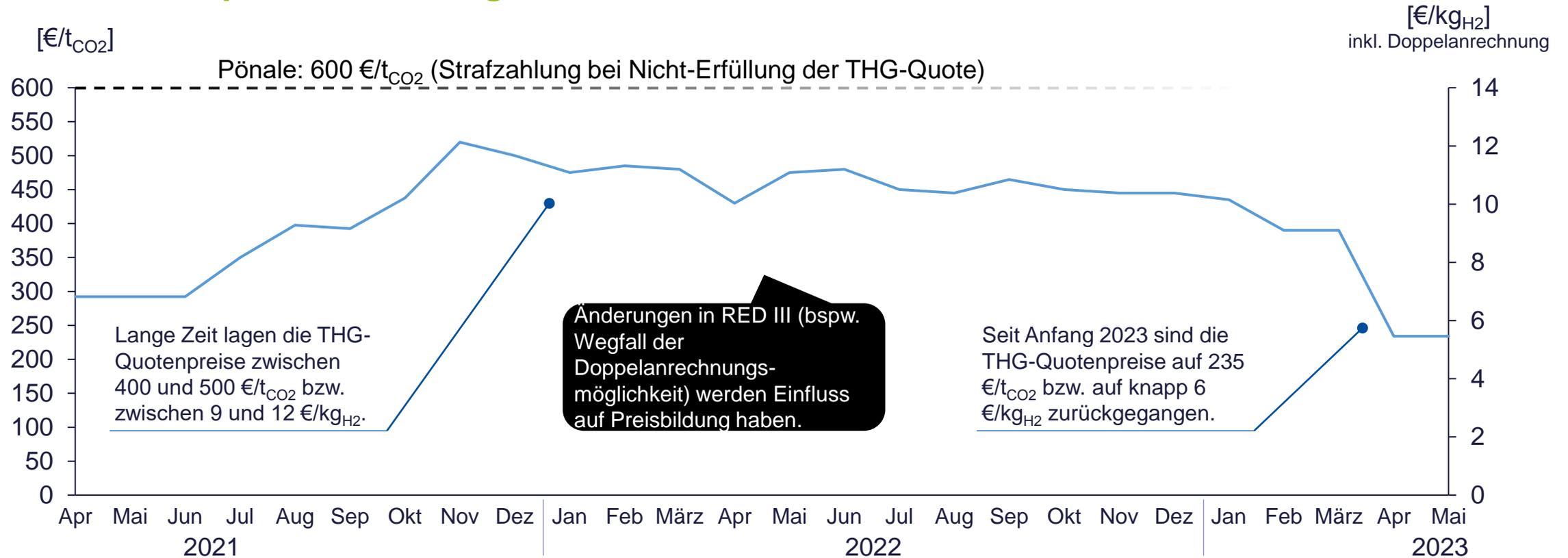
Für Nicht-Quotenverpflichtete bringt der THG-Quotenhandel Erlöschancen in H2-Vermarktung.

Quotenhandel mit Wasserstoff



2022 waren Zusatzerlöse von bis zu 12 €/kg_{H2} möglich, mittlerweile haben sich die Preise halbiert.

THG-Quotenpreisentwicklungen



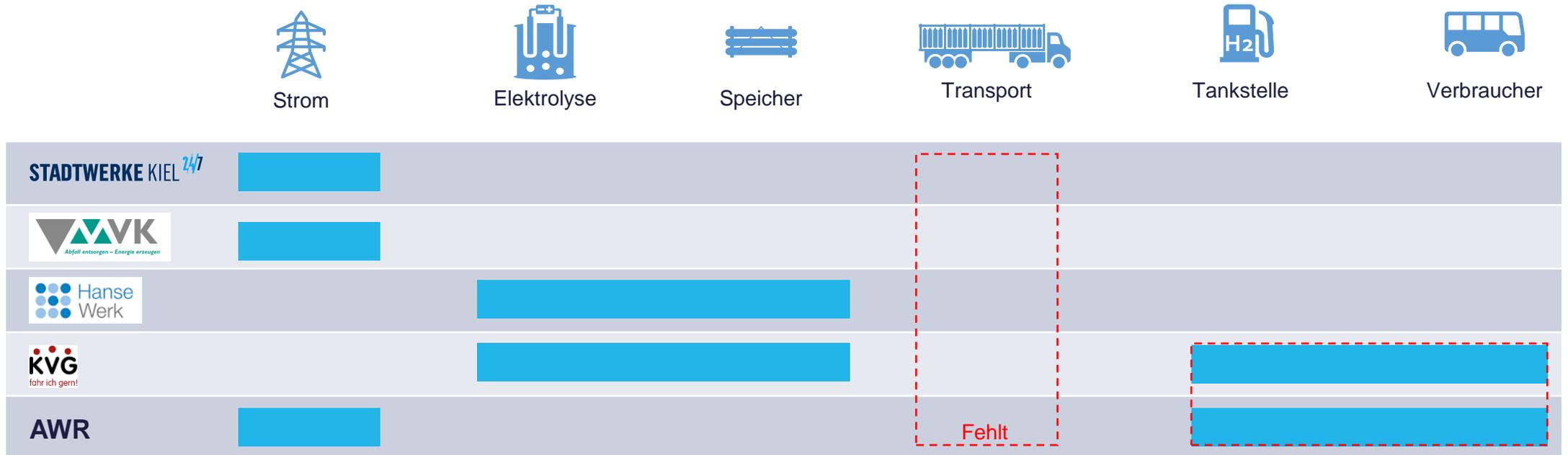
Quelle: q-bility (Asset Klasse: No Cap)

Agenda

➤ Ziel des Workshops	10 min	10:00 – 10:10 Uhr
➤ Vorstellungsrunde	30 min	10:10 – 10:40 Uhr
➤ Aktuelle reg. & wirt. Rahmenbedingungen	30 min	10:40 – 11:10 Uhr
➤ Aktuelle Puzzleteile und potenzielle Rollen der Akteure	30 min	11:10 – 11:40 Uhr
➤ Pause	30 min	11:40 – 12:10 Uhr
➤ Entwicklung einer Konzeptidee	140 min	12:10 – 14:30 Uhr
➤ Schlussfolgerungen	30 min	14:30 – 15:00 Uhr

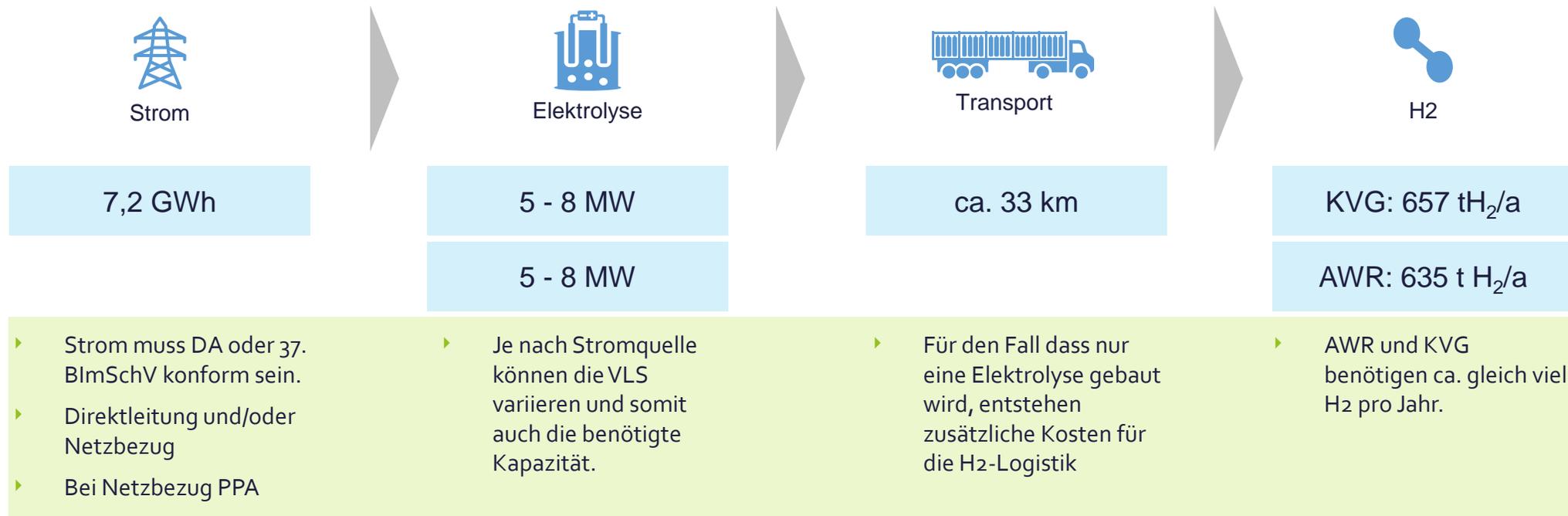
Bis auf den Transport, decken die Akteure alle relevanten Bereiche ab.

Rollenverteilung der Akteure



Für die Versorgung der AWR und KVG wird 10 – 16 MW Elektrolysekapazität benötigt.

Key Facts



Es gibt im Wesentlichen zwei Optionen für die Versorgung der ermittelten Projekte.

Fragestellung

- Welche der möglichen Varianten ist wirtschaftlich und praktisch am sinnvollsten?

Option 1: Zentral

Es wird eine Elektrolyse entweder bei der AWR oder bei der KVG errichtet. Die Versorgung des jeweils anderen erfolgt per Trailer.

Option 2: Einzel

Es wird jeweils eine Elektrolyse bei der AWR und der KVG errichtet. H₂ Transport zwischen WAR und KVG nur im Notfall.

Die Vorteile einer gemeinsamen Projektgesellschaft überwiegen die Nachteile.

Vor- und Nachteile einer gemeinsamen Projektgesellschaft für die Erzeugung

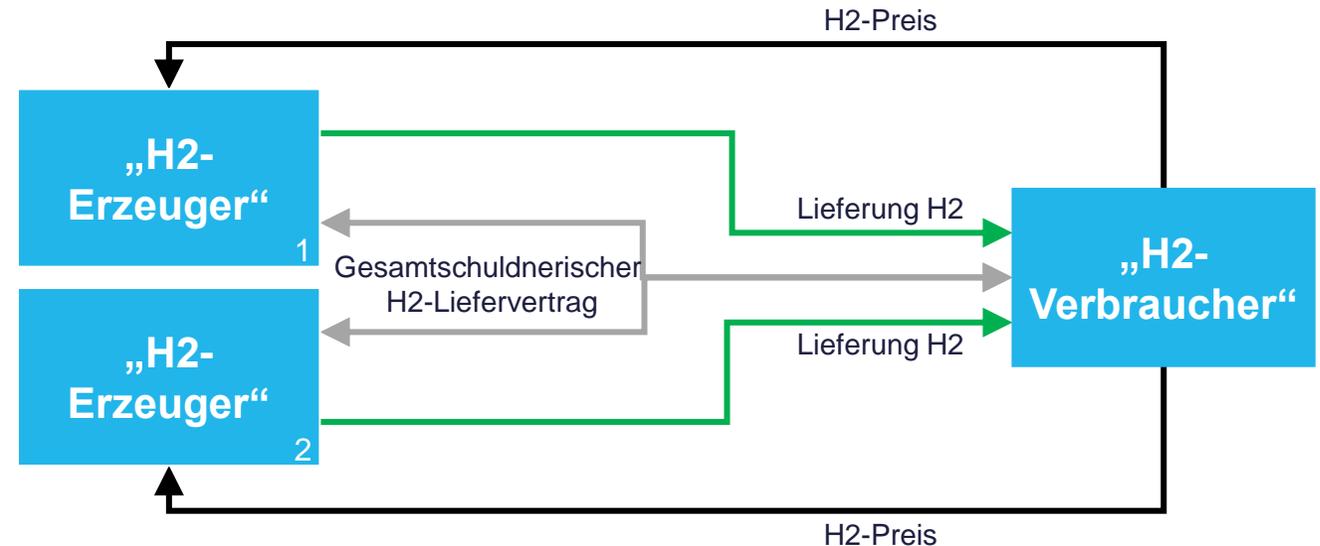
+ Vorteile	- Nachteile
<ul style="list-style-type: none">▶ Eine einzelne Projektgesellschaft ermöglicht die Optimierung von Erzeugung und Nachfrage.<ul style="list-style-type: none">▶ Kosteneinsparungen durch Reduzierung der Genehmigungsverfahren, Skaleneffekte, ggf. optimierten Strombezug.▶ Eine einzelne Projektgesellschaft ermöglicht die Bündelung der Nachfrage, um die Verhandlungsposition gegenüber Abnehmern und Lieferanten zu stärken.▶ Eine einzelne Projektgesellschaft verhindert die Kannibalisierung der Nachfrage in der frühen Marktphase.▶ Alle Risiken (insbesondere das Rohstoffrisiko) werden auf viele Investoren verteilt.▶ Die beteiligten Unternehmen können das Risiko gegenüber den Muttergesellschaften isolieren.	<ul style="list-style-type: none">▶ Zusätzliche Investitionen in Abfällstationen und Logistikinfrasturktur sind notwendig.▶ Es entstehen hohe Ansprüche an Redundanz (Versorgungssicherheit).▶ Die Entscheidungsbefugnis ist durch den Gesellschaftsvertrag begrenzt.▶ Der Betrieb des Unternehmens kann ggf. intransparent sein.▶ Das Unternehmen kann Liquiditätsrisiken aufweisen.

Eine Liefergemeinschaft kann helfen, Probleme der Versorgungssicherheit zu lindern.

Funktion des Modells

BESCHREIBUNG:

- Mehrere Erzeuger liefern für einen Verbraucher gesamtschuldnerisch haftend definierte H2-Mengen zu definierten Preisen.
- Die Erzeuger sind damit gemeinschaftlich für die Liefererfüllung verantwortlich.
- Dieses Modell kann für verschiedene Verbraucher mit jeweils verschiedenen Erzeugern aufgesetzt werden (ein Erzeuger kann mehrere Verbraucher beliefern).



→ Vertragsbindung

→ Dienstleistungen

→ Wasserstoff

→ Finanzflüsse

Agenda

> Ziel des Workshops	10 min	10:00 – 10:10 Uhr
> Vorstellungsrunde	30 min	10:10 – 10:40 Uhr
> Aktuelle reg. & wirt. Rahmenbedingungen	30 min	10:40 – 11:10 Uhr
> Aktuelle Puzzleteile und potenzielle Rollen der Akteure	30 min	11:10 – 11:40 Uhr
> Pause	30 min	11:40 – 12:10 Uhr
> Entwicklung einer Konzeptidee	140 min	12:10 – 14:30 Uhr
> Schlussfolgerungen	30 min	14:30 – 15:00 Uhr

Agenda

➤ Ziel des Workshops	10 min	10:00 – 10:10 Uhr
➤ Vorstellungsrunde	30 min	10:10 – 10:40 Uhr
➤ Aktuelle reg. & wirt. Rahmenbedingungen	30 min	10:40 – 11:10 Uhr
➤ Aktuelle Puzzleteile und potenzielle Rollen der Akteure	30 min	11:10 – 11:40 Uhr
➤ Pause	30 min	11:40 – 12:10 Uhr
➤ Entwicklung einer Konzeptidee	140 min	12:10 – 14:30 Uhr
➤ Bewertung von Chancen und Risiken		
➤ Geschäftsmodelle		
➤ Fördermöglichkeiten		
➤ Schlussfolgerungen	30 min	14:30 – 15:00 Uhr

Agenda

➤ Ziel des Workshops	10 min	10:00 – 10:10 Uhr
➤ Vorstellungsrunde	30 min	10:10 – 10:40 Uhr
➤ Aktuelle reg. & wirt. Rahmenbedingungen	30 min	10:40 – 11:10 Uhr
➤ Aktuelle Puzzleteile und potenzielle Rollen der Akteure	30 min	11:10 – 11:40 Uhr
➤ Pause	30 min	11:40 – 12:10 Uhr
➤ Entwicklung einer Konzeptidee	140 min	12:10 – 14:30 Uhr
➤ Bewertung von Chancen und Risiken		
➤ Geschäftsmodelle		
➤ Fördermöglichkeiten		
➤ Schlussfolgerungen	30 min	14:30 – 15:00 Uhr

Agenda

➤ Ziel des Workshops	10 min	10:00 – 10:10 Uhr
➤ Vorstellungsrunde	30 min	10:10 – 10:40 Uhr
➤ Aktuelle reg. & wirt. Rahmenbedingungen	30 min	10:40 – 11:10 Uhr
➤ Aktuelle Puzzleteile und potenzielle Rollen der Akteure	30 min	11:10 – 11:40 Uhr
➤ Pause	30 min	11:40 – 12:10 Uhr
➤ Entwicklung einer Konzeptidee	140 min	12:10 – 14:30 Uhr
➤ Bewertung von Chancen und Risiken		
➤ Geschäftsmodelle		
 ➤ Fördermöglichkeiten		
➤ Schlussfolgerungen	30 min	14:30 – 15:00 Uhr

Die NIP II fördert Wasserstoffprojekte für den Einsatz im Verkehrssektor.

Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase II

	Elektrolyse
Förderrichtlinie	NIP II
Grundlage	AGVO
Fördermittelgeber	BMDV
Antragsberechtigte	Juristische Personen des öffentlichen und des Privatrechts, natürliche Personen (sofern wirtschaftlich tätig)
Fördermittelgegenstand	Elektrolysen (für H ₂ -Erzeugung für Mobilität)
Fördergrundlage	Gesamtinvestitionskosten
Höhe der Förderung	45 % (Beihilfen für KU können um 20 %, für MU um 10 % höher ausfallen (AGVO))
Maximalbetrag	k. A.
Zusatzanforderungen	Betrieb der Elektrolyse mit erneuerbarem Strom.
Zusatzinformationen	„Wettbewerbliche“ Vergabe, Kriterien: Fördereffizienz, techn. Konzept, Geschäftsmodell, regionale Wertschöpfung

Gemäß Richtlinie, [Gemäß letztem Förderaufruf](#)

NIP II: Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Phase II; **H2-ÖNPV:** Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr, **KsNI:** Richtlinie über die Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur

Die NIP II fördert neben Fahrzeugen und Tankinfrastruktur auch Elektrolyseure und KWK-Anlagen.

Fördergegenstände der NIP II

Investition	Kontext	Förderfähige Kosten	Förderquote
Fahrzeuge (Straßen-, Schienen-, Wasser-, Sonderfahrzeuge)	Gewerblicher & kommunaler Einsatz	Investitionsmehrkosten	Bis zu 40 % (KMU-Bonus möglich) (bis 50 % wenn keine Beihilfe)
H2-Tankstelle	100 % grünes H2 & öffentlich (diskriminierungsfreier Zugang)	Betriebsgewinnbereinigte Investitionskosten	Bis zu 50 % (KMU-Bonus möglich) (in Zukunft ggf. bis 80 %)
	Nicht öffentlich zugänglich (z.B. Betriebshof)	Investitionsmehrkosten	Bis zu 40 % (KMU-Bonus möglich)
H2-Infrastruktur (z.B. H2-Trailer, Abfüllstationen)	Öffentlich (diskriminierungsfreier Zugang)	Betriebsgewinnbereinigte Investitionskosten	Wird im Call/ Ausschreibung festgelegt
Elektrolyseur (Mindestleistung 250 kW _{el})	Betrieb mit EE-Strom & Erzeugtes H2 muss im Mobilitätssektor genutzt werden.	Investitionskosten	Bis zu 45 % (KMU-Bonus möglich)
KWK Anlagen (Auf Basis eines BZ-Systems)	Einsatz zur Bordenergieversorgung von Fahrzeugen	Investitionsmehrkosten	Bis zu 45 % (KMU-Bonus möglich)
Flurförderzeug-Flotten	Mind. 10 Fahrzeuge oder Mindestbedarf 3 kg H2 pro Betriebsstunde	Investitionsmehrkosten	Bis zu 40 % (KMU-Bonus möglich)
Netzferne EVA	Gewerblicher Einsatz	Investitionsmehrkosten	Bis zu 40 % (KMU-Bonus möglich)

Das Land Schleswig-Holstein bezuschusst die Erzeugung und Nutzung von grünem Wasserstoff.

Richtlinie: *Aufbau einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft – Wasserstoffrichtlinie*

SH

Fördermittelgeber	Land Schleswig-Holstein
Abwicklung	Wirtschaftsförderung und Technologietransfer Schleswig-Holstein GmbH (WTSH)
Fördergegenstand	<ul style="list-style-type: none">• Förderungsfähig: Erzeugung und Speicherung von grünem Wasserstoff oder –derivaten• industrielle/chemische Nutzung von grünem Wasserstoff- Erstellung von Umweltstudien im Rahmen der Wasserstoffwirtschaft
Fördervoraussetzungen	<ul style="list-style-type: none">• Durchführung in Schleswig-Holstein• Nachweis, dass Strom für Erzeugung aus EE• Abwärme muss genutzt werden• Nachweis über Einsatzfelder im eigenen Unternehmen bzw. Abnehmer
Antragsberechtigte	Unternehmen, KMUs, kommunale Einrichtungen
Fördervolumen (insgesamt)	-
Art und Höhe der Förderung	<ul style="list-style-type: none">• max. 5 Mio. €*• zwischen 40 und 50% der förderfähigen Kosten
Zeiten	<u>Verkündung</u> : 15.07.2021; <u>Gültigkeit</u> : 30.06.2024; <u>Frist zur Einreichung</u> : Dauerhafte Antragstellung in zwei Stufen
Weitere Informationen	https://wtsh.de/de/aufbau-einer-nachhaltigen-wasserstoffwirtschaft---wasserstoffrichtlinie

* Zuschuss

Das Land Schleswig-Holstein bezuschusst Bau und Installation von Wasserstofftankstellen.

SH

Richtlinie: *Aufbau einer Wasserstofftankstelleninfrastruktur*

Fördermittelgeber	Land Schleswig-Holstein
Abwicklung	Wirtschaftsförderung und Technologietransfer Schleswig-Holstein GmbH (WTSH)
Fördergegenstand	Bau, Installation oder die Modernisierung einer öffentlich zugänglichen Wasserstofftankstelle für Straßenfahrzeuge
Fördervoraussetzungen	<ul style="list-style-type: none">• Keine Förderung durch Bund oder EU• Vorhaben in Schleswig-Holstein• Muss 24 Stunden am Tag an allen Tagen eines Jahres geöffnet sein• Es darf nur grüner Wasserstoff
Antragsberechtigte	Unternehmen, KMUs, kommunale Einrichtungen
Fördervolumen (insgesamt)	-
Art und Höhe der Förderung	<ul style="list-style-type: none">• max. 2 Mio. €*• bis zu 70%• bei besonderem landespolitischem Interesse bis zu 75 %• Zuschuss muss min. 100.000€ Förderungszuschuss
Zeiten	<u>Verkündung</u> : 08.04.2022; <u>Gültigkeit</u> : 30.06.2024; <u>Frist zur Einreichung</u> : Dauerhafte Antragstellung in zwei Stufen
Weitere Informationen	https://wasserstoffwirtschaft.sh/de/foerderungsprogramm/aufbau-einer-wasserstofftankstelleninfrastruktur-in-sh-140

* Zuschuss

Agenda

➤ Ziel des Workshops	10 min	10:00 – 10:10 Uhr
➤ Vorstellungsrunde	30 min	10:10 – 10:40 Uhr
➤ Aktuelle reg. & wirt. Rahmenbedingungen	30 min	10:40 – 11:10 Uhr
➤ Aktuelle Puzzleteile und potenzielle Rollen der Akteure	30 min	11:10 – 11:40 Uhr
➤ Pause	30 min	11:40 – 12:10 Uhr
➤ Entwicklung einer Konzeptidee	140 min	12:10 – 14:30 Uhr
➤ Schlussfolgerungen	30 min	14:30 – 15:00 Uhr

Vielen Dank!



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

Koordiniert durch:



Dr. Hanno Butsch, Shaun Pick

Projektträger:



Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich



KielRegion

HyExperts KielRegion

Erzeugung: Ergebnisse

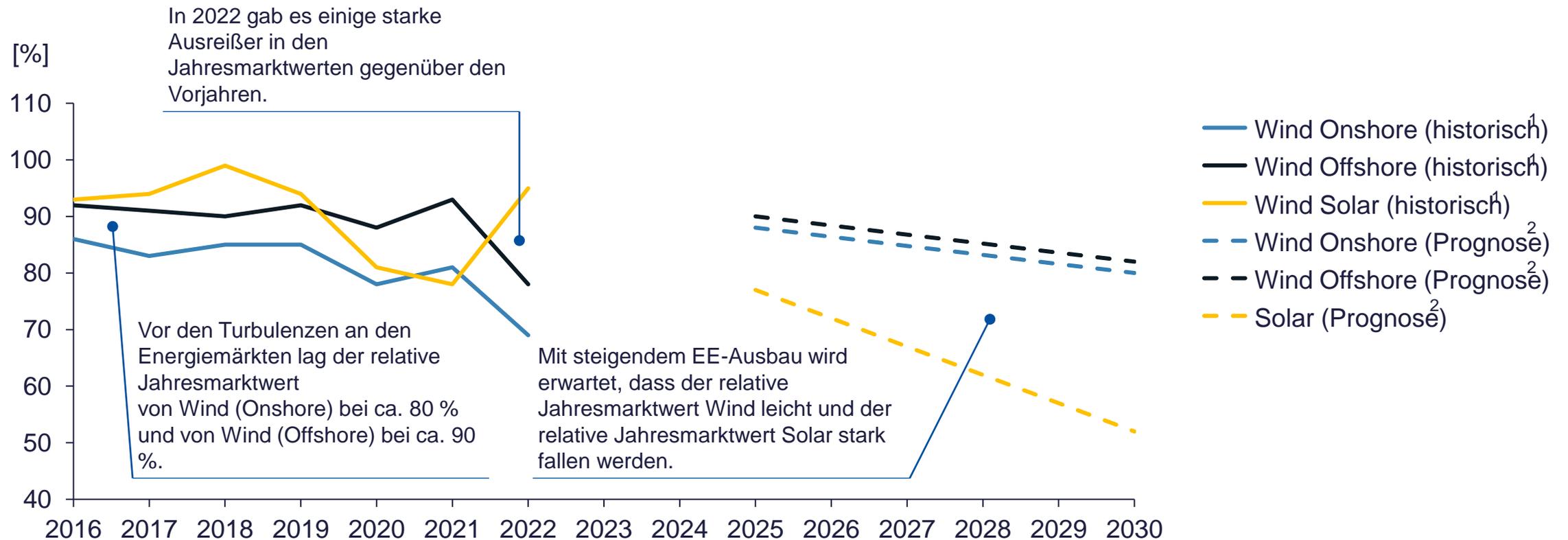


Agenda

- **Techno-ökonomische Aspekte der H2-Erzeugung**
- Konkrete H2-Projektansätze in der Region Kiel
- Standortanalyse Erzeugung

Die relativen Jahresmarktwerte für Wind und Solar werden zukünftig fallen.

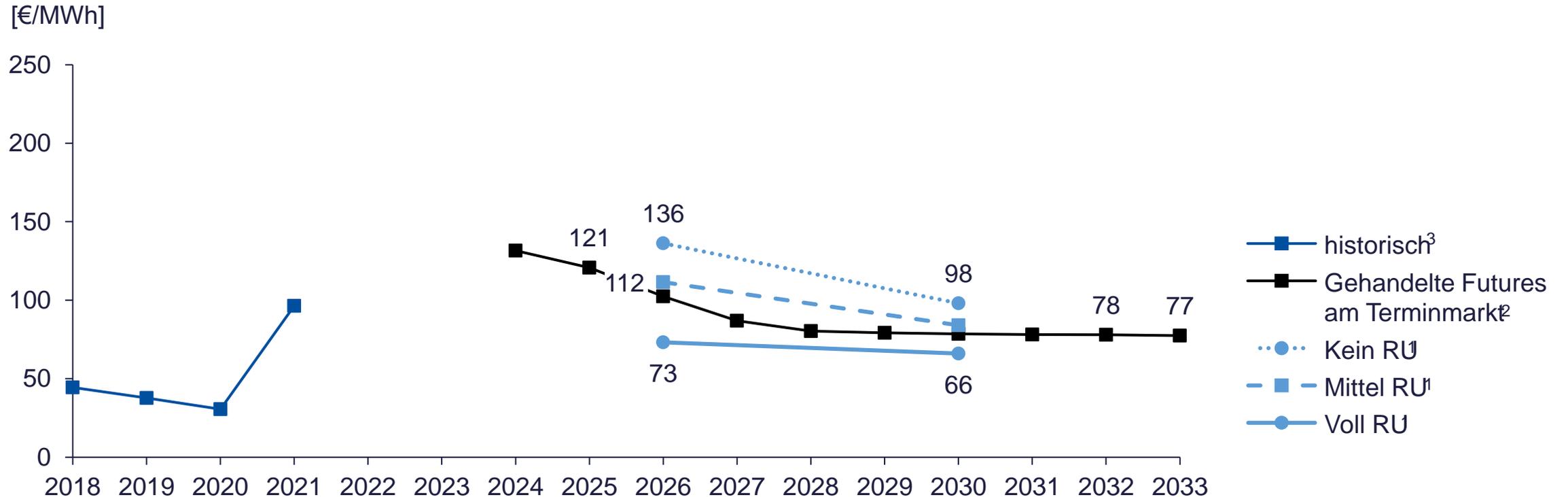
Relative Jahresmarktwerte nach Technologie



¹ Quelle: Netztransparenz, ² Quelle: Eigene Marktanalysen

Preise der Strom-Langfristbeschaffung liegen unter 80 €/MWh für ein BASE-Produkt.

Stromkosten: Preisentwicklungen



Quelle: ¹ Strompreisprognose, Prognos, 2022. Unsicherheit auf Angebotsseite: Voll RU: vollständige Verfügbarkeit russischen Gases (keine Importbeschränkungen, vollständige Nutzung der vorhandenen Infrastruktur (Pipeline + LNG)), Mittel RU: Sukzessive Reduktion der RU-Mengen, Erreichen der Unabhängigkeit von RU-Mengen im Sommer 2024, Kein RU: vollständiger Handelsstopp des Erdgashandels mit Russland

² EEX Phelix DE Futures (Base-Produkt, gehandelte Futures am Terminmarkt (Abrufdatum: 21.07.2023)), ³ EPEX DBDA

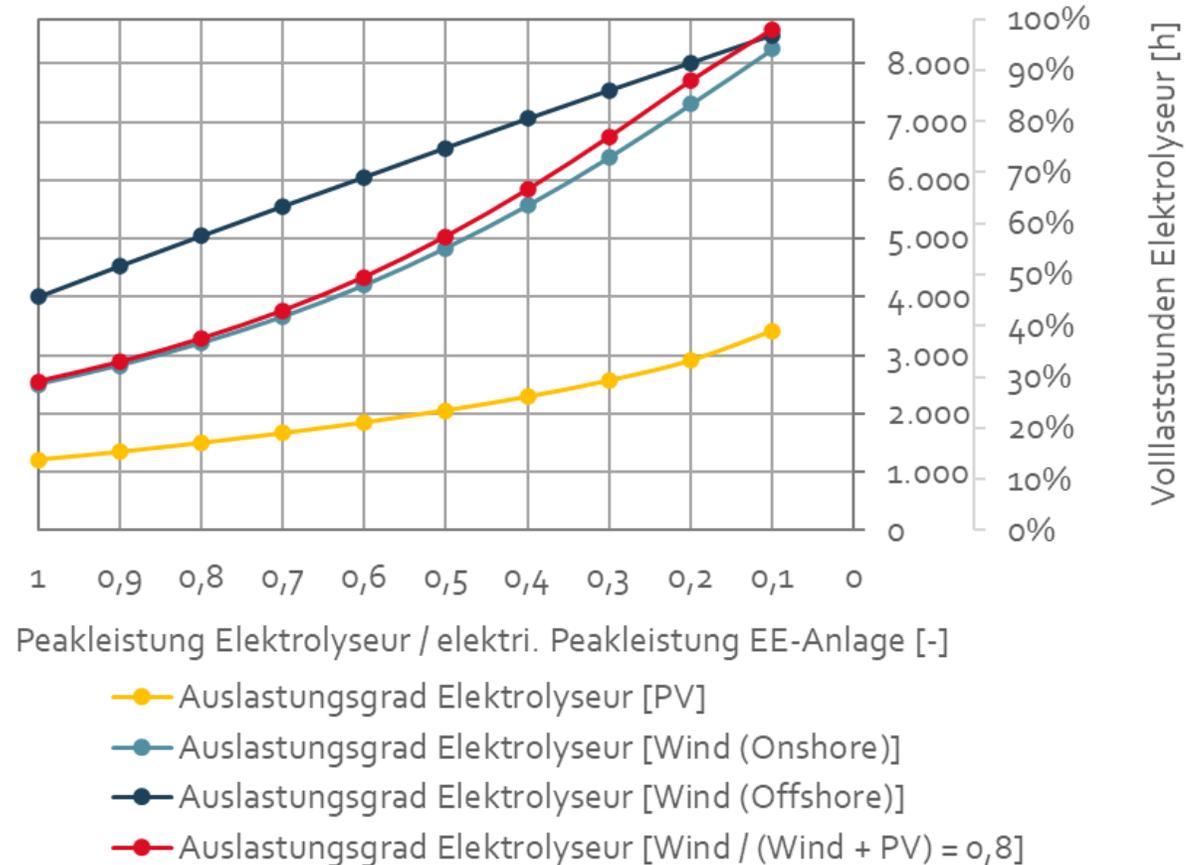
Die Auslastung der Elektrolyse steigt mit zunehmender Überbauung.

Auslastung der Elektrolyse

► Annahmen:

► WEA-Profil*:

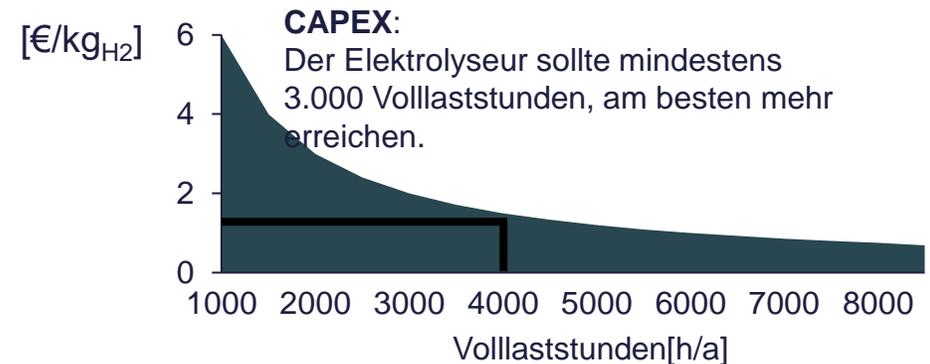
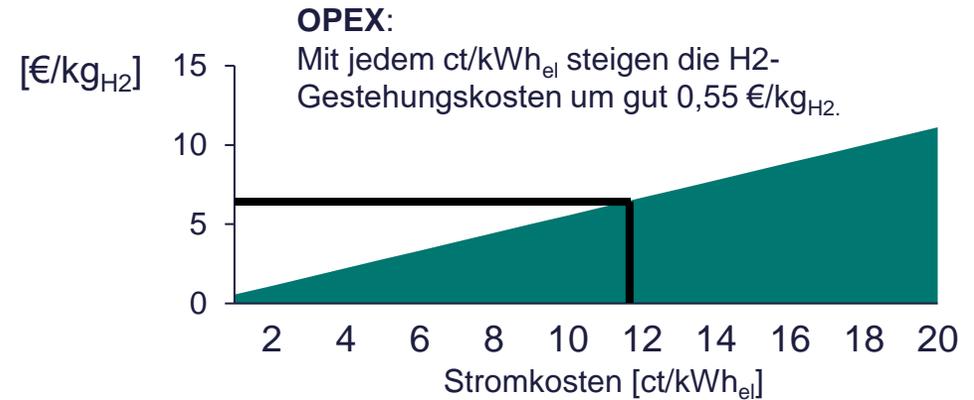
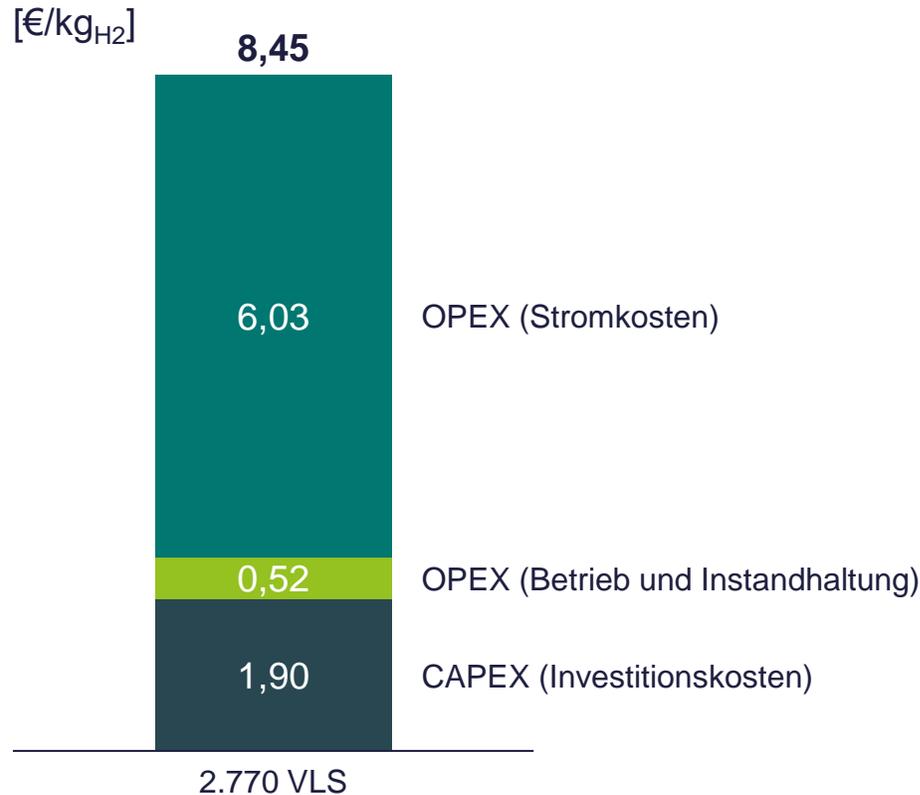
- Leistung: 4 MW_{el}
- Nabenhöhe: 150 m
- Modell: VESTAS V90 2000
- VLS: 2.776 h



*| <https://www.renewables.ninja/>

Die Stromkosten sind der größte Einflussparameter bei der H2-Erzeugung.

Beispielhafte H2-Gestehungskosten



Annahmen zu H2-Gestehungskosten: 4-MW-Elektrolyseur (Auslastung: 2.770 Volllaststunden, Strombezugskosten: 12 ct/kWh, keine Entrichtung von Abgaben + Umlagen, Systemwirkungsgrad: 61 % ($\approx 55 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$), Systemkosten Elektrolyse (inkl. Ingenieursdienstleistungen und Genehmigungskosten): 2,3 Mio. €)

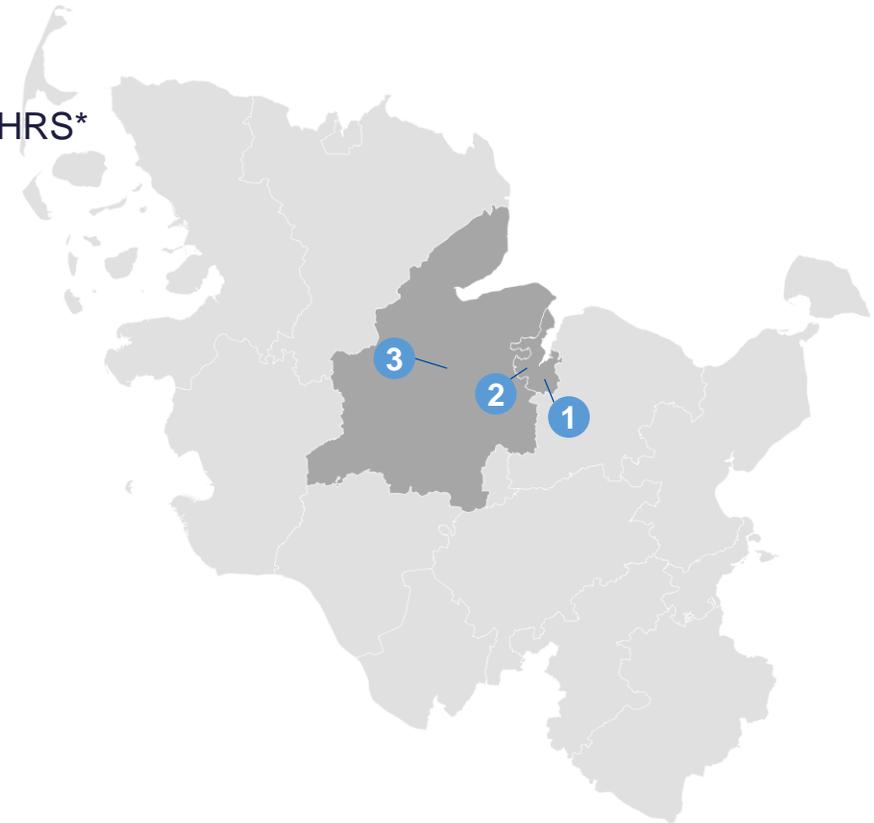
Agenda

- Techno-ökonomische Aspekte der H₂-Erzeugung
- **Konkrete H₂-Projektansätze in der Region Kiel**
- Standortanalyse Erzeugung

In der Region gibt es gegenwärtig drei potenzielle Standorte für eine Elektrolyse.

Übersicht der potenziellen Projektstandorte in der Erzeugung

- 1 Stubbenkoppel, Stadt Kiel**
 - ▶ Bevorzugter Standort für neuen KVG Betriebshof
 - ▶ 77.000 m² mit ausreichend Platz für den Elektrolyseur und die HRS*
 - ▶ Status: Unbebaut
- 2 Kronshagener Weg, Stadt Kiel**
 - ▶ Alternativer Standort für den neuen KVG Betriebshof
 - ▶ 37.500 m² mit potentiell Platz für Elektrolyseur und HRS
 - ▶ Status: Unbebaut
- 3 Borgstedt, Kreis Rendsburg - Eckenförde**
 - ▶ Aktueller Logistikstandort für die AWR
 - ▶ ausreichender Platz für den Elektrolyseur und die HRS
 - ▶ Status: Bebaut



* HRS = „Hydrogen Refueling Station“; H2-Tankstelle

Agenda

- Techno-ökonomische Aspekte der H2-Erzeugung
- Konkrete H2-Projektansätze in der Region Kiel
- **Standortanalyse Erzeugung**
- **Anforderungskatalog Erzeugung**

Für die Eignungsprüfung der Standorte zur H2-Erzeugung werden Anforderungskriterien definiert.

Anforderungskatalog H2-Erzeugung & -Speicherung

► Um Standorte für die Errichtung von Wasserstoffherstellungsanlagen und bewerten zu können, werden folgende Kriterien definiert und im Folgenden erläutert:

- A Flächenverfügbarkeit.
- B Wasserverfügbarkeit.
- 3 C Genehmigungsvoraussetzungen für Elektrolyse- & Speicheranlagen.
- 4. D Potenzial zum Anschluss der Elektrolyse an einen Mittelspannungsanschluss.
- D Potenzial zur H2-Abgabe an Trailer (Straßenanbindung).
- E

¹Nummerierung bedeutet keine Hierarchie.

Elektrolyseure benötigen je nach Technologie und Leistung unterschiedliche Flächen.

A Flächenverfügbarkeit

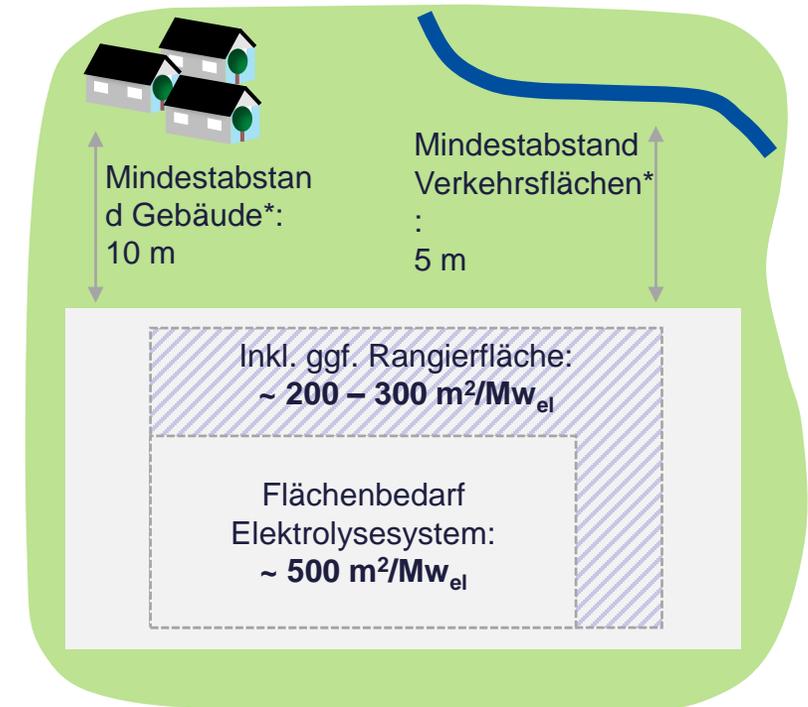
- Bei der Analyse eines Standorts ist zu prüfen, ob ausreichend Fläche für die Errichtung des Elektrolyseurs vorhanden ist.
- Die benötigte Fläche hängt ab von:
 1. **Technologiewahl.** Je nach Hersteller und Elektrolysetechnologie (PEM, AEL, SO) variiert der Platzbedarf.
 2. **Größe bzw. Leistung der Elektrolyse.** Je größer der Elektrolyseur, desto mehr Fläche ist notwendig (Skaleneffekte berücksichtigen).
 3. **Mindestabstände zur umgebenden Infrastruktur,** z. B. Straßen & Wohngebiete.

Bewertungsschema:

Für die Bewertung der Standorte wird ein Elektrolyseur mit einer Leistung von **10 MW** mit einem Flächenbedarf von **5.000 m²** angenommen.

Gut	Der potenzielle Standort erfüllt die Kriterien an die Flächenbedarfe und die notwendigen Abstände zu bestimmten Infrastrukturen.
Mittel	Der potenzielle Standort erfüllt die Kriterien an die Flächenbedarfe und die notwendigen Abstände bei wesentlichen Anpassungen (bspw. Abriss oder Flächenbegradigung).
Wenig	Der potenzielle Standort erfüllt die Kriterien an die Flächenbedarfe und die notwendigen Abstände zu bestimmten Infrastrukturen nicht.

*| Hierbei handelt es sich um Mindestangaben, die im Rahmen einer Einzelfallprüfung auch zu anderen Abständen führen können.



Ein Elektrolyseur mit 1 MW Leistung benötigt pro Jahr so viel Wasser wie 17 Menschen.

B Wasserverfügbarkeit

- Für die Erzeugung von 1 kg Wasserstoff werden ca. 9 – 10 Liter entmineralisiertes Wasser oder ca. 12 – 22 Liter Speisewasser benötigt.
- Ein Elektrolyseur mit einer Leistung von 1 MW benötigt dementsprechend pro Jahr mindestens 810.000 Liter Wasser*. Das entspricht ungefähr dem Jahresbedarf von 17 Menschen.
- Die Nutzung von Grundwasser und Regenwasser benötigt eine aufwändigere Aufbereitung, was die Investitionskosten erhöht.
- Bei der Standortauswahl ist ein Wassergutachten in Auftrag zu geben, um die verfügbaren Entnahmemengen und Entnahmeorte zu ermitteln.

Bewertungsschema:

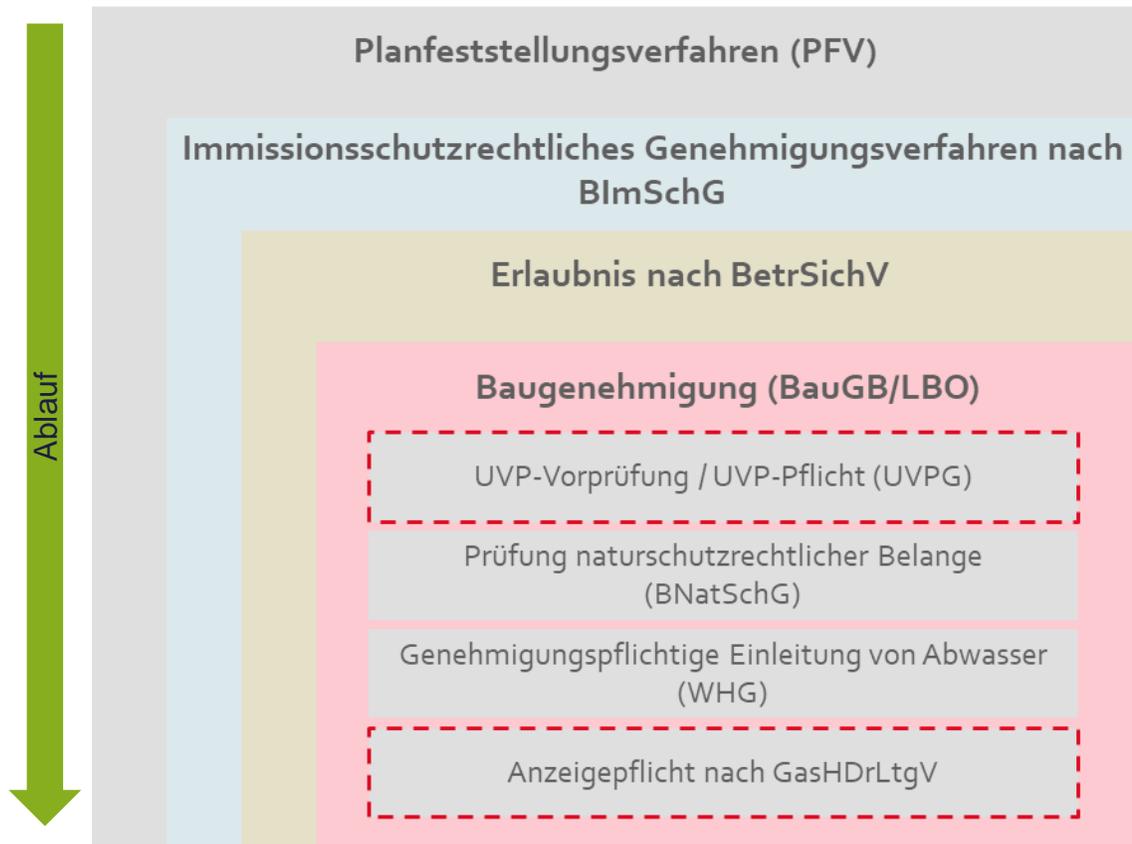
Für die Bewertung der Standorte wird ein Elektrolyseur mit einer Leistung von **10 MW** angenommen. Der Wasserbedarf liegt mindestens bei 8,1 Mio. Liter pro Jahr.

Gut	Der potenzielle Standort kann genug Wasser zur Versorgung des Elektrolyseurs bereitgestellt werden.
Wenig	Der potenzielle Standort kann nicht genug Wasser zur Versorgung des Elektrolyseurs bereitgestellt werden.

*| Auslastung Elektrolyse: 5.000 VLS

Nach aktueller Rechtslage werden Elektrolysen dem BImSchG zugeordnet.

C Genehmigungsvoraussetzungen – Ausgangssituation:



Immissionsschutzrechtliche Genehmigungsverfahren nach BImSchG

- ▶ Das BImSchG bestimmt die Formen der Umwelteinwirkungen („Immissionen“), die als „Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnlichen Vorgänge“ definiert werden.
 - ▶ 4. BImSchV bestimmt die genehmigungsbedürftigen Anlagen
 - ▶ 9. BImSchV bestimmt die Art und Umfang des Genehmigungsverfahrens
- ▶ PtG-Anlagen sind genehmigungspflichtig nach § 4 BImSchG i. V. m. Nr. 4.1.12 Anhang 1 der 4. BImSchV
- ▶ **Nach dieser Einordnung müssen Elektrolysen (aktuell) immer nach BImSchG genehmigt werden.**

Quelle: Angelehnt an Koralewicz, 2020; Portal Green: Power-to-Gas-Leitfaden zur Integration Erneuerbarer Energien (Band 1) – Genehmigungsrechtlicher Leitfaden für Power-to-Gas-Anlagen

Die Komponenten der H₂-Erzeugung unterliegen unterschiedlichen Gesetzesgrundlagen.

C

Teil der Anlage	Gesetzesgrundlage	Rechtliche Folgen
Wasserstoffherzeugung (chemische Umwandlung in industriellem Umfang)	Nr. 4.1.12 Anhang 1 4. BImSchV Nr. 4.2 der Anlage 1 UVPG	<ul style="list-style-type: none"> • Förmliches Genehmigungsverfahren nach § 10 BImSchG • Industrieemissionsanlage (IE-Anlage)* • Allgemeine Vorprüfung zur Feststellung der UVP-Pflicht nach § 7 Abs. 1 UVPG
Wasserstofflagerung	Nr. 9.3.2 Anhang 1 und Nr. 17 Anhang 2 4. BImSchV Nr. 2.44 Angang 1 der 12. BImSchV	Lagerung bis 3 t → Erlaubnispflicht nach BetrSichV Lagerung ab 3 t → Vereinfachtes Verfahren nach § 19 BImSchG Lagerung ab 30 t → Förmliches Verfahren nach § 10 BImSchG Ab 5 t → Störfallbetriebsbereich mit Grundpflichten Ab 50 t → Störfallbetriebsbereich mit erweiterten Pflichten
Trailerbefüllstation Füllkapazität > 10 kg/h	§ 18 Abs. 1 Nr. 2 BetrSichV	<ul style="list-style-type: none"> • Erlaubnispflicht nach BetrSichV • Überwachungsbedürftig**
Gasfüllanlage (H ₂ -Tankstelle)	§ 18 Abs. 1 Nr. 3 BetrSichV	<ul style="list-style-type: none"> • Erlaubnispflicht nach BetrSichV • Überwachungsbedürftig
Pumpen, Wasseraufbereitungsanlage, Gasreinigungsanlagen, Verdichter etc. unterliegen außer der Baugenehmigung keiner zusätzlichen Genehmigungserfordernis		

Neben Industriegebieten sind „Sonstige Sondergebiete“ am verheißungsvollsten.

C Genehmigungsvoraussetzungen – Übersicht der Möglichkeiten

Planungsrechtliche Zulässigkeiten nach BauNVO*

- ▶ Welche Nutzungen in einem Baugebiet zulässig ist, ist in der BauNVO geregelt. In den §§ 2 ff werden die einzelnen **Gebietstypen** beschrieben.
- ▶ Relevante Gebiete für Elektrolysen:
 - **§ 8 Gewerbegebiet:**
Gewerbegebiete dienen vorwiegend der Unterbringung von nicht erheblich belästigenden Gewerbebetrieben
 - **§ 9 Industriegebiet:**
Industriegebiete dienen ausschließlich der Unterbringung von Gewerbebetrieben, und zwar vorwiegend solcher Betriebe, die in anderen Baugebieten unzulässig sind.
 - **§ 11 Sonstige Sondergebiete:**
Als sonstige Sondergebiete sind solche Gebiete darzustellen und festzusetzen, die sich von den Baugebieten nach den §§ 2 bis 10 wesentlich unterscheiden.
 - **§ 14 Abs. 2 Nebenanlagen (Teil von §11):**
Die der Versorgung der Baugebiete mit Elektrizität, Gas, Wärme und Wasser [...] dienenden Nebenanlagen können in den Baugebieten als Ausnahme zugelassen werden [...].

Erste Schlussfolgerungen

1.

Gewerbegebiete

- ▶ Aktuell nicht möglich.
- ▶ Aussicht auf EU-Entwicklungen.



2.

Industriegebiete

- ▶ Ohne weitere Probleme möglich!



3.

Sonstige Sondergebiete & Nebenanlagen

- ▶ Mit entsprechendem Aufwand besteht eine realistische Umsetzungswahrscheinlichkeit.



*Vorordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke

Die Genehmigung in Gewerbegebieten ist aktuell nicht möglich.

C Genehmigungsvoraussetzungen – Optionen für Gewerbegebiete

1.

Einordnung Gewerbegebieten und „nicht erheblicher Belästigung“

- ▶ Ob ein **nicht erheblich belästigender Gewerbebetrieb** vorliegt, wird nach der Rechtsprechung aufgrund einer **typisierenden Betrachtung** beurteilt.
- ▶ Maßgeblich ist, ob Betriebe des in Frage stehenden Typs **üblicherweise** für die Umgebung in diesem Sinne erheblich belästigend wirken;
- ▶ auf das Maß der **konkret** hervorgerufenen oder in Aussicht genommenen schädlichen Umwelteinwirkungen kommt es demgegenüber grundsätzlich nicht an.

- ▶ Die **typisierende Betrachtung** findet durch § 4 BImSchG statt und wird durch die 4. & 9. BImSchV umgesetzt.
- ▶ Sofern eine Anlage nach 4. & 9. BImSchV Genehmigungspflichtig ist, wird davon ausgegangen dass diese Anlage [...] *im besonderen Maße geeignet sind, schädliche Umwelteinwirkungen hervorzurufen oder in anderer Weise die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft zu gefährden, erheblich zu benachteiligen oder erheblich zu belästigen* [...] (§4 BImSchG).

Rechtliche Beurteilung

- ▶ Vorausgesetzt die zu genehmigende Elektrolyseanlage fällt in den Anwendungsbereich der 4. & 9. BImSchV, so ist von einer potenziellen erheblichen Belästigung auszugehen.
 - ➔ In diesem Falle ist eine Elektrolyseanlage in einem Gewerbegebiet nicht Genehmigungsfähig.
- ▶ Sofern eine Elektrolyseanlage in nicht industriellem Maßstab (siehe Folie **XX**) geplant wird, könnte eine Genehmigung möglich sein.
- ▶ Voraussetzung ist, dass die Mengenschwelle der Wasserstoffspeicherung von 5 t nicht überschritten wird. Bei einer Überschreitung der Mengenschwelle greift die 12. BImSchV und es muss von einer potenziell erheblichen Belästigung ausgegangen werden.

Fazit:

- ▶ **Zum aktuellen Zeitpunkt ist eine Genehmigung eines Elektrolyseurs in einem Gewerbegebiet für industrielle Zwecke nicht möglich.**
- ▶ **Solle einen Nutzung in nicht industriellem Maßstab geplant sein, muss die Mengenschwelle von 5 t Wasserstoff (12. BImSchV) beachtet werden.**

Die kommerzielle Nutzung ist aktuell ausschlaggebend für den „Industriellen Umfang“

C Genehmigungsvoraussetzungen – Nicht-Industrieller Maßstab

Erzeugung von Wasserstoff in nicht-industriellem Maßstab

- ▶ Es stellt sich die Frage, was unter dem Begriff des „industriellen Umfangs“ zu verstehen ist, denn das BImSchG liefert diesbezüglich keine Antwort. Es handelt sich um einen unbestimmten Rechtsbegriff.
- ▶ In der Richtlinie 2010/75/EU wurde festgelegt, dass die Europäischen Kommission Leitlinien für eine Auslegung der Begrifflichkeit zu entwickeln hat. Diese fehlen allerdings bisher.
- ▶ Die Kommission bietet bislang lediglich eine vage Empfehlung: Bei der Entscheidung über die Frage, ob eine Produktion im „industriellen Umfang“ vorliegt oder nicht, seien mehrere Kriterien zu berücksichtigen.
- ▶ Der Umstand, dass eine Tätigkeit aus **kommerziellen Zwecken** erfolgt, sei allerdings bereits ein **sehr starker Indikator** für eine Herstellung im industriellen Umfang.
- ▶ Angelehnt an diese einfache Logik, nach der der industrielle Umfang zu bejahen ist, sobald es sich um eine gewerbliche Anlage handelt, verhält sich die deutsche Behördenpraxis entsprechend.

Beurteilung

- ▶ In der Praxis ist zu beobachten, dass Elektrolysen in Privathäusern und Gewerbegebieten bereits gebaut wurden und aktuell betrieben werden.
- ▶ Vermutlich werden diese Elektrolysen als nicht Kommerziell eingestuft, weshalb sie nicht einem Genehmigungsverfahren nach BImSchG unterliegen.
- ▶ **Beispiele:**
 - ▶ Picea System von Home Power Solutions
<https://www.homepowersolutions.de/referenzen/>
 - ▶ Hensoldt Green Buildings Kiel
<https://wasserstoffwirtschaft.sh/de/projektkarte/hensoldt-green-building-in-kiel-21>

Quelle: Power-to-Gas: Barrieren im Genehmigungsprozess und Ansätze zur Optimierung; Lea Gallé

Durch die Novellierung der IE-Richtlinie könnten sich neue Möglichkeiten für Elektrolysen ergeben.

C Genehmigungsvoraussetzungen – Novellierung der IE-Richtlinie der EU

Industrie-Emissionsrichtlinie (IE-Richtlinie)¹

- Die Industrie-Emissionsrichtlinie¹⁴ (im Folgenden: IE-Richtlinie) regelt die „integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung infolge industrieller Tätigkeiten“. Sie verpflichtet die Mitgliedstaaten unter anderem dazu, für die in **Anhang 1** dieser Richtlinie näher beschriebenen industriellen Tätigkeiten ein Genehmigungsverfahren durchzuführen. Sie bildet damit eine der **europäischen Grundlagen für das immissionsschutzrechtliche Genehmigungsverfahren nach den §§ 4 ff. BImSchG. In der 4. BImSchV sind diese Anlagen mit „E“ gekennzeichnet.**

Vorschlag des Rates der EU zur Novellierung der IE-Richtlinie

- In Anhang 1 einen eigenen Tatbestand für Wasserstoff schaffen.
- Durch Nr. 6.6. soll „Wasserelektrolyse zur Wasserstoffherzeugung mit einer Produktionskapazität von **über 60 t pro Tag**“ in den Anwendungsbereich der IE-Richtlinie fallen.

Rechtliche Beurteilung

- Bisher werden Elektrolyseure wie folgt eingeordnet²: „Anlagen zur Herstellung von Stoffen oder Stoffgruppen durch chemische, biochemische oder biologische Umwandlung **in industriellem Umfang** [...] zur Herstellung von Gasen wie [...] Wasserstoff“.
- Eine pauschale Einordnung als Anlage, die Wasserstoff in industriellem Umfang produziert, wird aktuell diskutiert. Diesem Umstand wird durch den Vorschlag des EU-Rates nun Folge geleistet.
- Sofern der Vorschlag aus der IE-Richtlinie beschlossen wird, würden Elektrolyseure, die eine **Produktionskapazität von 60 t oder weniger pro Tag** aufweisen, **nicht mehr dem Anwendungsbereich der IE-Richtlinie unterfallen.**
- Damit könnte der nationale Gesetzgeber **Anlagen bis zu dieser Größenordnung von der immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsbedürftigkeit ausnehmen.**
 → Dies würde eine **Genehmigung von Elektrolysen in Gewerbegebieten neue Möglichkeiten eröffnen. Davon unberührt bleiben die Vorgaben der Störfallverordnung nach 12. BImSchV.**

¹ Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlamentes und des Rates v. 24.11.2010 über Industrieemissionen, Abl. EU, L 334/17.

² Ziff. 4.2 Anhang 1 IE-Richtlinie bzw. Ziff. 4.1.12 Anhang 1 4. BImSchV

Die Genehmigung durch die Ausweisung eines Sondergebietes wird heute schon umgesetzt.

C Genehmigungsvoraussetzungen – Optionen für Sonstige Sondergebiete

2.1

Ausweisung eines Sonstigen Sondergebietes

- ▶ In Betracht für die Festsetzung als Sondergebiet kommen insbesondere Einzelvorhaben (z. B. Sondergebiet Kraftwerk) oder bestimmte Nutzungszusammenhänge (z. B. Sondergebiet Logistikzentrum), also vor allem monostrukturelle Konzentrationen von Nutzungsarten.
- ▶ Für die Zulässigkeit eines Sondergebietes ist unter anderem **erforderlich**, dass dieses **mit den in der Umgebung vorhandenen Nutzungen kompatibel** ist.
- ▶ Weiterhin darf der Bebauungsplan auch **nicht im Widerspruch zu den Festsetzungen** des Flächennutzungsplanes stehen, aus dem Bebauungspläne zu entwickeln sind. Unter Umständen könnte es daher erforderlich sein, auch den Flächennutzungsplan zu ändern.

Rechtliche Beurteilung

- ▶ Die Genehmigung von Elektrolyseuren durch die Ausweisung von Sondergebieten wird bereits heute umgesetzt¹.

Fazit:

- ▶ Nach aktueller Einschätzung erscheint die Ausweisung eines Sondergebietes als erfolgversprechendster Weg zur Genehmigung von Elektrolysen außerhalb von Industriegebieten.

¹ Bebauungsplan der Gemeinde Reußenköge, Bebauungsplan Nr. 17 „Elektrolyseur“

Elektrolysen können u.U. auch als Nebenanlagen zur Versorgung von Gas und Wärme zugelassen werden.

C Genehmigungsvoraussetzungen – Optionen als Nebenanlage zur Versorgung von Gas und Wärme

2.2

Elektrolyse als Nebenanlage für die Baugebiete nach §§ 2 bis 11

- ▶ Nach dem neu geschaffenen **§14 Abs. 4 BauNVO** sind Anlagen zur Herstellung oder Speicherung von Wasserstoff in eigens durch den Bebauungsplan für die Nutzung von Sonnenenergie festgesetzten Sonstigen Sondergebieten nach **§ 11 Abs. 2 (Entwicklung, Erforschung oder Nutzung von erneuerbaren Energien)** zulässig, wenn zusätzlich die anwendbaren Voraussetzungen des **§249 Abs. 4 BauGB** gegeben sind.
- ▶ **§249 Abs. 4 BauGB:**
 - ▶ durch technische Vorkehrungen sichergestellt ist, dass der Wasserstoff ausschließlich aus dem Strom der in Absatz 1, 2 oder 3 genannten Anlage oder **ergänzend** dazu aus dem Strom sonstiger Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien erzeugt wird,
 - ▶ die Größe der Grundfläche der zum Vorhaben gehörenden baulichen Anlagen **100 Quadratmeter** und der Höhenunterschied zwischen der Geländeoberfläche im Mittel und dem höchsten Punkt der baulichen Anlagen 3,5 Meter nicht überschreitet,
 - ▶ die in Absatz 1, 2 oder 3 genannte Anlage oder die sonstigen Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien nach Nummer 1 **nicht bereits mit einem anderen Vorhaben zur Herstellung oder Speicherung von Wasserstoff verbunden sind und**
 - ▶ die Kapazität des Wasserstoffspeichers, die in der Spalte 4 zu der Zeile 2.44 der Stoffliste in Anhang I der Störfall-Verordnung genannte **Mengenschwelle für Wasserstoff nicht erreicht.**

Rechtliche Beurteilung

- ▶ §14 Abs. 4 adressiert explizite Sonstige Sondergebiete zur Erforschung, Erprobung und Nutzung von Sonnenenergie. Mutmaßlich ist mit diesem Paragraphen gewollt, dass an PV-Freiflächenanlagen nach §11 BauNVO auch Elektrolysen ohne weitere Aufwände genehmigungsfähig sind.

Fazit:

- ▶ In Sonderfällen können PV-Freiflächenanlagen günstige Standorte für Elektrolyse-Anlagen sein.
- ▶ An diesen Standorten können neben dem Strom aus den PV-Anlagen auch sonstige EE-Anlagen angeschlossen werden, sofern **technisch sichergestellt** ist, dass Wasserstoff nur aus Strom eben dieser Anlagen erzeugt wird.

Elektrolysen können u.U. auch als Nebenanlagen zur Versorgung von Gas und Wärme zugelassen werden.

C Genehmigungsvoraussetzungen – Bewertungsschema

Bewertungsschema:

Für die Bewertung der Standorte hinsichtlich des Genehmigungspotenzials wird auf eine beispielhafte Konfiguration verzichtet. Je nach Konfiguration, bspw. bei der Größe des Speichers, unterscheiden sich die anzuwendenden gesetzlichen Bauvorschriften. Daher wird untersucht, welche Standorte die grundsätzlichen Genehmigungsrelevanten Vorgaben für eine Elektrolyse (inkl. Speicher) erfüllen.

Gut	Der potenzielle Standort erfüllt die Voraussetzungen für die Errichtung einer Elektrolyse (inkl. Speicher) mit hoher Wahrscheinlichkeit.
Mittel	Der potenzielle Standort erfüllt die Voraussetzungen für die Errichtung einer Elektrolyse (inkl. Speicher) unter bestimmten Bedingungen.
Wenig	Der potenzielle Standort erfüllt die Voraussetzungen für die Errichtung einer Elektrolyse (inkl. Speicher) unter keinen Umständen.

*| Auslastung Elektrolyse: 5.000 VLS

Elektrolyseure müssen mindestens an das Mittelspannungsnetz angeschlossen werden.

D Potenzial zum Anschluss der Elektrolyse an einen Mittelspannungsanschluss

- Elektrolyse-Anlagen benötigen für die Aufspaltung des Wasserstoffs elektrische Energie. Der Strom muss mindestens über ein Mittelspannungsnetz bereitgestellt werden, das in Deutschland üblicherweise eine Spannung von ca. 10 bis 30 kV aufweist.
- Dementsprechend ist zu prüfen, ob:
 - a. An dem potenziellen Standort bereits ein Mittelspannungsanschluss verfügbar ist oder
 - b. An dem potenziellen Standort die Möglichkeit zur Installation eines Mittelspannungsanschlusses besteht.

Bewertungsschema:

Für die Bewertung der Standorte ist zu prüfen, ob ein geeigneter Mittelspannungsanschluss verfügbar oder nutzbar ist oder nachgerüstet werden kann.

Gut	Ein Mittelspannungsanschluss ist vorhanden und nutzbar.
Mittel	Ein Mittelspannungsanschluss ist nicht vorhanden bzw. nicht nutzbar, eine Nachrüstung ist möglich.
Wenig	Ein Mittelspannungsanschluss ist nicht vorhanden bzw. nicht nutzbar, eine Nachrüstung ist nicht möglich.

<https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/oekostrom/stromnetz>

Beispiel einer Anschlussleistung von 11 kV für einen Elektrolyseur von ITM Power mit einer elektrischen Leistung von 2 MW_{el}. <https://itm-power.com/products/hgas3sp>.

Durch die Nähe zu Autobahnen bzw. Bundesstraßen kann der Wasserstoff schnell verteilt werden.

E Potenzial zur H₂-Abgabe an Trailer (Straßenanbindung)

- Die Verteilung des Wasserstoffs über die Straße ist notwendig, um Wasserstofftankstellen zu versorgen. Zudem kann es in der Hochlaufphase eine Option für die Versorgung von (kleinen) Industrien sein, die noch keinen Anschluss an eine Wasserstoffpipeline haben.
- Für die Eignung eines Elektrolyse-Standorts sollte daher aus zwei Gründen die **Nähe zu Autobahnen und Bundesstraßen** untersucht werden:
 - a. Effizienter Abtransport für schnelle Verteilung.
 - b. Vermeidung von zusätzlichem Lkw-Aufkommen bzw. -Staus in städtischen Gebieten.

Bewertungsschema:

Für die Bewertung der Standorte wird die Nähe zu Autobahnen/Bundesstraßen untersucht.

Gut	Der potenzielle Standort liegt in unmittelbarer Nähe zur Straßeninfrastruktur. Eine Anbindung ist baulich möglich.
Mittel	Der potenzielle Standort liegt in unmittelbarer Nähe zur Straßeninfrastruktur. Eine Anbindung ist baulich nur schwer möglich.
Wenig	Der potenzielle Standort liegt nicht in unmittelbarer Nähe zur Straßeninfrastruktur.

Darstellung BBHC

Die potenziellen Erzeugungsstandorte werden anhand der definierten Kriterien bewertet.

Zusammenfassung des Anforderungskatalogs

	A Flächen- verfügbarkeit Gut Mittel Wenig	B Wasser- verfügbarkeit Gut Mittel Wenig	C Genehmigungs- fähigkeit Gut Mittel Wenig	D Stromanschluss- potenzial Gut Mittel Wenig	E Potenzial Straßen- Anbindung Gut Mittel Wenig
Stubbenkoppel	Gut	Gut	Wenig	Gut	Gut
Kronsh. Weg	Gut	Gut	Wenig	Gut	Gut
Borgstedt	Gut	Gut	Wenig	Gut	Gut

Vielen Dank!



Autor Vorname Nachname



HyExperts KielRegion Gewerbegebiet Wasserstofftool

Inputs und Handhabungshinweise



Zielsetzung

Was soll nach Lesen dieser Handhabung klar sein?

1. Was kann das Tool und was nicht?
2. Wie ist das Tool aufgebaut?
3. Welche Inputs sind erforderlich?
4. Welche Ergebnisse kann das Tool ausgeben?

Was kann das Tool und was nicht?

Was soll das Tool leisten und/oder explizit NICHT leisten?

1. „[Ziel ist] ein Excel basiertes Tool zu entwickeln, mit dem der Wasserstoffbedarf in Verkehr und Wärme für Gewerbegebiete als auch die entsprechende Elektrolysekapazität berechnen werden kann. Dies könnte für neue Gewerbegebiete in der ganzen Kiel Region den Wirtschaftsförderungen und Kommunen als Grundlage für prinzipielle Szenarien-Analysen dienen und etwaige Diskussionen mit Zahlen unterlegen.“
 - Wasserstoffbedarf neuer Gewerbegebiete für Verkehr und Wärmeversorgung
 - Notwendige Elektrolysekapazität zur Bereitstellung
 - Keine Betrachtung von Stromversorgung der Unternehmen

Wie ist das Tool aufgebaut?

Welche Berechnungen/Blätter werden angelegt?

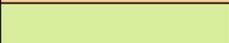
1. Die Arbeitsblätter führen in chronologischer Reihenfolge durch das Tool.
2. Durch die Benutzung der Buttons „Weiter“ und „Zurück“ am oberen Bildschirmrand, kann zwischen den Arbeitsblättern gewechselt werden.



Abbildung 1: Darstellung der angelegten Arbeitsblätter des Gewerbetools (eigene Darstellung)

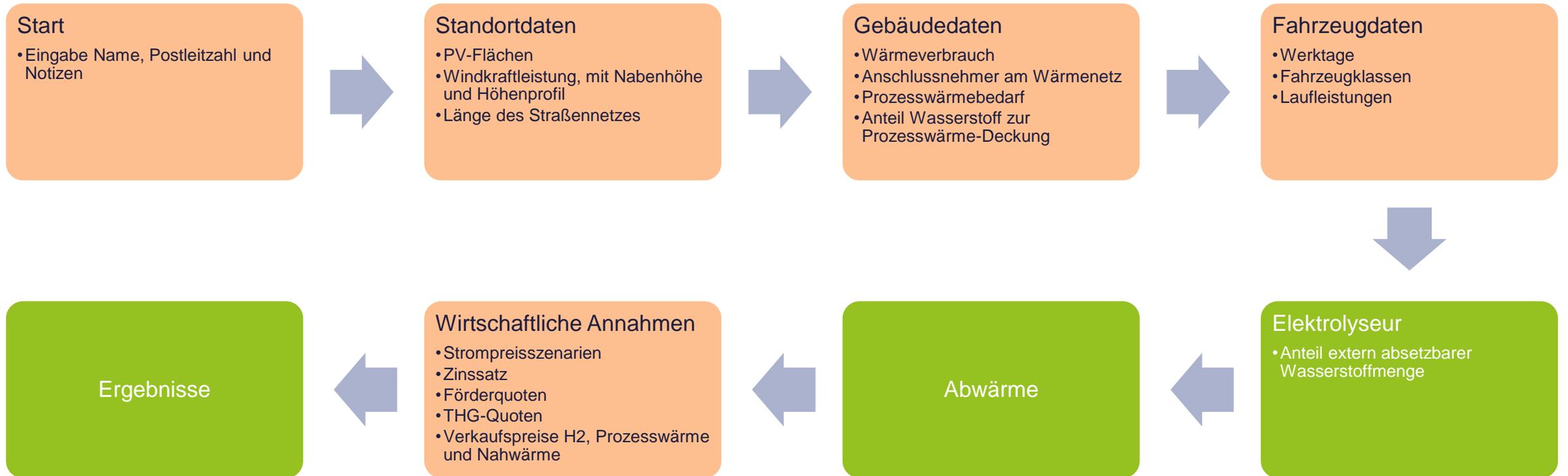
Welche Inputs sind erforderlich?

- Das Tool verlangt vom Benutzer einige Eingaben oder eine Auswahl, um die Ergebnisse zu berechnen.
- Generell gilt:
 - ▶ Orange hinterlegte Felder erfordern eine Auswahl oder Eingabe.
 - ▶ Grüne Felder kennzeichnen berechnete Ergebnisse oder Festlegungen.

Legende	
	Eingabe erforderlich
	Berechnung

- Besonders auf den Blättern zu „Standort“- , „Gebäude“- und „Fahrzeugdaten“ sind genaue Angaben notwendig
 - ▶ Etwa für die installierte Leistung von EE-Anlagen, Wärmeverbräuchen und Laufleistungen des Fuhrparks
- Die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sind auf einem separaten Blatt zusammengefasst
 - ▶ Diese umfassen auch Förderungen und die deutsche THG-Quote

Welche Inputs sind erforderlich?



Welche Ergebnisse kann das Tool ausgeben?

- Das Tool gibt die berechneten Ergebnisse in Form eines Dashboards aus.
- Auf dem Dashboard sind relevante Kennzahlen visuell und numerisch dargestellt.
 - ▶ Bspw. CAPEX, OPEX, Verkaufspreise und erzielte Erlöse
- Für eine schnelle Orientierung ist die „Wirtschaftlichkeitsampel“ eingebaut
 - ▶ Je nach ROI des Projekts verfärbt diese sich in den Ampelfarben und signalisiert die Güte des Vorhabens
 - $ROI > \text{Zinssatz}$
 - $ROI \approx \text{Zinssatz}$
 - $ROI < \text{Zinssatz}$

Ergebnis-Dashboard

Was gibt das Tool aus?



Vielen Dank!

HyExperts KielRegion Standortanalyse Wasserstofftankstellen

Übersicht der Ergebnissteckbriefe



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr



KielRegion

Vorgehensweise

Analyse von Wasserstofftankstellenstandorten in der Kiel Region

- **Methodischer Ansatz:** GIS-Auswertung und Bewertungsmatrix
 - Keine Berücksichtigung angebotsseitiger und infrastruktureller Faktoren
- **Ergebnis der Analyse**
 - Liste von Standort-Steckbriefen mit Nachfragepotenzialbewertung
 - Ziel: Filterung zukünftiger Wasserstofftankstellenstandorte in der Region

Vorgehensweise

Analyse von Wasserstoff-Tankstellenstandorten in der Kiel Region

- **Schritt 1: Identifizierung von potenziellen Standorten**
 - Basis >800 gewerbliche Bauflächen und Sonderbauflächen
 - Filterung und Kategorisierung der Flächen nach Vorhandensein von Logistikniederlassungen
 - Identifikation von 42 Suchräumen
- **Schritt 2: Kartierung von Logistikniederlassungen**
 - Unterscheidung zwischen kleinen, mittleren und großen Niederlassungen
- **Schritt 3: Analyse der Verkehrsanbindung**
 - Nutzung georeferenziertes Straßennetz
 - Kategorisierung von Straßenknotenpunkten: klein, mittel, groß
- **Schritt 4: Analyse der Schwerverkehrsdaten**
 - Nutzung Verkehrsdatenmodell der KielRegion
 - Berücksichtigung des Transitverkehrs an großen Bundesautobahnen

Vorgehensweise

Analyse von Wasserstoff-Tankstellenstandorten in der Kiel Region

➤ Schritt 5: Bewertung und Normierung der Suchräume

- Scores für jeden Parameter (Logistik, Knotenpunkte, Verkehrsmenge)
- Normierung basierend auf dem Maximum

➤ Schritt 6: Gesamtbewertung der Suchräume

- Berechnung eines Gesamtscores unter Verwendung von Gewichtungsfaktoren:
 - Logistkniederlassungen (0,6)
 - Verkehrsknoten (0,2)
 - Verkehrsmenge (0,2)

➤ Fazit

- *Filterung von Wasserstofftankstellenstandorten basierend auf dem Bedarf von Niederlassungen in der direkten Umgebung.*

Platz 1 – Kiel Wellsee

72/100 Gesamtpunkten

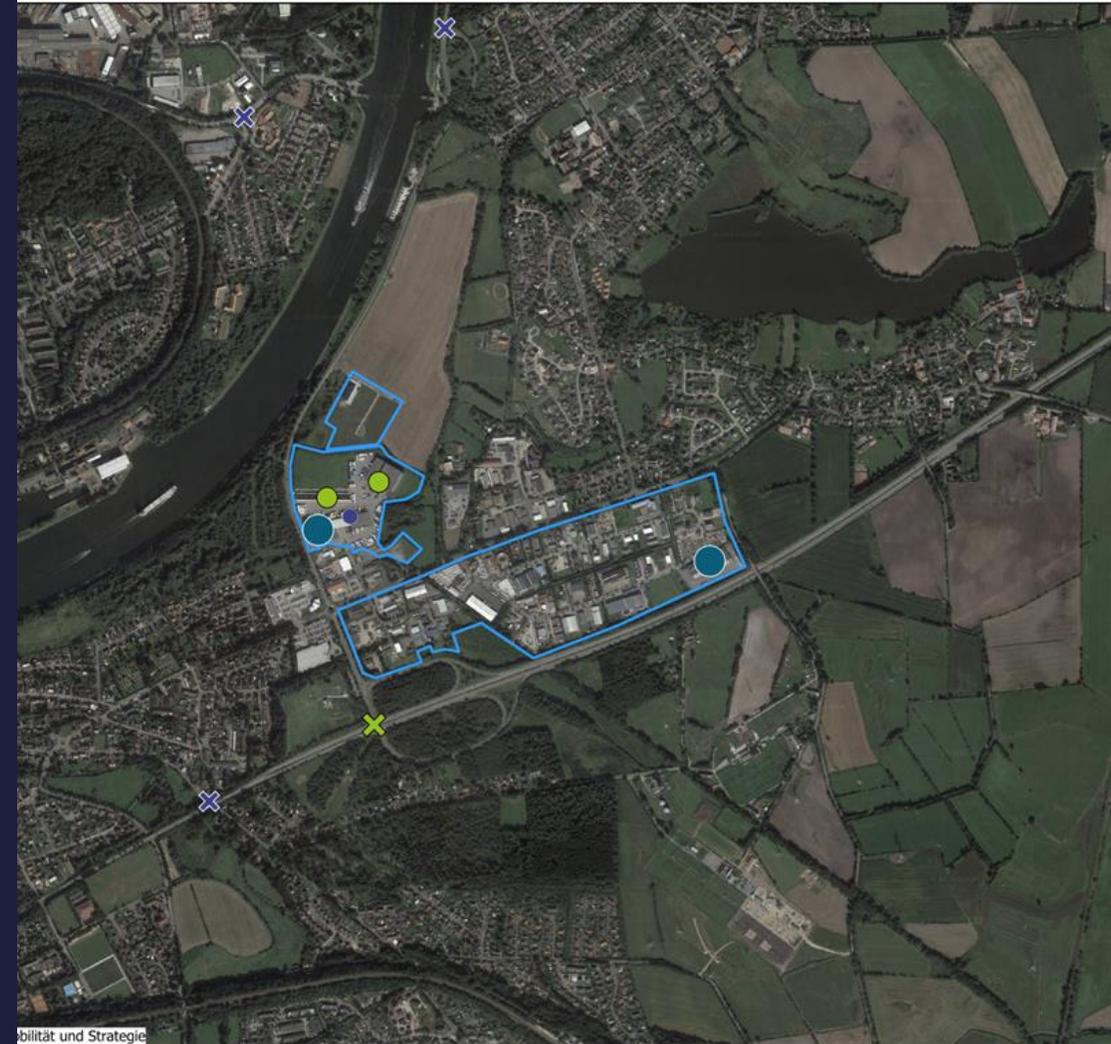
- Größtes Gewerbegebiet (Kiel Region)
- Hohe Dichte an Logistikgewerbe
 - ▶ Alleinstellungsmerkmal ggü. anderen Suchräumen
- Geeignete Verkehrsanbindung (B404)
- Hohes Verkehrsaufkommen
- Wasserstofftankstelle bereits in Umsetzung (HyKiel)



Platz 2 – Rendsburg Österrönfeld Ost

49/100 Gesamtpunkten

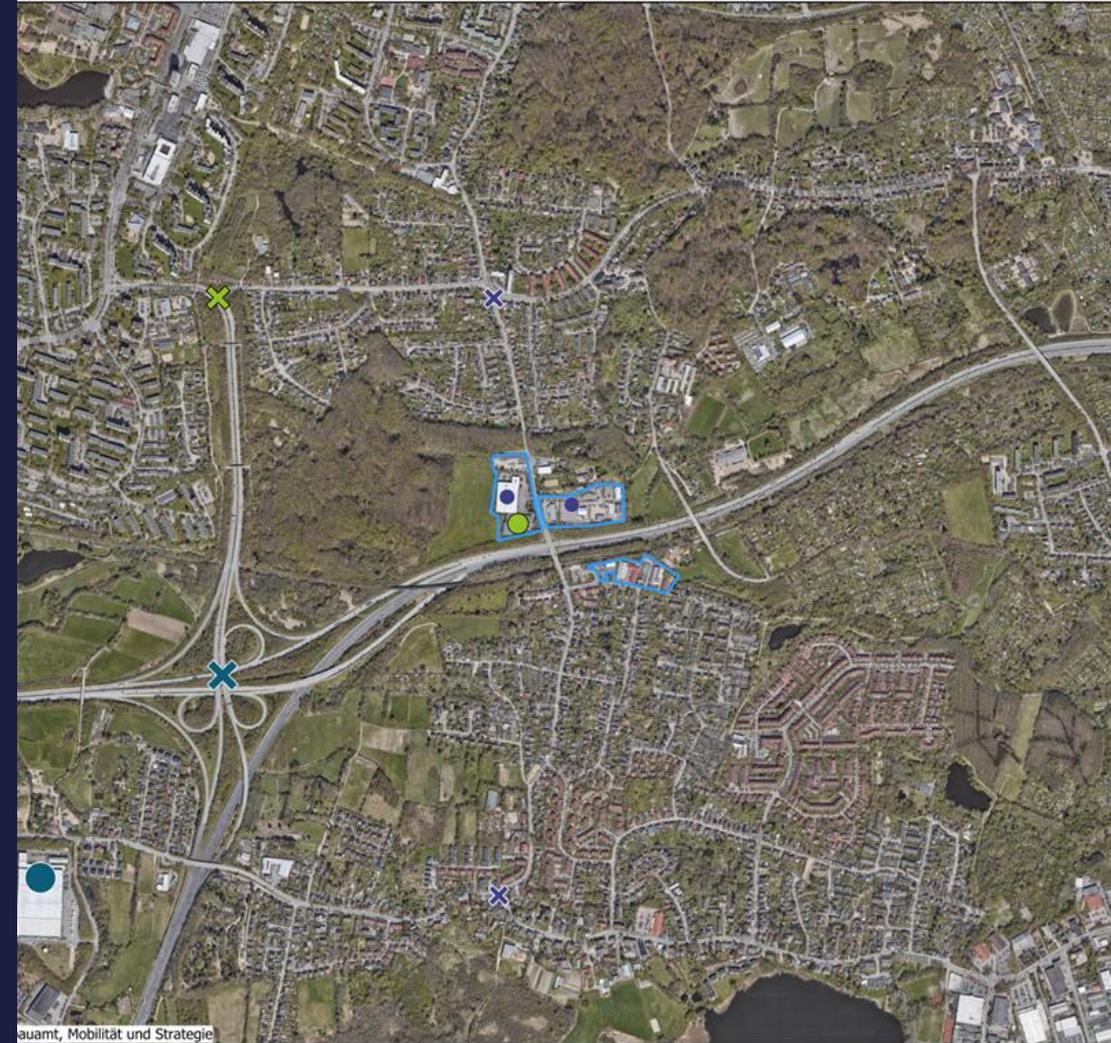
- Mittelgroßes Gewerbegebiet
- Hohe Gewerbedichte
 - ▶ u.a. Hermes
- Gute Verkehrsanbindung (A210)
- Hohes Verkehrsaufkommen
 - ▶ Nahegelegenes Autobahnkreuz



Platz 3 – Kiel Russer Weg

49/100 Gesamtpunkten

- Kleines Gebiet
- Geringe Anzahl Logistkniederlassungen
 - ▶ u.a. NewYorker
- Sehr gute Verkehrsanbindung (A210 & A215)
- Hohes Verkehrsaufkommen



Honorable Mention - Borgstedtfelde

35/100 Gesamtpunkten

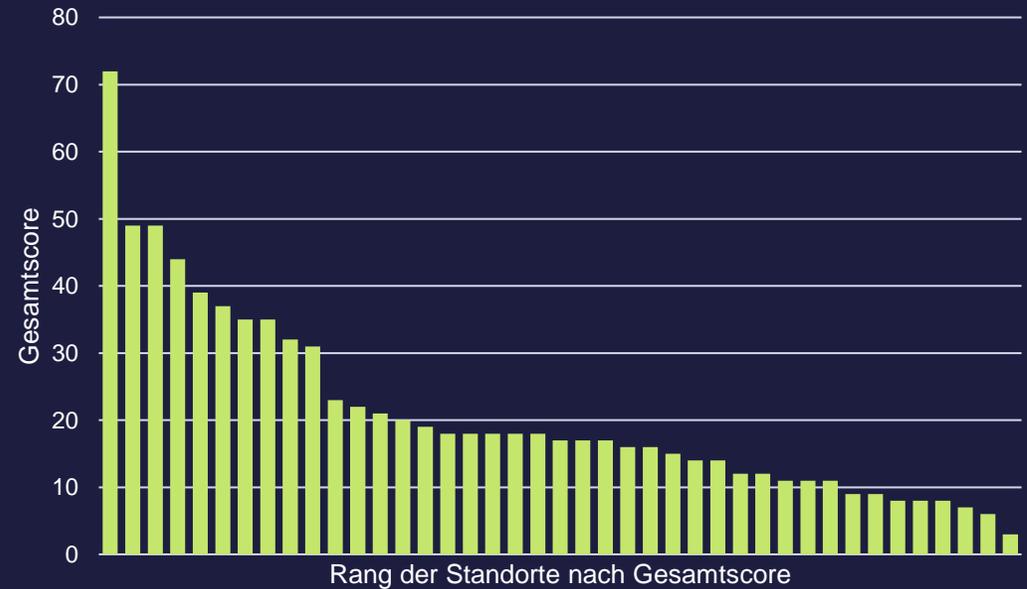
- Kleines Gebiet
 - ▶ Weiterentwicklungspotenzial im Vergleich zu Top 3
- Sehr geringe Anzahl Logistikniederlassungen
 - ▶ Schwerpunkt: Amazon Verteilzentrum
- Sehr gute Verkehrsanbindung (A7)
- Hohes Verkehrsaufkommen
 - ▶ Transitverkehr durch A7



Erläuterung Bewertungsergebnisse

Gesamtpunktzahlverlauf der Suchräume

- Punktzahl stark abhängig von Anzahl/Größe Logistikniederlassungen
- Geringes lokales Nachfragepotenzial bei Standorten mit geringer Gesamtpunktzahl
- Standorte mit geringer Gesamtpunktzahl häufig in ländlichen Gebieten
 - Geringeres Verkehrsaufkommen
 - Kleinere Niederlassungen
 - Schlechtere Verkehrsanbindungen



Übersicht der Ergebnissteckbriefe

(sortiert nach Gesamtscore)

1. Wellsee
2. Österrönfeld Ost
3. Russer Weg
4. Ihlberg
5. Schmalenbrook
6. Schwentintental
7. Borgstedtfelde
8. Wittland
9. Rotenhof
10. Rendsburg Süd
11. Eisendorf
12. Hohenweststedt Zentrum
13. Suchsdorf
14. Büdelsdorf
15. Friedrichsort
16. Ostuferhafen
17. Wankendorf
18. Rendsburg Nordwest
19. Rendsburg Südwest
20. Nortorf Süd
21. Preetzer Chaussee
22. Hohenweststedt Süd
23. Am Dolmen
24. Preetz Nord
25. Hohenweststedt Nord
26. Eckernförde Süd
27. Grasholz
28. Böken
29. Nortorf Nord
30. Schönberger Straße
31. Hamburger Chaussee
32. Osdorf Süd

Wellsee – Kiel



©Landeshauptstadt Kiel Tiefbauamt, Mobilität und Strategie

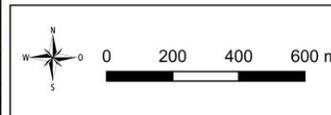
HRS Screening
Wellsee



Legende
Suchräume
Verkehrsknotenpunkt
X Klein
X Mittel
X Groß
Niederlassung Logistikunternehmen
● Klein
● Mittel
● Groß
Hintergrund: Google Satellite

Bewertungsergebnis
Score Logistikniederlassung: 100 von 100
Score Knotenpunkte: 14 von 100
Score Verkehrsmenge: 46 von 100
Gesamtscore: 72 von 100

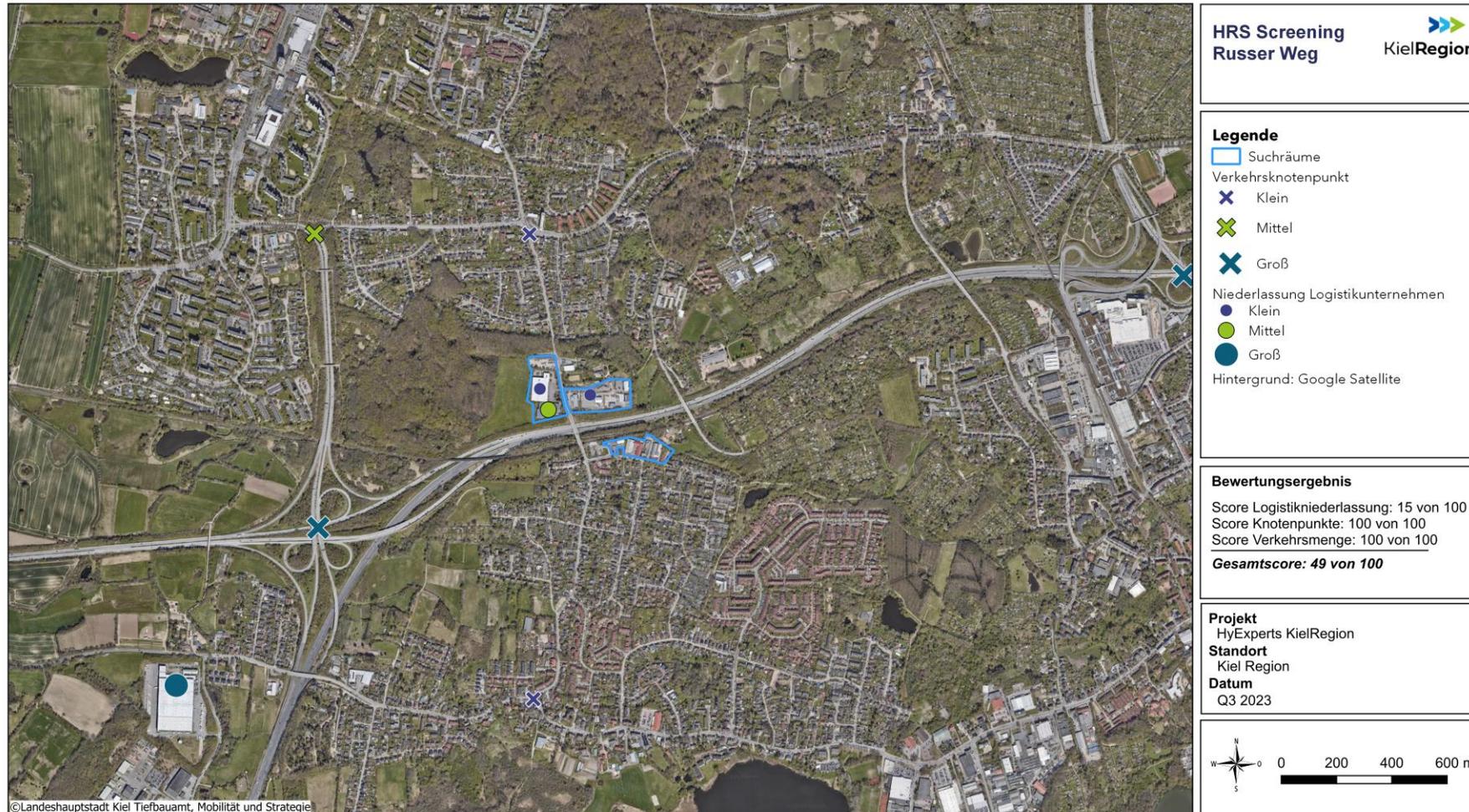
Projekt
HyExperts KielRegion
Standort
Kiel Region
Datum
Q3 2023



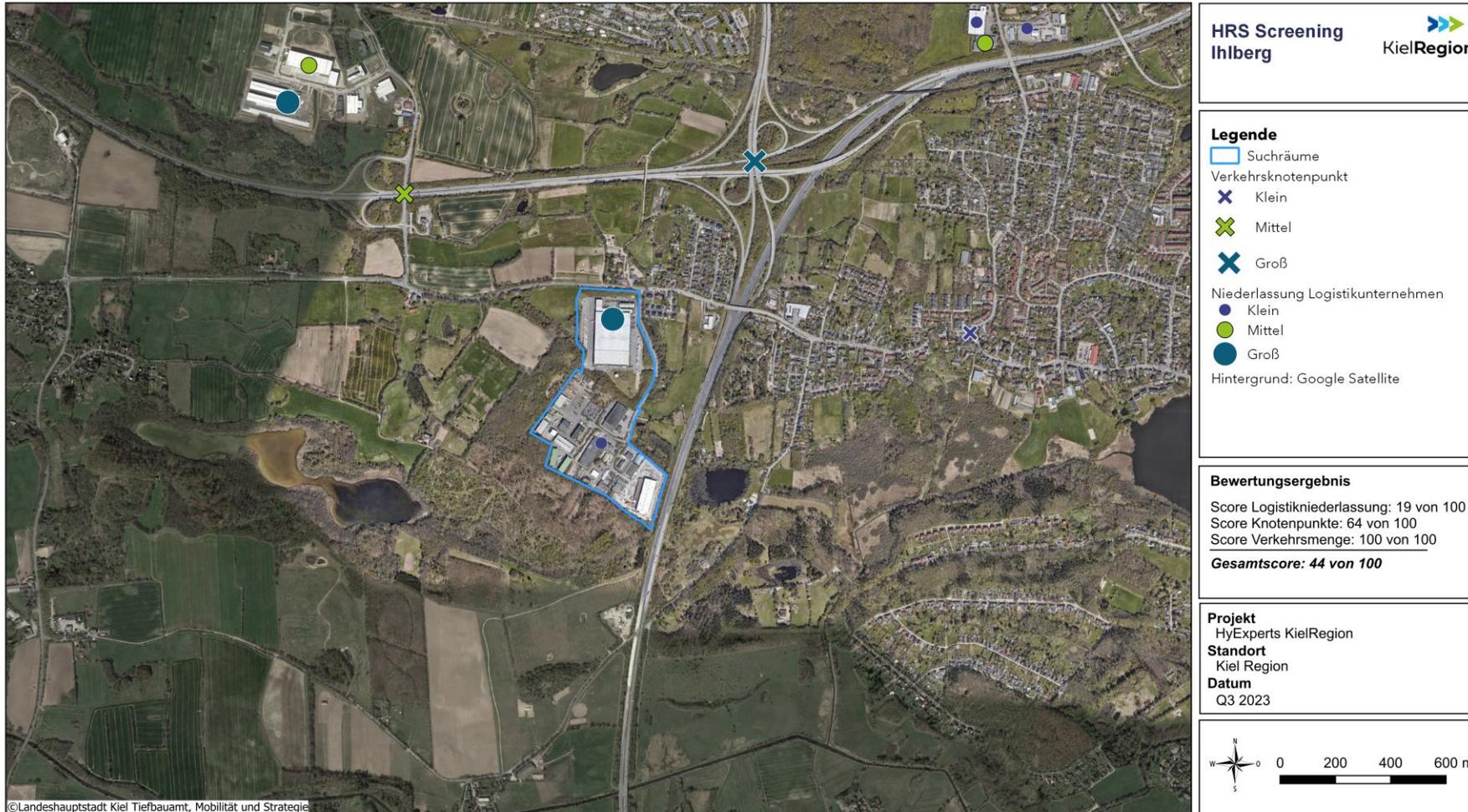
Österrönfeld Ost – Rendsburg



Russer Weg – Kiel



Ihlberg – Kiel



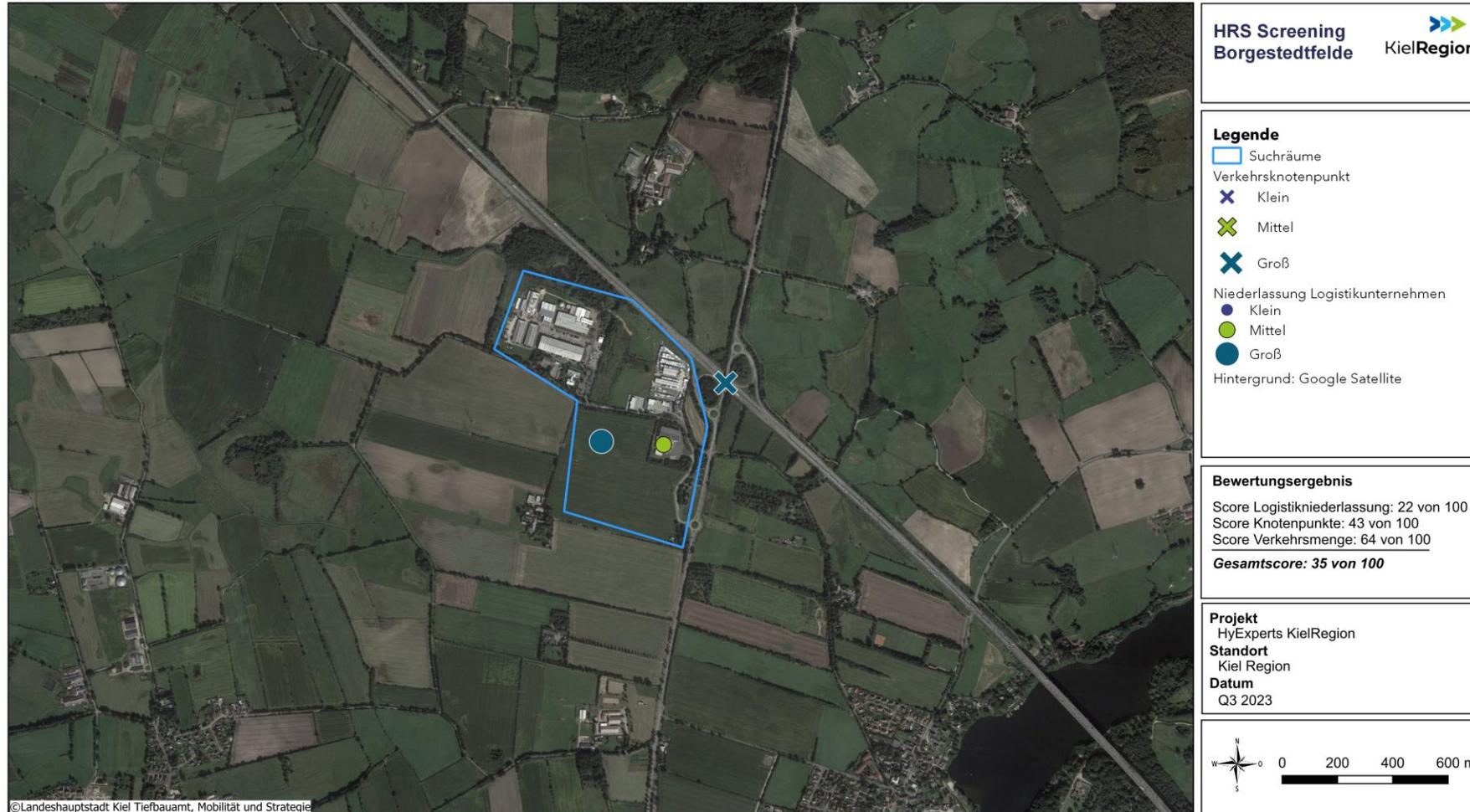
Schmalenbrook – Neumünster



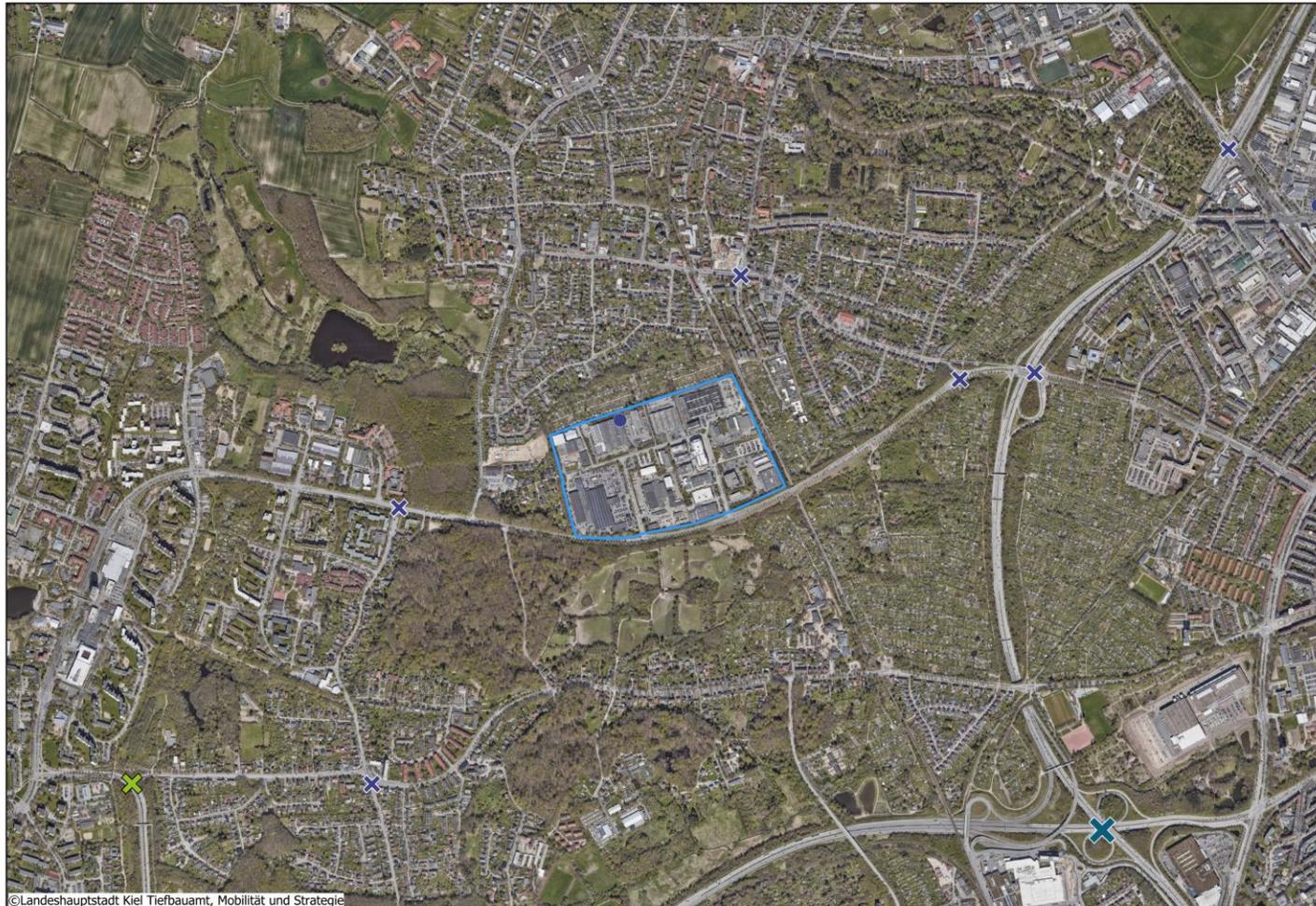
Schwentinental – Kiel



Borgstedtfelde – Rendsburg



Wittland – Kiel



©Landeshauptstadt Kiel Tiefbauamt, Mobilität und Strategie

HRS Screening
Wittland



Legende

- Suchräume
- Verkehrsknotenpunkt
 - Klein
 - Mittel
 - Groß
- Niederlassung Logistikunternehmen
 - Klein
 - Mittel
 - Groß
- Hintergrund: Google Satellite

Bewertungsergebnis

Score Logistkniederlassung: 4 von 100
Score Knotenpunkte: 71 von 100
Score Verkehrsmenge: 93 von 100

Gesamtscore: 35 von 100

Projekt

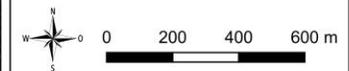
HyExperts KielRegion

Standort

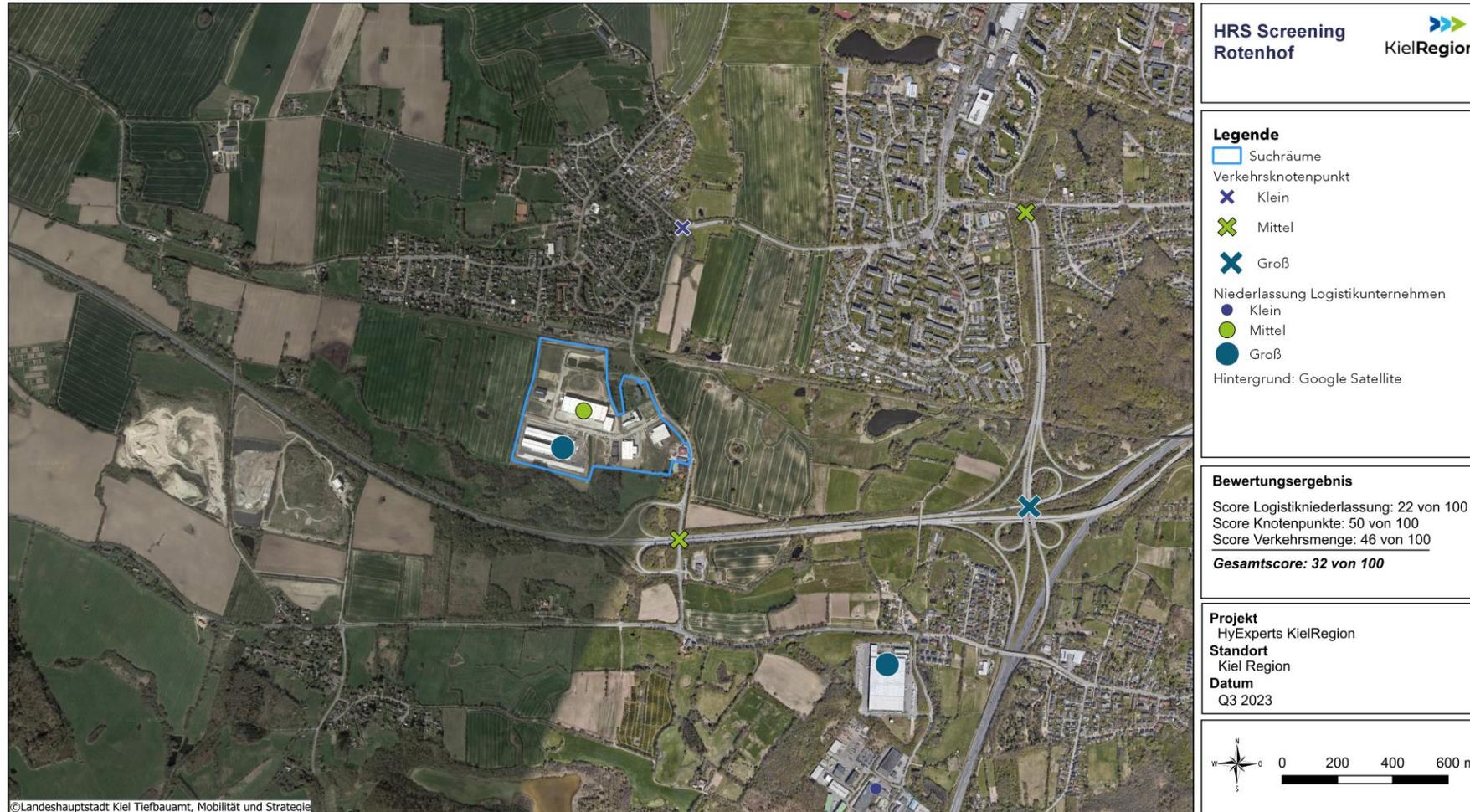
Kiel Region

Datum

Q3 2023



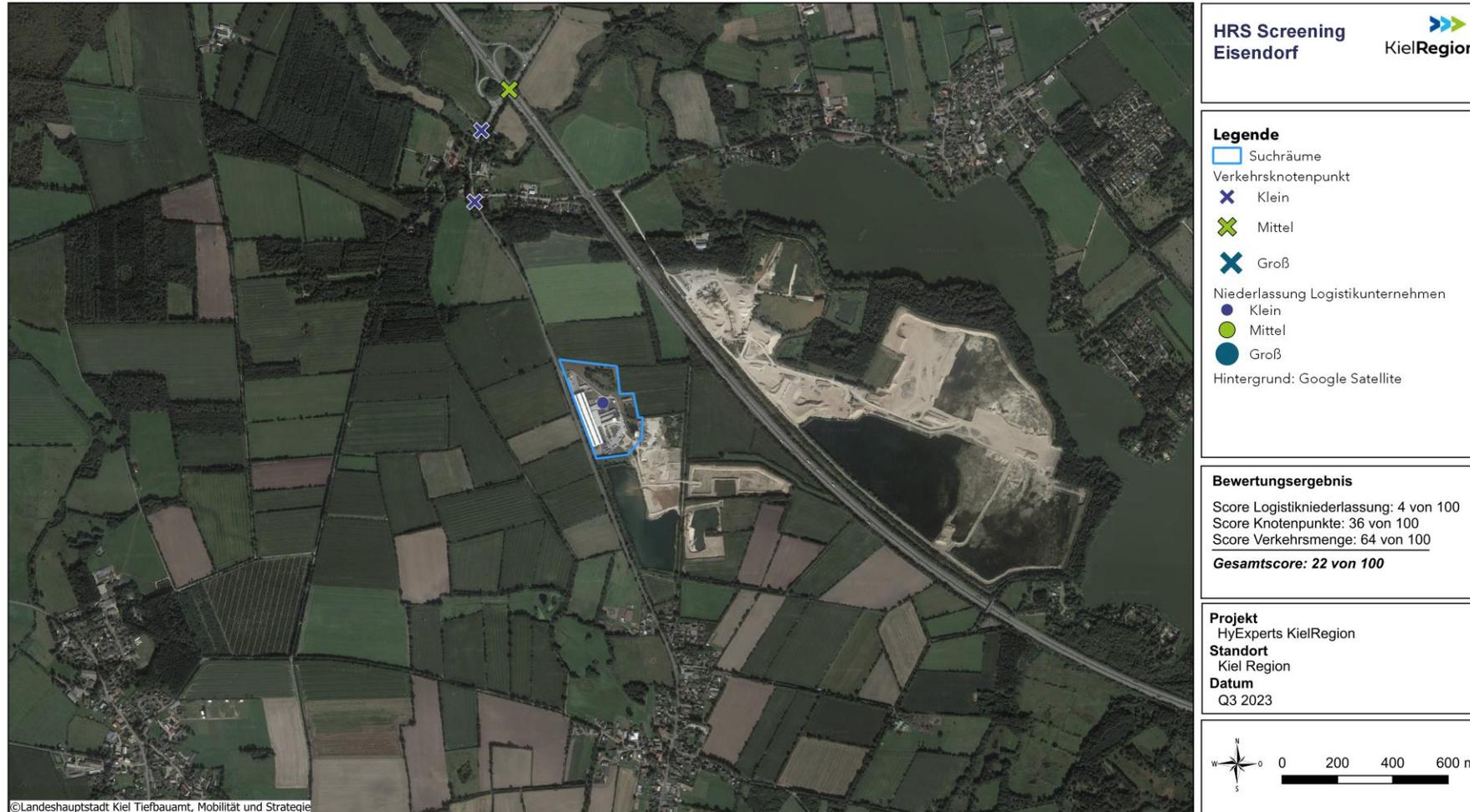
Rotenhof – Kiel



Rendsburg Süd – Rendsburg



Eisendorf – Nortorf



Hohenweststedt Zentrum – Hohenweststedt



Suchsdorf – Kiel



©Landeshauptstadt Kiel Tiefbauamt, Mobilität und Strategie

HRS Screening
Suchsdorf

 KielRegion

Legende

Suchräume
Verkehrsknotenpunkt

- Klein
- Mittel
- Groß

Niederlassung Logistikunternehmen

- Klein
- Mittel
- Groß

Hintergrund: Google Satellite

Bewertungsergebnis

Score Logistikniederlassung: 15 von 100
Score Knotenpunkte: 14 von 100
Score Verkehrsmenge: 36 von 100

Gesamtscore: 19 von 100

Projekt
HyExperts KielRegion

Standort
Kiel Region

Datum
Q3 2023

 0 200 400 600 m

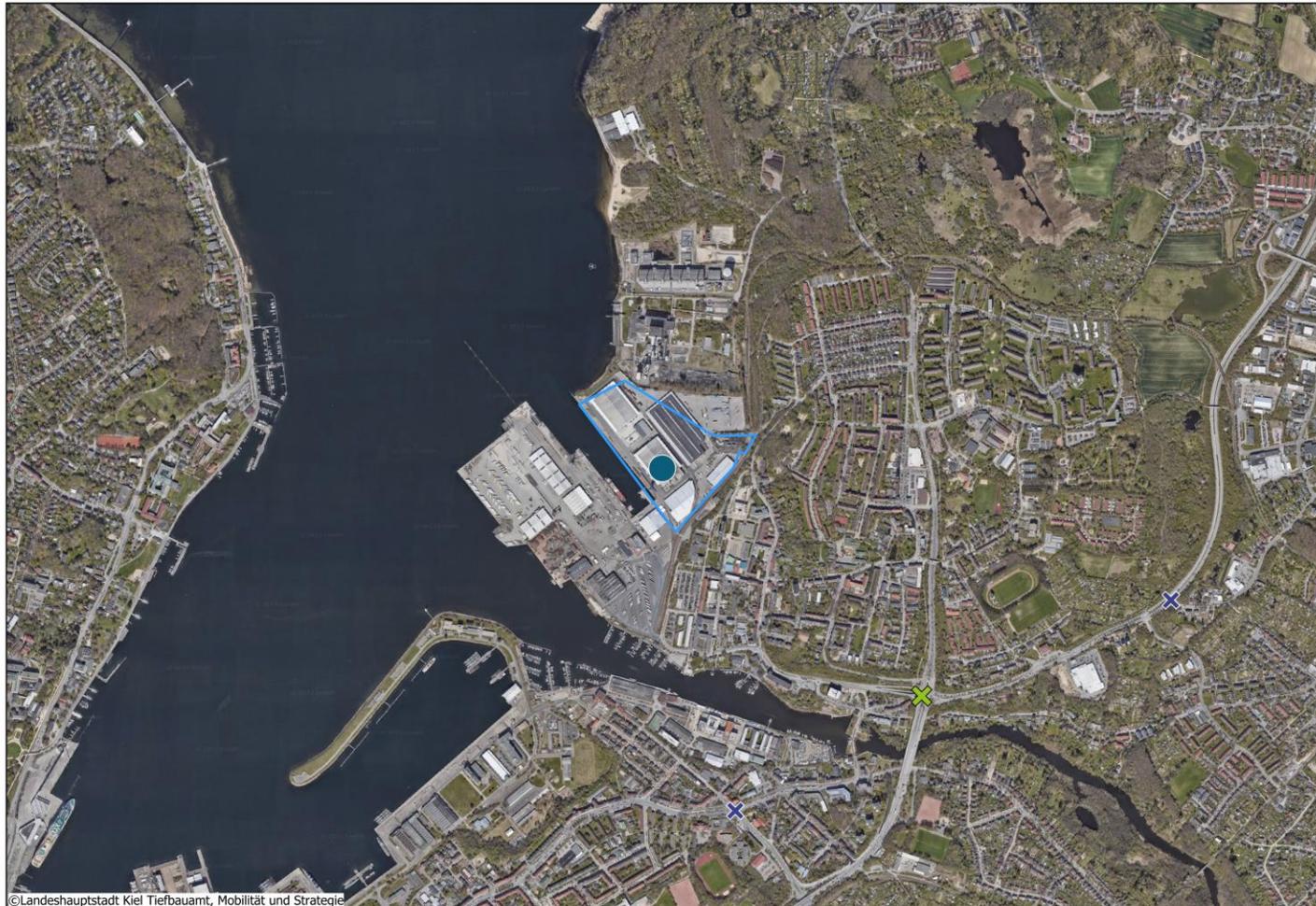
Büdelndorf – Rendsburg



Friedrichsort – Kiel



Ostufershafen – Kiel



©Landeshauptstadt Kiel Tiefbauamt, Mobilität und Strategie

HRS Screening
Ostufershafen



Legende

- Suchräume
- Verkehrsknotenpunkt
 - Klein
 - Mittel
 - Groß
- Niederlassung Logistikunternehmen
 - Klein
 - Mittel
 - Groß
- Hintergrund: Google Satellite

Bewertungsergebnis

Score Logistkniederlassung: 15 von 100
Score Knotenpunkte: 29 von 100
Score Verkehrsmenge: 18 von 100

Gesamtscore: 18 von 100

Projekt

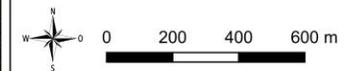
HyExperts KielRegion

Standort

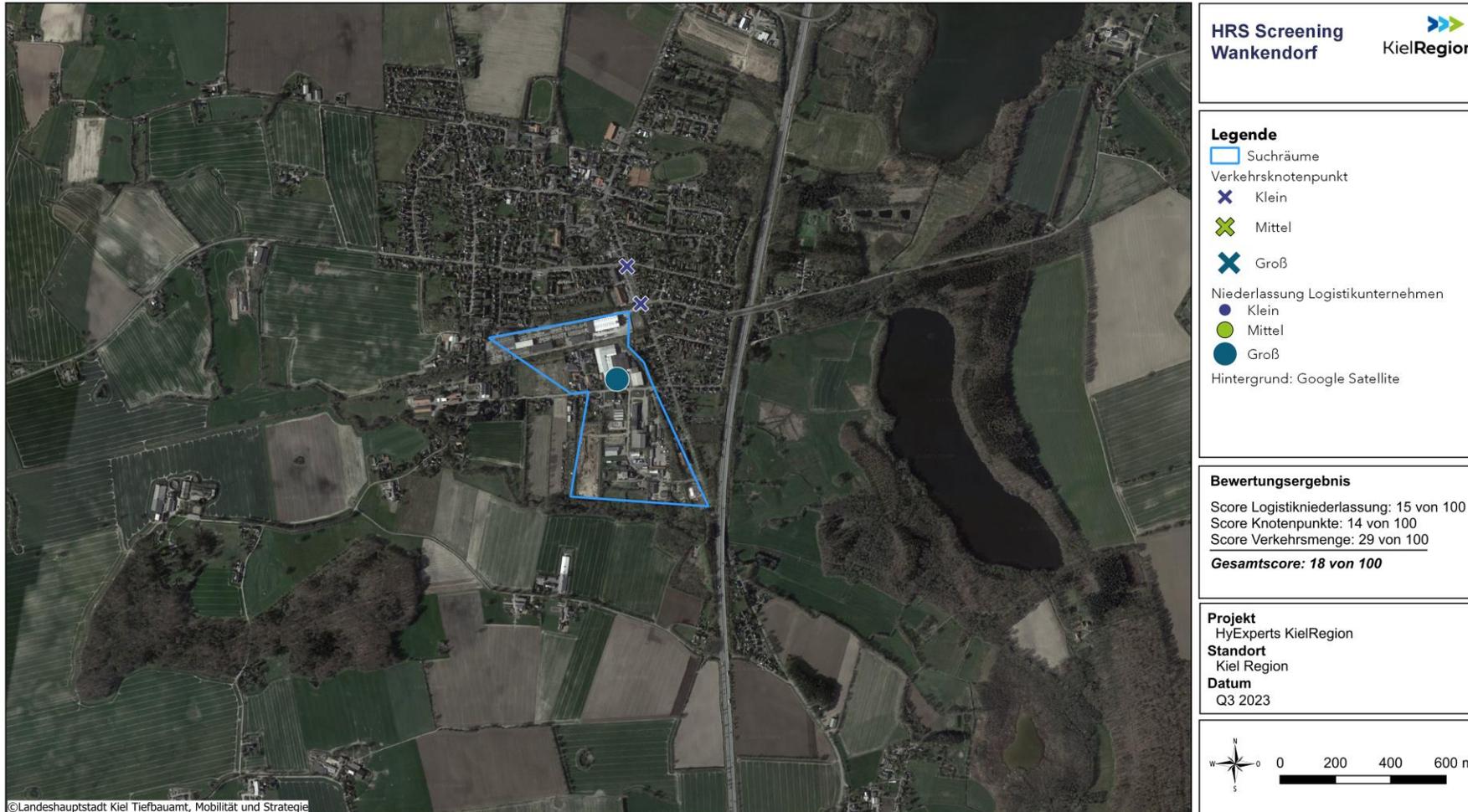
Kiel Region

Datum

Q3 2023



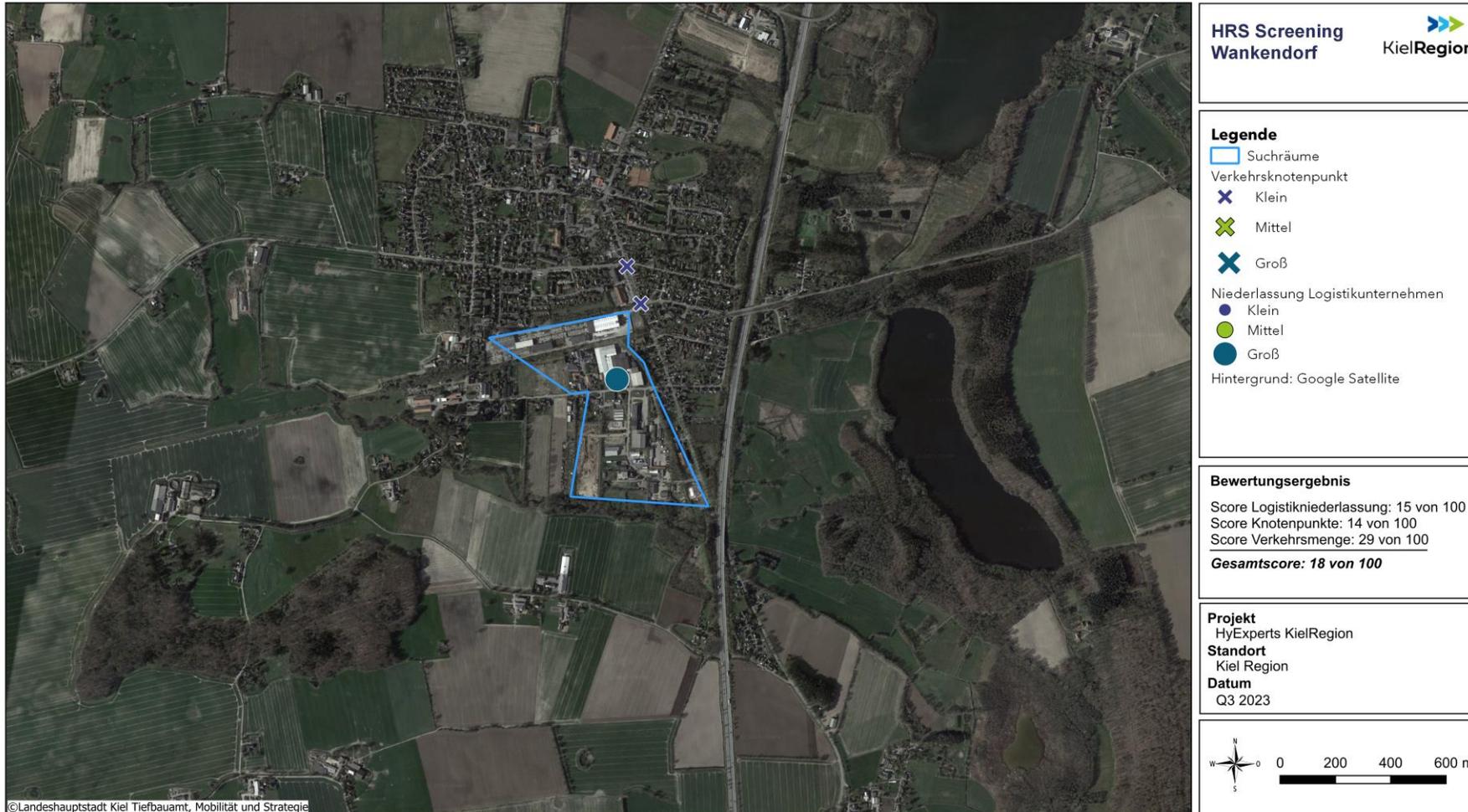
Wankendorf – Kiel



Fockbek – Rendsburg



Wankendorf – Wankendorf



Rendsburg Nordwest – Rendsburg



Nortorf Süd – Nortorf



Preetzer Chaussee – Kiel



Hohenweststedt Süd – Hohenweststedt



Am Dolmen – Rendsburg



©Landeshauptstadt Kiel Tiefbauamt, Mobilität und Strategie

HRS Screening
Am Dolmen



Legende

- Suchräume
 - Verkehrsknotenpunkt
 - Klein
 - Mittel
 - Groß
 - Niederlassung Logistikunternehmen
 - Klein
 - Mittel
 - Groß
- Hintergrund: Google Satellite

Bewertungsergebnis

Score Logistikniederlassung: 11 von 100
Score Knotenpunkte: 29 von 100
Score Verkehrsmenge: 11 von 100

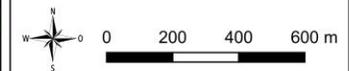
Gesamtscore: 15 von 100

Projekt

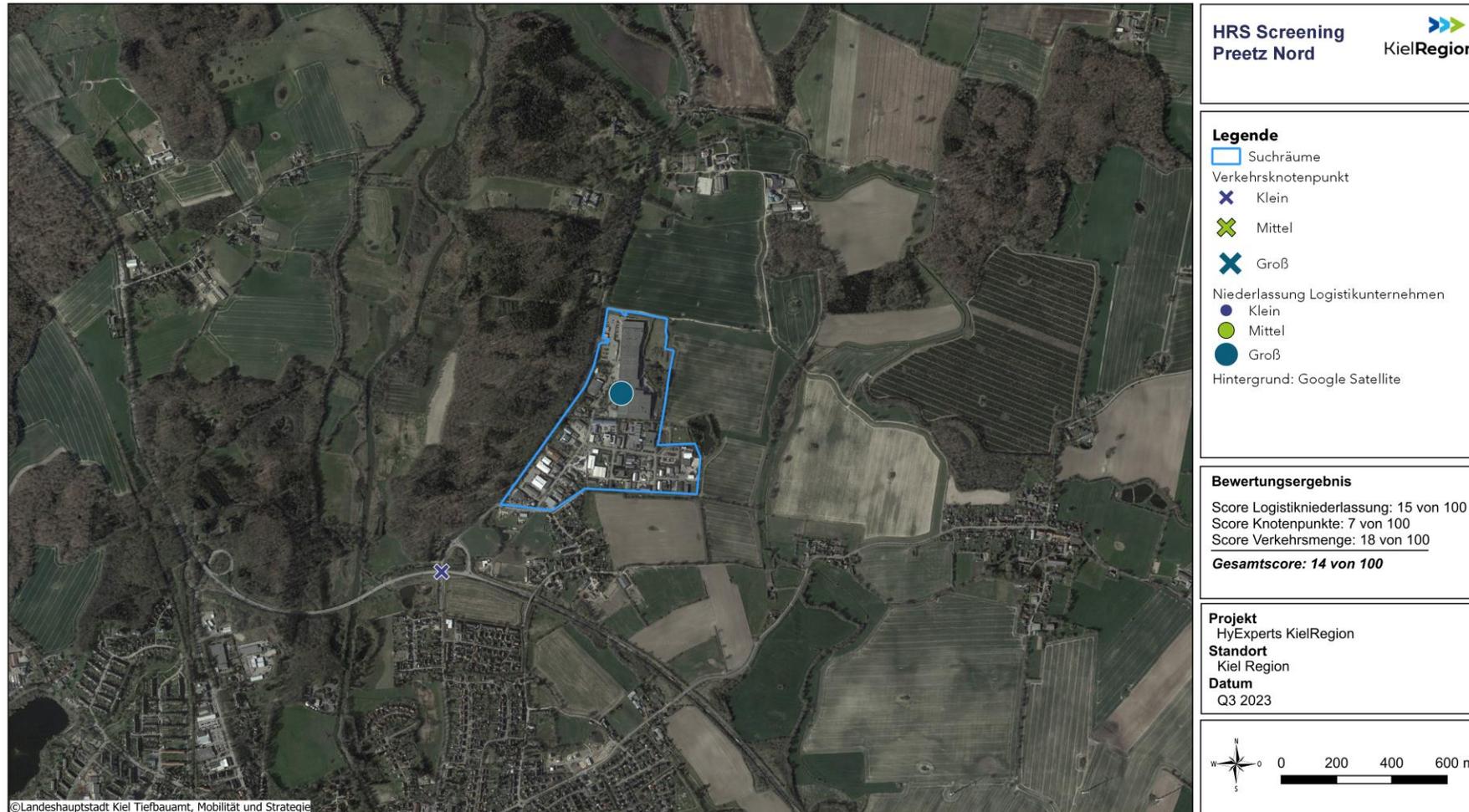
HyExperts KielRegion

Standort
Kiel Region

Datum
Q3 2023



Preetz Nord – Preetz



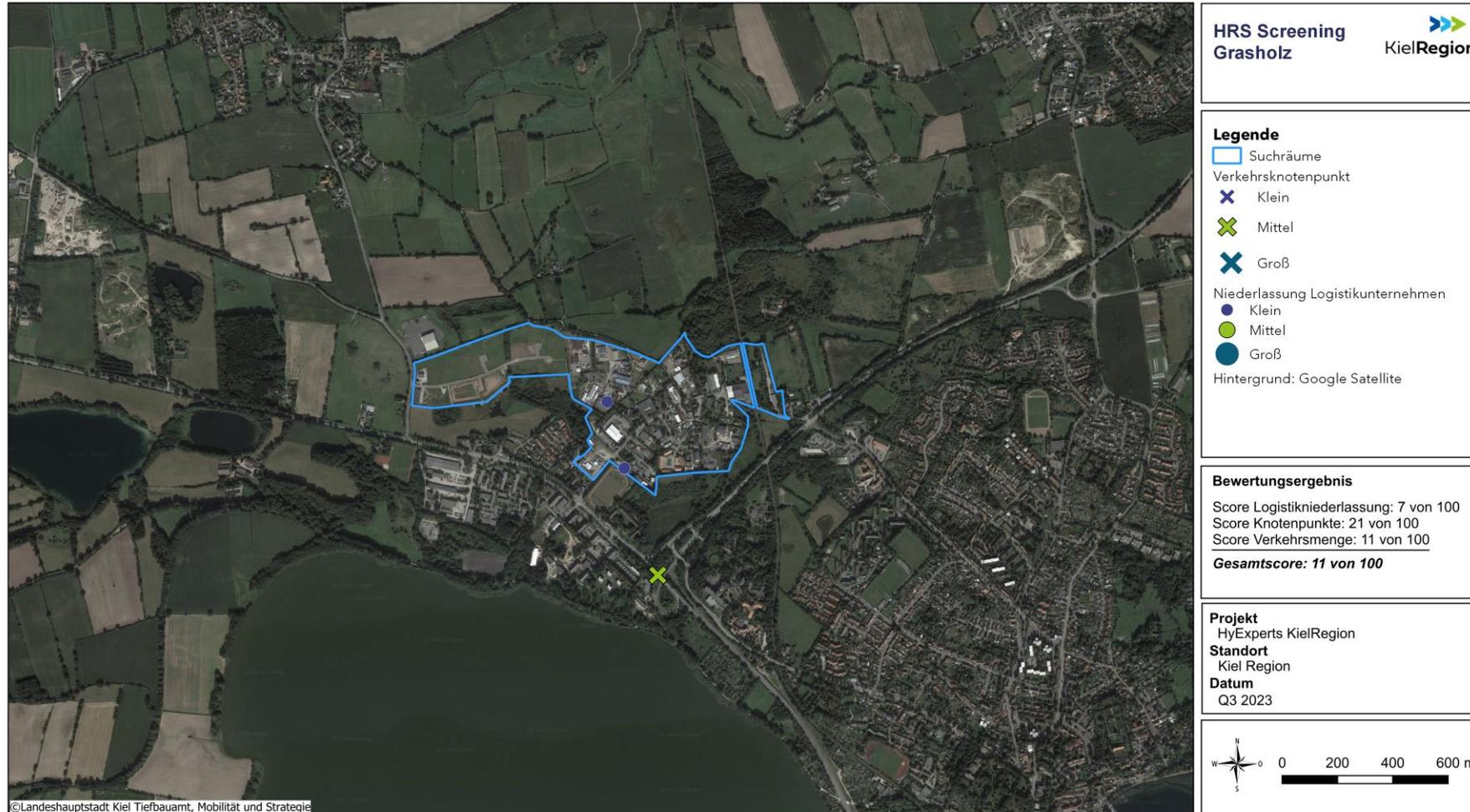
Hohenweststedt Nord – Hohenweststedt



Eckernförde Süd – Eckernförde



Grasholz – Eckernförde



Schönberger Straße – Kiel



Hamburger Chaussee – Flintbek



Nortorf Nord – Nortorf



Böken – Bordesholm



Osdorf Süd – Osdorf



Detailanalyse Verkehr: ÖPNV

Verkehr: ÖPNV



Agenda

- **Einführung**
- Allgemein Grundlagen
- Konkrete Anwendungsbeispiel

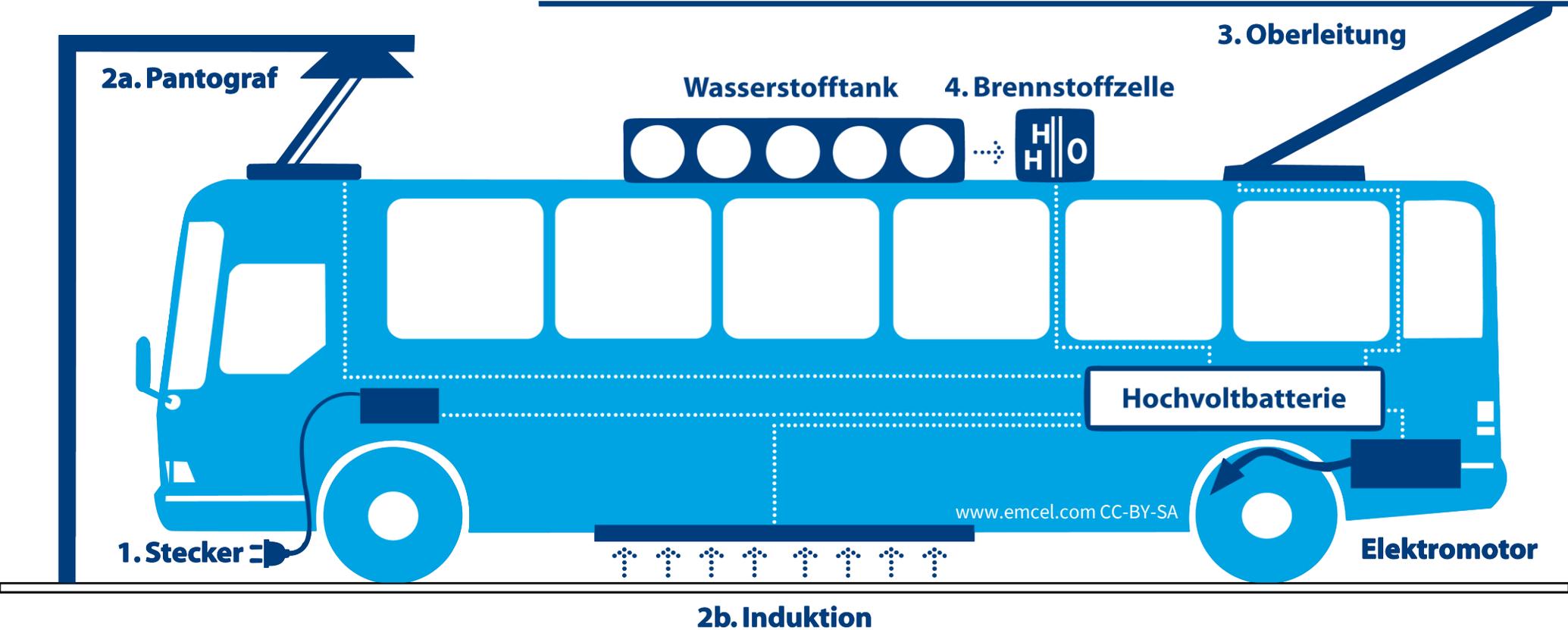
Brennstoffzellenbusse ermöglichen einen emissionsfreien Verkehr. Ihre Eignung für eine Flotten-Umstellung muss geprüft werden.

Inhalte und Zielsetzung der Detailanalyse Brennstoffzellenbus

- Busse mit alternativen Antrieben ermöglichen einen lokal emissionsfreien Verkehr und werden in Zukunft Dieselbusse ersetzen. Diese Busse nutzen verschiedene Antriebskonzepte, die Nutzung von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle ist eines hiervon. Verschiedene Technologien haben unterschiedliche Stärken und eignen sich für spezifische Anforderungsprofile.
- Bei der Umstellung von dieselbetriebenen Bussen sind verschiedene Faktoren zu beachten. Neben der Leistungskennzahlen der neuen Busse ist der Aufwand einer Umstellung im Betriebsablauf, der benötigte Platz und die Gesamtkosten für Fahrzeuge, Infrastruktur und Kraftstoff zu betrachten. Die Batteriekapazität wird im Winter durch die niedrigen Außentemperaturen und zusätzliche Verbräuchen wie bspw. die Heizung stärker beansprucht. Da die Ausfallsicherheit im ÖPNV höchste Priorität hat muss die Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge in diesem Worst-Case geprüft werden.
- Im Folgenden Kapitel werden die Eigenschaften eines Brennstoffzellenbusses und seine Eignung für eine Umstellung dargestellt. Die Stärke des Brennstoffzellenbusses liegt besonders in seinen hohe Umlauflängen und kurze Betankungszeiten, die nur minimale Umstellungen in Betriebsabläufen und Umlaufplanungen erfordern.

E-Busse können mit verschiedenen alternativen Antriebstechnologien betrieben werden

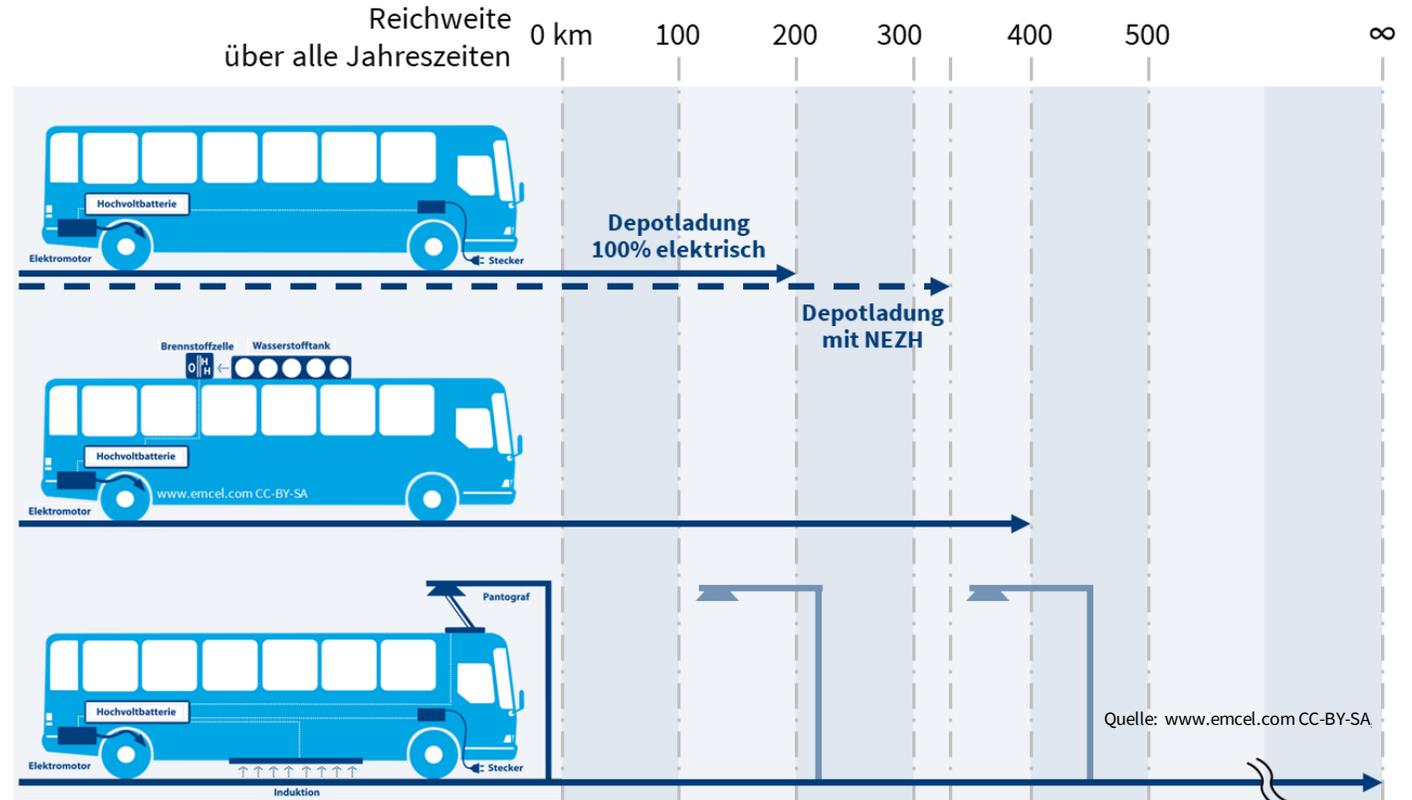
Brennstoffzellenbusse: Grundlagen



Unterschiedliche Antriebstechnologien erlauben unterschiedliche Reichweiten

Brennstoffzellenbusse: Aktuelle Reichweiten

- Depotladung
 - ▶ 100% elektrisch
 - ▶ mit nicht-elektrischer Zusatzheizung (NEZH)
- Brennstoffzelle
- Gelegenheitsladung
 - ▶ mit Zwischenladung im Fahrbetrieb



Die Reichweitenangaben sind als Richtwerte für gesicherte Reichweiten zu verstehen, die heute am Markt verfügbar sind. Die tatsächlichen Reichweiten sind abhängig von Fahrzeug, Jahreszeit, Topographie, etc.

Die Umstellung auf Wasserstoff erfordert im Betrieb kaum Anpassungen, neue Infrastruktur ist aber aufwändig

Brennstoffzellenbusse: Eigenschaften

Vorteile

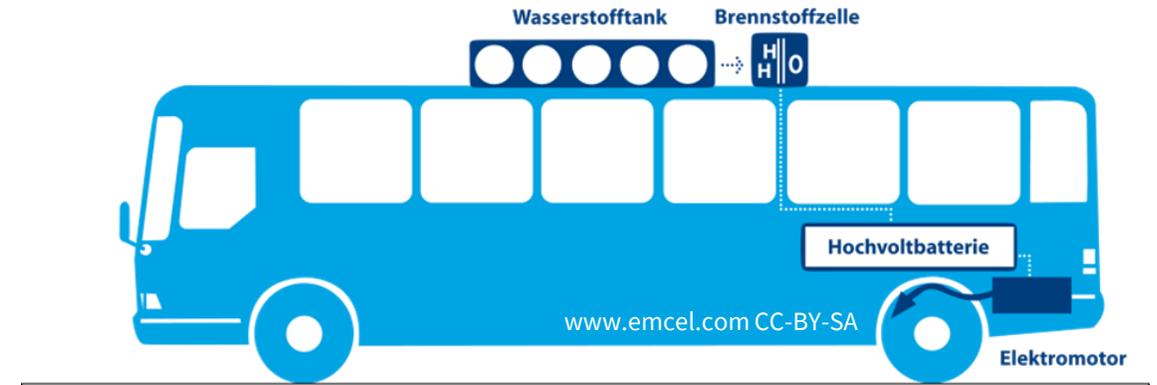
- Reichweite bis ca. 400 km
- Streckenplanung wie bei Dieselnissen möglich
- Flexibel einsetzbar

Nachteile

- Hohe Einstiegshürde (Flottengröße)
- Ggf. Aufbau eigener Wasserstoffinfrastruktur notwendig

Konsequenz / mögliche Lösung

- Gemeinsame Nutzung von Wasserstofftankstellen, auch öffentlich
- Wasserstofftankstelle als Betreibermodell



Die „BMDV - Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr fördert Busse, Infrastruktur und Studien

Brennstoffzellenbusse: Fördermöglichkeiten

Gegenstand der Förderung	Maximale Förderung	Ansprechpartner und Link
<p>Beschaffung sowie Umrüstung von Bussen:</p> <ul style="list-style-type: none">➤ Batterieelektrische Antriebe, beispielsweise Batteriebusse auch mit Brennstoffzelle als Range-Extender und Batterie-Oberleitungsbusse➤ Brennstoffzellenbusse➤ Antriebe, die bilanziell zu 100 Prozent mit aus Biomasse erzeugtem Methan betrieben werden (Gasbusse)	<ul style="list-style-type: none">➤ Beschaffung und Umrüstung von Bussen: bis zu 80 Prozent der zuwendungsfähigen Ausgaben➤ zugehörige Infrastruktur für den Einsatz der Busse: bis zu 40 Prozent der zuwendungsfähigen Ausgaben➤ Erstellung von Studien und Analysen: bis zu 50 Prozent der zuwendungsfähigen Ausgaben	<ul style="list-style-type: none">➤ Team Bus➤ Tel.: +49 (0)30 311 61 16-760➤ Mail: busse@now-gmbh.de➤ Über: https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderfinder/skizzeneinreichung-fuer-busse-mit-alternativen-antrieben-05-2022/

- Antragstellung: letzte Frist am 15.07.2022
- Status: Förderrichtlinie läuft bis 31.12.2025
- Fazit: Projekte vorbereiten, neue Förderaufrufe sind in Zukunft zu erwarten

Derzeit keine
E-Busförderung
angeboten.

Agenda

- ▶ Einführung
- ▶ **Allgemein Grundlagen**
- ▶ Busse
- ▶ **Werkstatt**
- ▶ HRS
- ▶ H2 Beschaffung
- ▶ Schlussfolgerung
- ▶ Konkrete Anwendungsbeispiel

Die Umstellung auf Brennstoffzellenbusse erfordert eine Anpassung der Werkstattinfrastruktur auf dem Betriebshof, um den sicheren Umgang mit Wasserstoff- und Hochvoltsystem sicher zustellen.

Inhalte und Zielsetzung der Detailanalyse Werkstattumrüstung

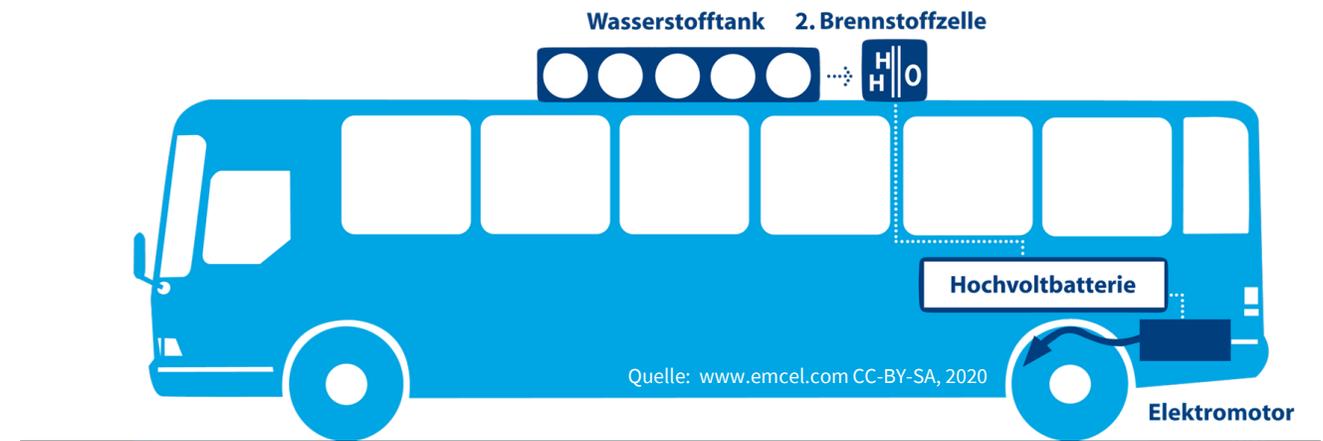
- Viele ÖPNV-Betreiber haben auf Ihrem Betriebsgelände eigene Werkstätten, in denen Sie Ihre Fahrzeuge warten und Reparaturen durchführen. Werkstätten und Personal sind auf Dieselbusse ausgelegt und geschult. Die Anschaffung von Brennstoffzellenfahrzeuge muss daher einhergehen mit entsprechenden Anpassungen der bestehenden Werkstattgebäude und Sensibilisierung und Schulung des Personals. Das folgende Kapitel gibt einen Überblick, was für den sicheren Umgang mit Wasserstoff im Werkstattbereich zu beachten ist, und welche baulichen Maßnahmen notwendig sein könnten. Im Falle eines Neubaus sollten diese Dinge direkt integriert werden, bei Bestandsgebäuden ist zu prüfen, ob und wie diese angepasst werden sollten. Detaillierte Betrachtungen sind an den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten durchzuführen und ein individuelles Sicherheitskonzept muss erstellt werden. Im Fokus steht hierbei sowohl die Arbeit an Wasserstoff- als auch an Hochvolt-Systemen
- Technisch dichte Fahrzeuge* dürfen typischerweise in Abstellhallen auch ohne technische Ertüchtigungsmaßnahmen abgestellt werden, konventionelle Arbeiten dürfen auch in den üblichen Werkstattbereichen durchgeführt werden. Gefährdungsbeurteilung und Sicherheitskonzept sind hierbei Grundvoraussetzung)
- Wenn in der Werkstatt Arbeiten am Wasserstoffsystem durchgeführt werden sollen muss ein entsprechender Gasarbeitsplatz (H₂-Sensorik, Alarmierung, Lüftung etc.) vorgesehen werden. Gefährdungsbeurteilung und Explosionsschutzdokument sind hier erforderlich)
- Ein Quarantäneplatz für Fahrzeuge, deren Zustand die Dichtigkeit des Wasserstoffsystems anzweifeln lassen, (z.B. bei Kollision / Feuer / Manipulation / Betriebsstörung / Fehlermeldung /etc.) ist vorzusehen.

*Technisch dichte Fahrzeuge: Mit Wasserstoff betriebene Fahrzeuge, auch Busse, müssen technisch dicht sein. Die für die Zulassung erforderliche Dichtheit ist in der UN/ECE R-134 definiert

Die physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff bestimmt den Umgang mit Wasserstoff als Kraftstoff

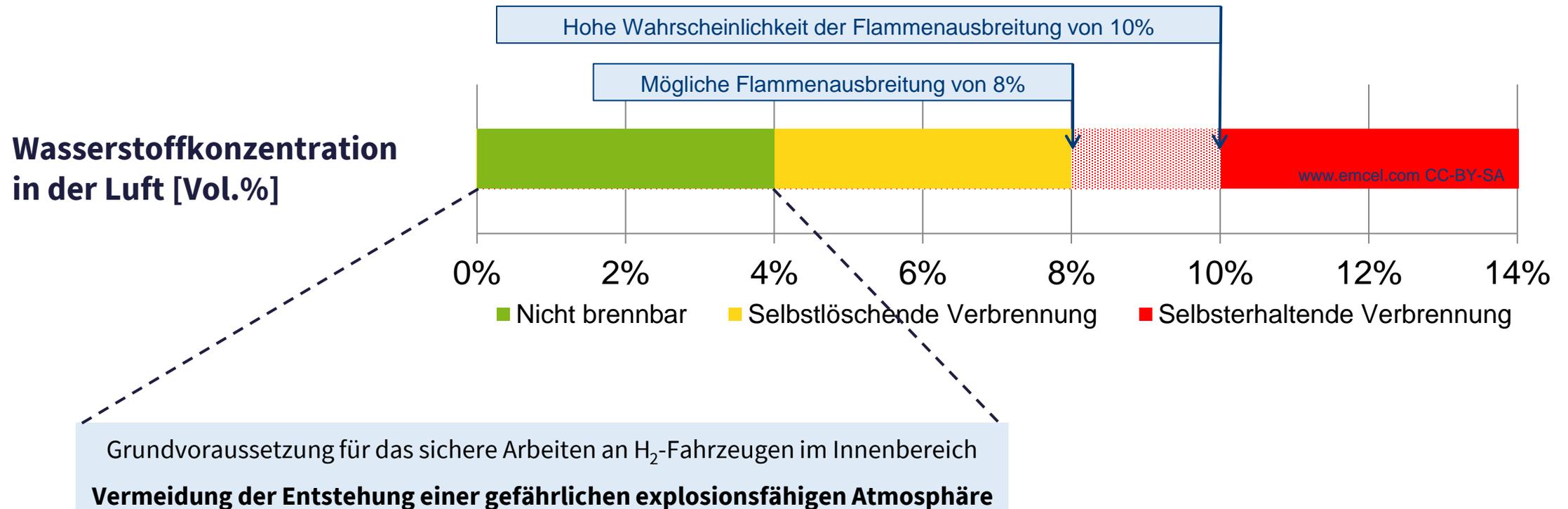
Werkstattkonzept: Grundlage Kraftstoff

- Untere und obere Konzentrationsgrenze für eine Zündung: 4 % - 74 % in Luft
- Zündungstemperatur: 560 °C
- Minimale Zündenergie: 0,02 mJ
- Dichte: 0,089 kg/m³ (Luft: 1,225 kg/m³)
- Farb- und Geruchslos
- Ähnlichkeiten zu Erdgas (etablierter Kraftstoff)
- Schnelle Verflüchtigung in Luft als Vorteil im Umgang



Die Zündgrenzen von Wasserstoff sind entscheidend um die Bildung eines explosionsfähigen Gemisches zu vermeiden

Werkstattkonzept: Grundlage Kraftstoff



Das Werkstattkonzept soll die Entstehung einer gefährlichen, explosionsfähigen Atmosphäre vermeiden

Werkstattkonzept: Allgemeine Vorgehensweise

Voraussetzung: Technische Dichtigkeit des H₂-Fahrzeuges

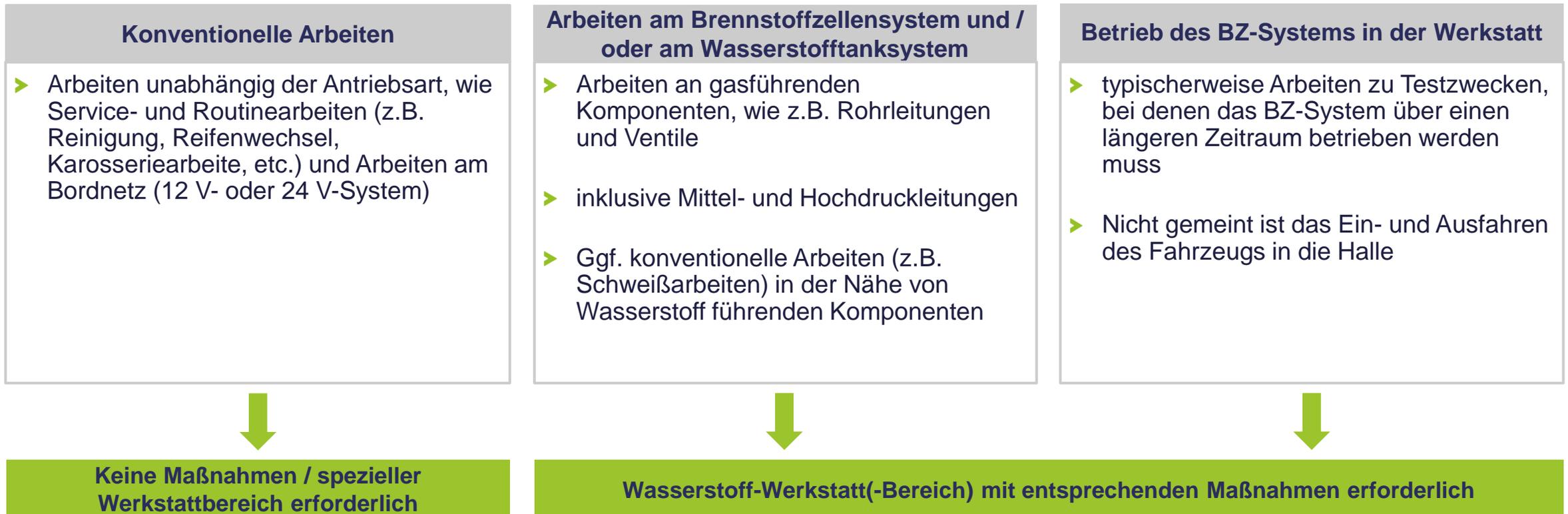
- Zulassung der Fahrzeuge nach europäischen bzw. internationalen Richtlinien → Bestätigung durch den Hersteller
- Für Arbeiten an Prototypen- oder Entwicklungsfahrzeugen sind zusätzliche Maßnahmen zu treffen

Allgemeine Vorgehensweise

- Ist die bestehende technische Dichtigkeit des BZ-Fahrzeuges nicht anzuzweifeln ist keine weitere Prüfung durchzuführen. In Abhängigkeit der auszuführenden Tätigkeit darf das BZ-Fahrzeug anschließend in die entsprechenden Werkstattbereiche
- Besteht der Anlass die technische Dichtigkeit anzuzweifeln (z.B. Kollision / Feuer / Manipulation / Betriebsstörung / Fehlermeldung /etc.) darf das Fahrzeug nicht in die Werkstatt eingefahren werden
 - Prüfung der technischen Dichtigkeit und Berücksichtigung der Herstellerangaben

Wenn Arbeiten am Brennstoffzellen- oder Wasserstoffsystem durchgeführt werden sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich

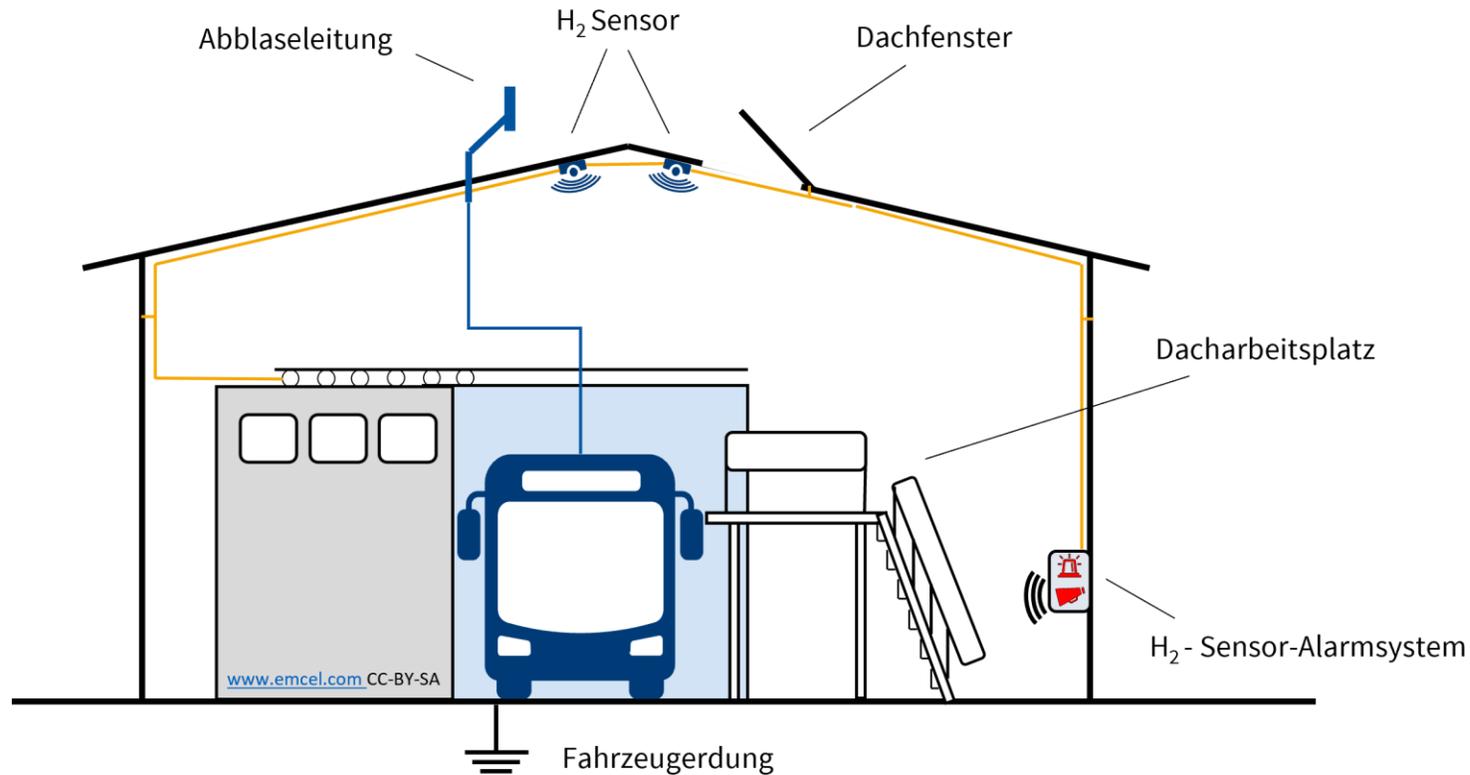
Einteilung der Arbeiten: Welche Arbeiten sollen an den Fahrzeugen durchgeführt werden?



Quelle: www.emcel.com CC-BY-SA

Für den sicheren Umgang im Werkstattbereich müssen einige technische Ertüchtigungsmaßnahmen im vorgesehen werden

Typische Maßnahmen zur Werkstattertüchtigung



- Auf Basis DGUV-Information 209-072 Wasserstoffsicherheit in Werkstätten, u.a. TRGS 720

Für den Fall, dass ein Bus nicht technisch dicht ist müssen besondere Arbeitsplätze und Sicherheitssysteme installiert werden.

Typische Maßnahmen zur Werkstattertüchtigung

Abstellhalle

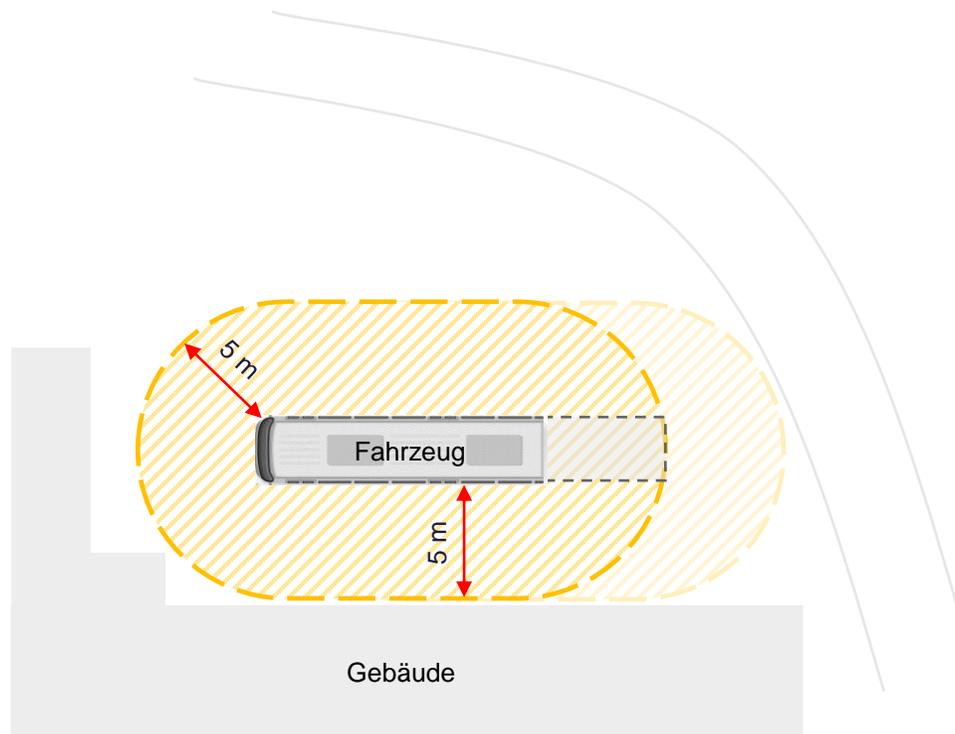
- Technisch dichte Fahrzeuge dürfen grundsätzlich in der Halle abgestellt werden
→ Im Zweifel: Quarantäneplatz
- Keine techn. Maßnahmen innerhalb der Abstellhalle erforderlich

Werkstatt

- Technisch dichte Fahrzeuge dürfen grundsätzlich in alle Werkstattbereiche
→ Im Zweifel: Quarantäneplatz
- Für Arbeiten am H₂-System ist ein „Gasarbeitsplatz“ erforderlich
- Vermeidung von Ex-Zonen durch H₂-Sensorik und daraus resultierenden Maßnahmen
- **Erste Alarmierungsstufe:** z.B. Durchlüftung erhöhen (Hallentore/Dachluken öffnen), akustischer/visueller Alarm, Evakuierung
- **Zweite Alarmierungsstufe:** z.B. Halle stromlos schalten – nur noch Betrieb von Ex-geschützten Bauteilen zulässig
- Ex-geschützte Bauteile sind z.B. Dachlukensteuerung, Notbeleuchtung, H₂-Sensorik, Brandmeldeanlage etc.

Fahrzeuge, deren technische Dichte nicht sicher, ist werden auf dem Quarantäneplatz abgestellt

Einrichtung eines Quarantäneplatzes



- Ein sicherer Abstellplatz ist für Fahrzeuge mit unklarem Fahrzeugzustand einzurichten (z.B. nicht techn. dicht, defekte HV-Batterie)
- Die Fahrzeuge werden auf einem vorher festgelegten Platz abgestellt und ein Radius von 5 m mit Absperrband markiert (Platz muss im Bedarfsfall verfügbar sein)
- An dieser Stelle kann auch ggf. mit entsprechender Abblasevorrichtung der Wasserstoff abgelassen werden. Hier müssen die genauen Abstände in einer Gefährdungsbeurteilung bzw. Ex-Schutzdokument definiert werden.

Je nach baulichen Anpassungen müssen Kosten von bis zu 200 t € für die Infrastruktur eingeplant werden

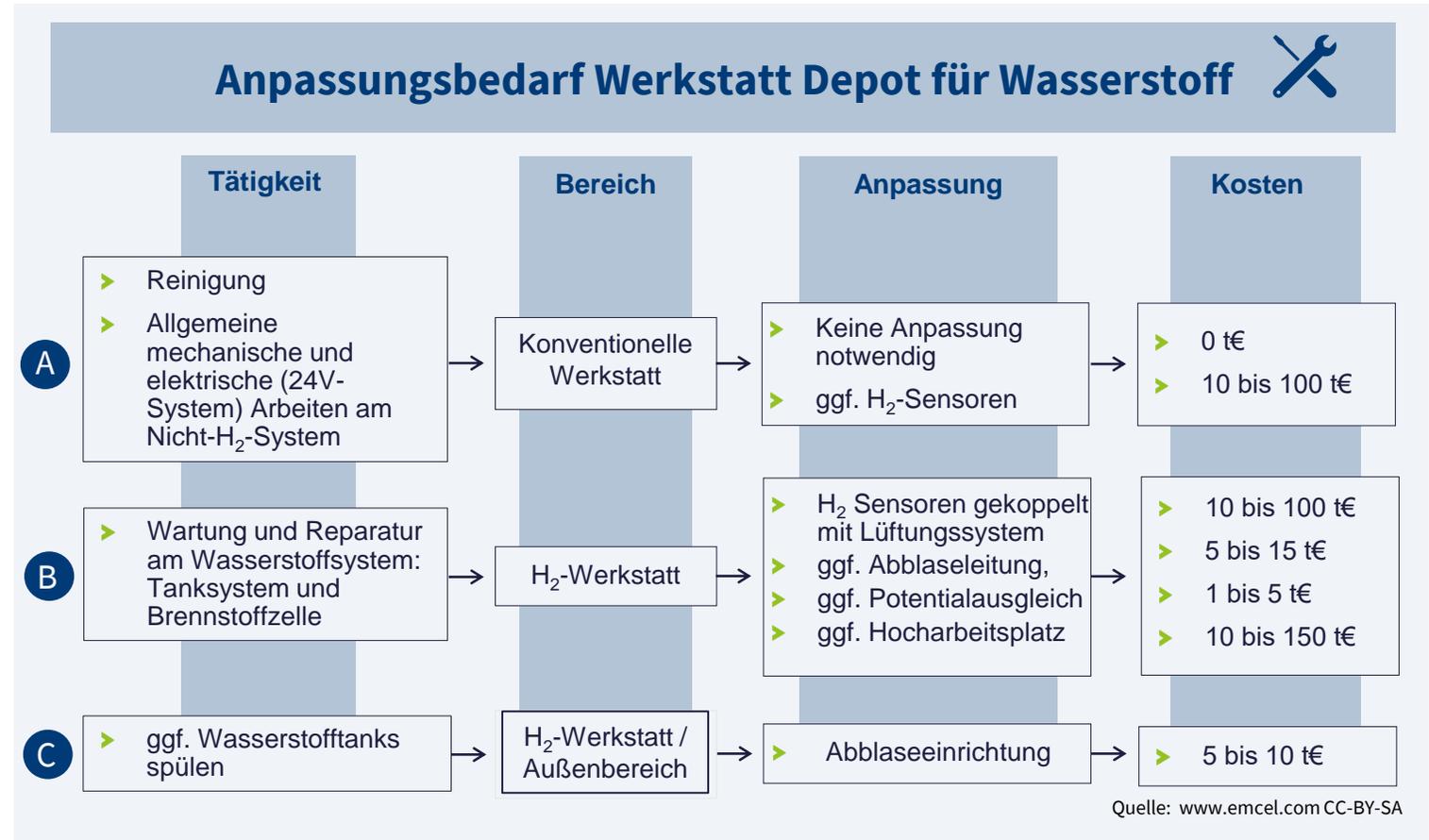
Anpassungen der Werkstatt und des Betriebshofes

Werkstatt

- Ertüchtigung für Hochvolt / Wasserstoff
- Spezial-, Diagnosewerkzeug
- Dacharbeitsplätze, Deckenkran, Hebebühne, etc.

Betriebshof

- Tankinfrastruktur
- Quarantäneplatz

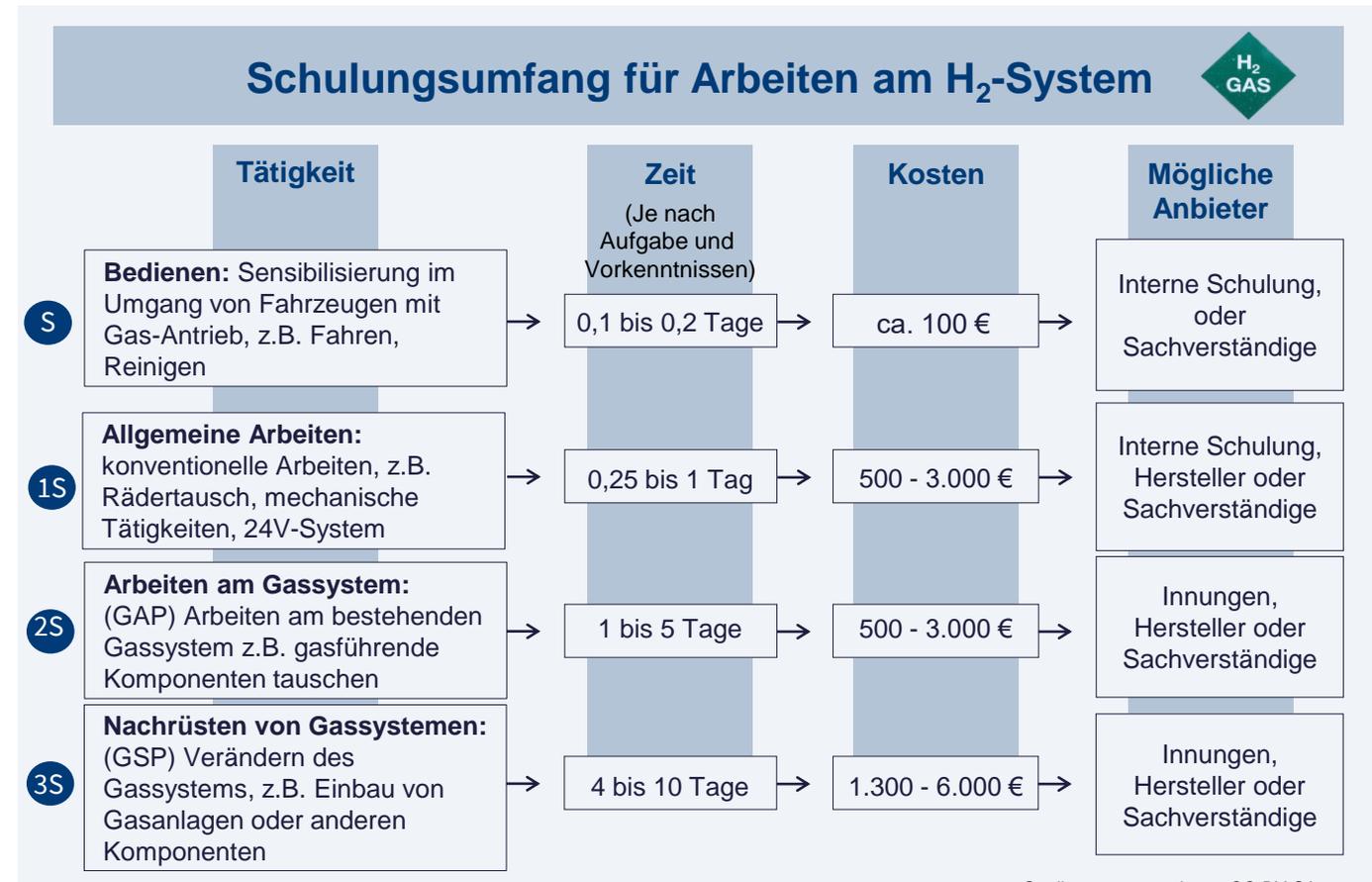


Die Werkstattmitarbeiter müssen im Umgang mit Wasserstoffsystemen geschult werden. Je involvierter die Arbeiten, desto aufwendiger die Schulung.

Schulungen für Arbeiten zum H₂-System

Schulung Wasserstoff

- Für Fachkräfte mit überschaubarem Aufwand erlernbar
- „Neues“ Wissen Wasserstoff ist heute noch erforderlich
- „Neues“ Wissen Wasserstoff wächst heute schon mit den neuen Berufsbildern nach



FBHM-099-Fachbereich Holz-Metall-Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Gasantrieb

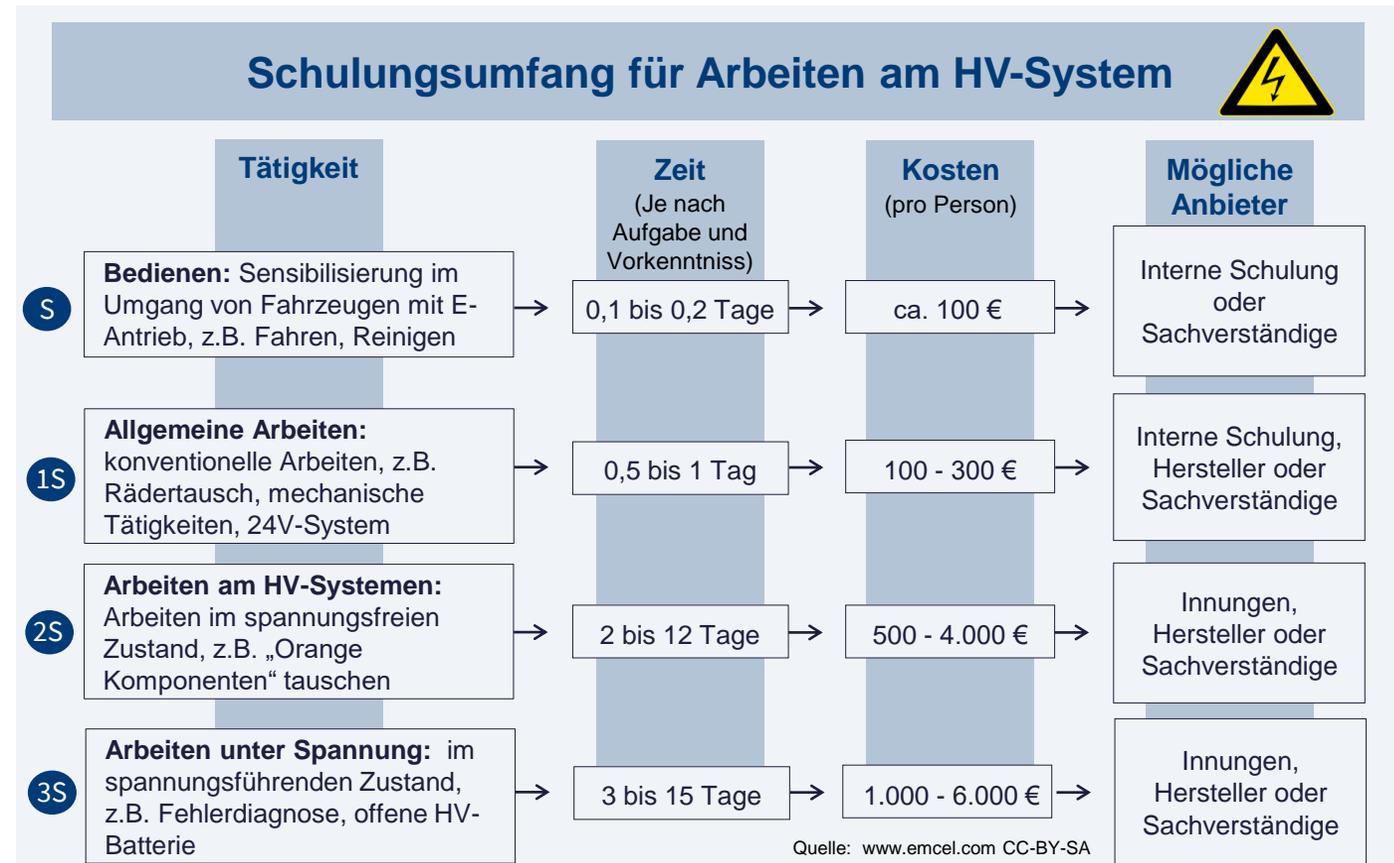
Quelle: www.emcel.com CC-BY-SA

Die Werkstattmitarbeiter müssen im Umgang mit dem Hochvolt-System geschult werden. Je involvierter die Arbeiten, desto aufwendiger die Schulung.

Schulungen für Arbeiten am Hochvolt-System

Schulung Hochvolt

- Für Fachkräfte mit überschaubarem Aufwand erlernbar
- „Neues“ Wissen Hochvolt ist heute noch erforderlich
- „Neues“ Wissen Hochvolt wächst heute schon mit den neuen Berufsbildern nach



Agenda

- ▶ Einführung
- ▶ **Allgemein Grundlagen**
- ▶ Busse
- ▶ Werkstatt
- ▶ **HRS**
- ▶ H2 Beschaffung
- ▶ Schlussfolgerung
- ▶ Konkrete Anwendungsbeispiel

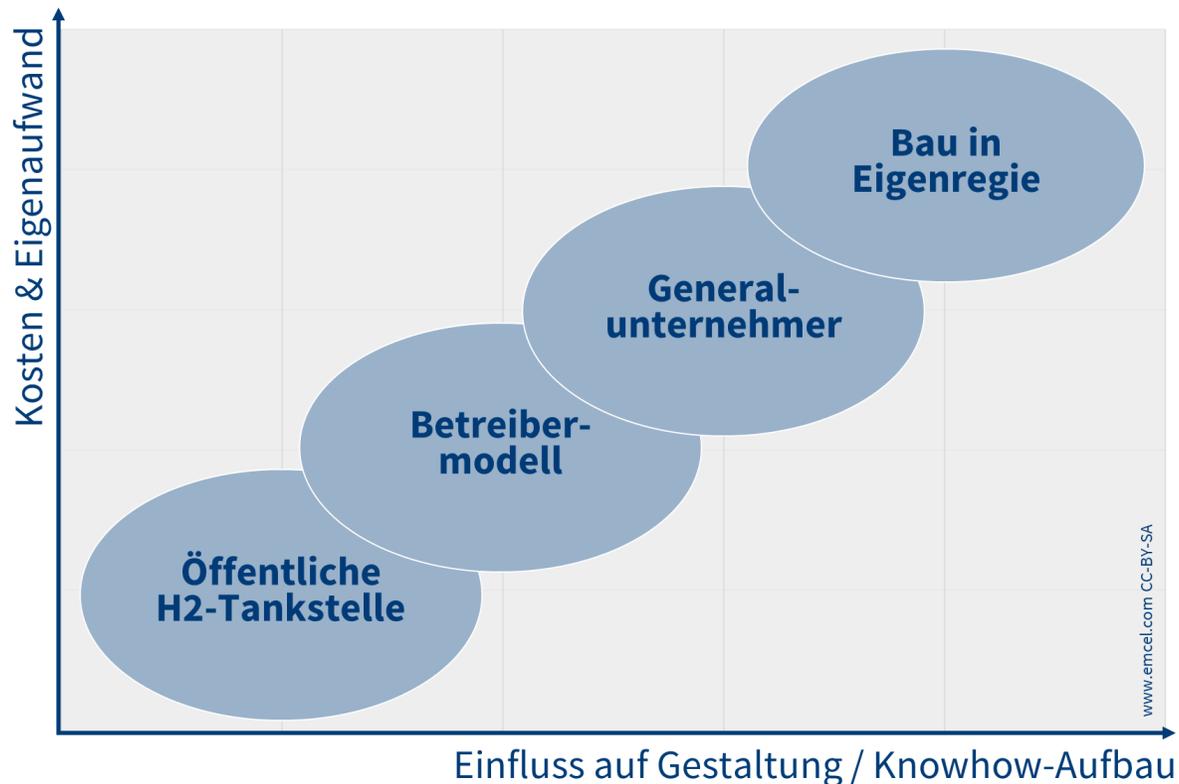
Brennstoffzellenbusse werden durch Wasserstofftankstellen versorgt. Diese Infrastruktur muss den Anforderungen der Flotten und Betriebsanläufe gerecht werden

Inhalte und Zielsetzung der Detailanalyse Wasserstofftankstelle

- Die Versorgung der Wasserstoffbusse kann auch verschiedene Arten geschehen. Die richtige Wahl kann von vielen Unternehmensspezifischen Faktoren abhängen. Um die Betankungsvorgänge optimal in die Betriebsabläufe zu integrieren kann eine Tankstelle auf dem Betriebshof unumgänglich sein. Gerade zu Beginn einer Flottenumstellung, oder wenn nur ein kleiner Teil der Flotte umgestellt wird kann eine externe Betankung die einfachere Lösung sein.
- Wenn die Tankstelle auf dem Betriebsgelände errichtet wird kann der Wasserstoff antransportiert oder vor Ort produziert werden. Unterschiedliche Hersteller nutzen unterschiedliche Konzepte um schnelle und zuverlässige Tankvorgänge sicher zu stellen. Diese müssen mit dem Produktions- oder Anlieferkonzept, den örtlichen Gegebenheiten und den Betriebsabläufen abgestimmt werden.
- Der ÖPNV fordert kurze, eng getaktete Tankzeiten und hohe Einsatzsicherheiten. Daher ist eine Wasserstoff-Lagermenge vom 2- 3-fachen der benötigten Tagesmenge sinnvoll. Größere Lagermengen Wasserstoff erfordern aufwendigere Sicherheitskonzepte und Genehmigungsverfahren.
- Die folgenden Folien stellen die Funktionsweise verschiedener Tankstellenkonzepte und Ihre Komponenten dar, und weist auf Faktoren hin, die neben der reinen Leistungsfähigkeit zu beachten sind, wie ausreichende Flächen, Genehmigungsverfahren und die Zeitplanung.

Der Betrieb der Tankstelle kann dem gewünschtem Eigenengagement angepasst werden

H2-Tankstellen: Verschiedene Betriebsmodelle



Betriebsmodelle

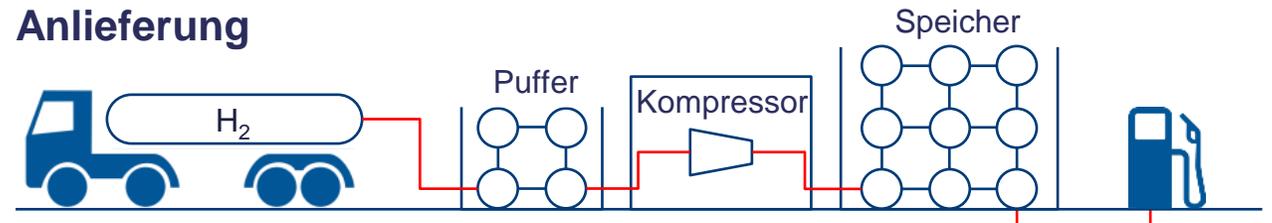
- Bau, Genehmigung, Eigentum und Betrieb einer Wasserstoff-Tankstelle können sehr unterschiedlich organisiert werden
- Diese Aufgaben können durch das ÖPNV-Unternehmen selber durchgeführt oder ausgelagert werden
- Je involvierter Das ÖPNV-Unternehmen, desto mehr Verantwortung trägt es, kann aber auch mehr Einfluss z.B. auf Dimensionierung und Betriebsweise nehmen.
- Das hat Auswirkungen auf den Preis und die Verfügbarkeit des Wasserstoffs
- Es stellt sich die Frage, ob Know-How im Wasserstoffbereich aufgebaut werden soll oder nur die Versorgung mit Wasserstoff sichergestellt werden soll

Der Wasserstoff für die Tankstelle kann vor Ort produziert oder angeliefert werden

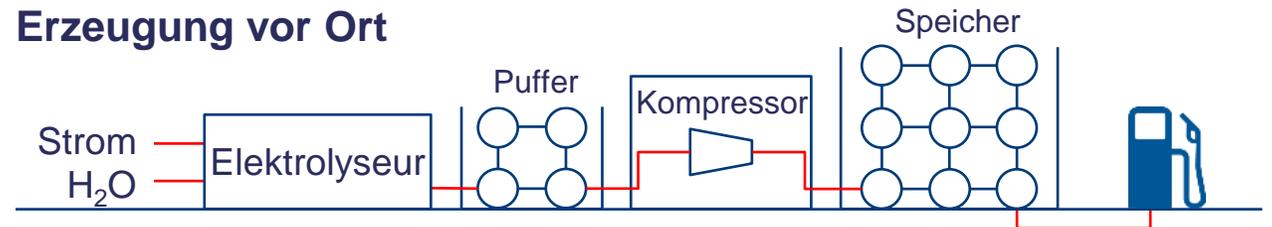
H2-Tankstellen: Verschiedene Tankstellenarten

- Heute: typischerweise Anlieferung per Trailer (gasförmig, flüssig)
- Wasserstoff kann ebenfalls direkt am Standort per Elektrolyse erzeugt werden
- Zukünftig sollen Tankstellen an ein breit ausgebautes H₂-Pipelinennetz angeschlossen werden (nicht weiter beachtet, da noch keine Pipeline in Kiel existiert)
- Mischformen aller Anlieferungsarten möglich
- Fokus auf Anlieferung per Trailer, gasförmig, und Erzeugung vor Ort

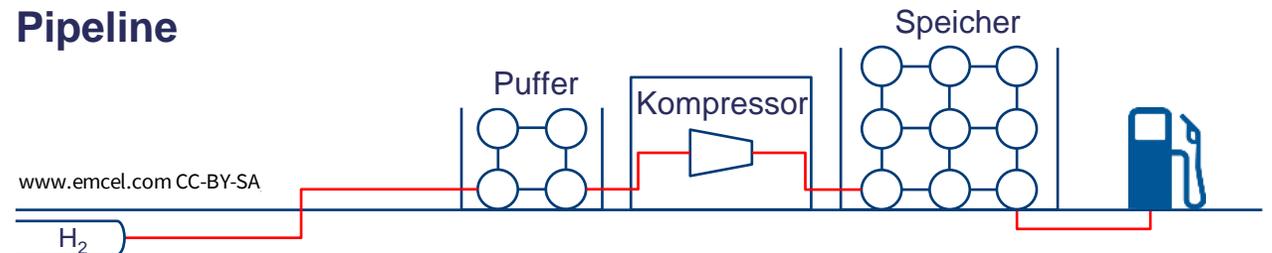
Anlieferung



Erzeugung vor Ort

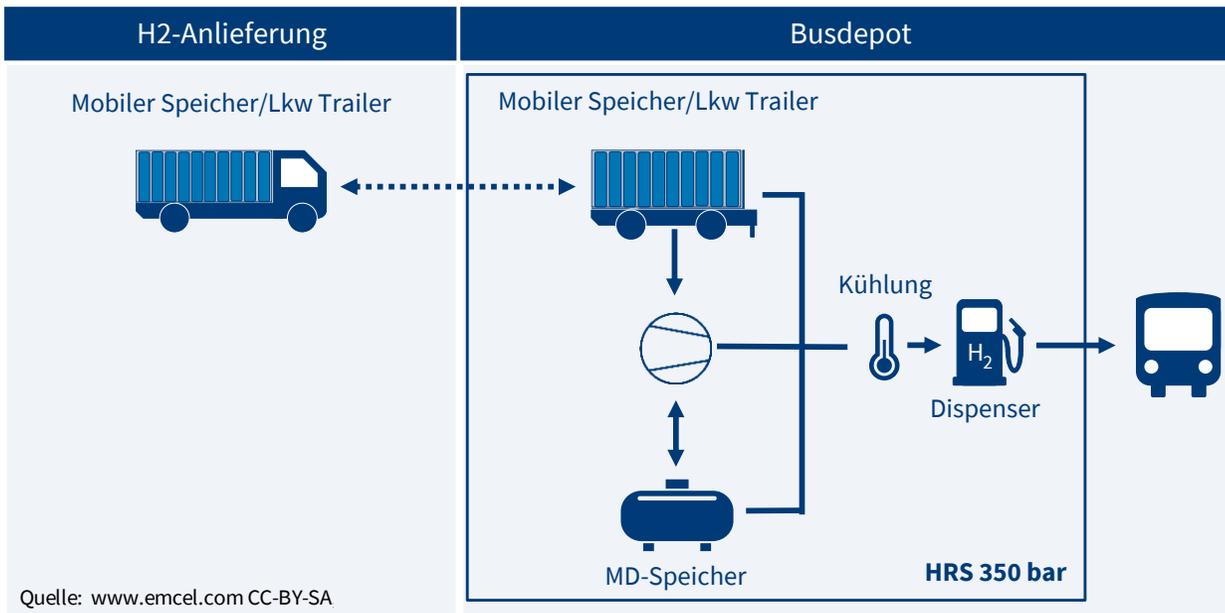


Pipeline



Wasserstoff kann in mobilen Tanktrailern angeliefert werden, welche in die Tankinfrastruktur integriert werden

H2-Tankstellen: Allgemeine Beschreibung Tankstellenarten



Verfahrensbeschreibung

- H₂-Anlieferung per Lkw-Trailer (200 - 500 bar) und ggf. Überströmen in MD-Speicher
- Kompression auf 500 bar zur Speicherung im MD-Speicher
- Betankung u.a. vom mobilen Speicher und/oder MD-Speicher (500 bar) zum Bustank (350 bar) per Überströmen

- + Energieeffiziente Nutzung des Trailer-Anlieferungsdrucks
- + Einfache Performancesteigerung durch zusätzliche H₂-Trailer od. höhere Anlieferungsfrequenz
- Höherer Platzbedarf durch dauerhafte Abladepositionen der Trailer inkl. Rangierfläche

Wasserstoff kann in mobilen Tanktrailern angeliefert werden, welche in die Tankinfrastruktur integriert werden

Anlieferungsoption 1: Trailer als mobiler Speicher



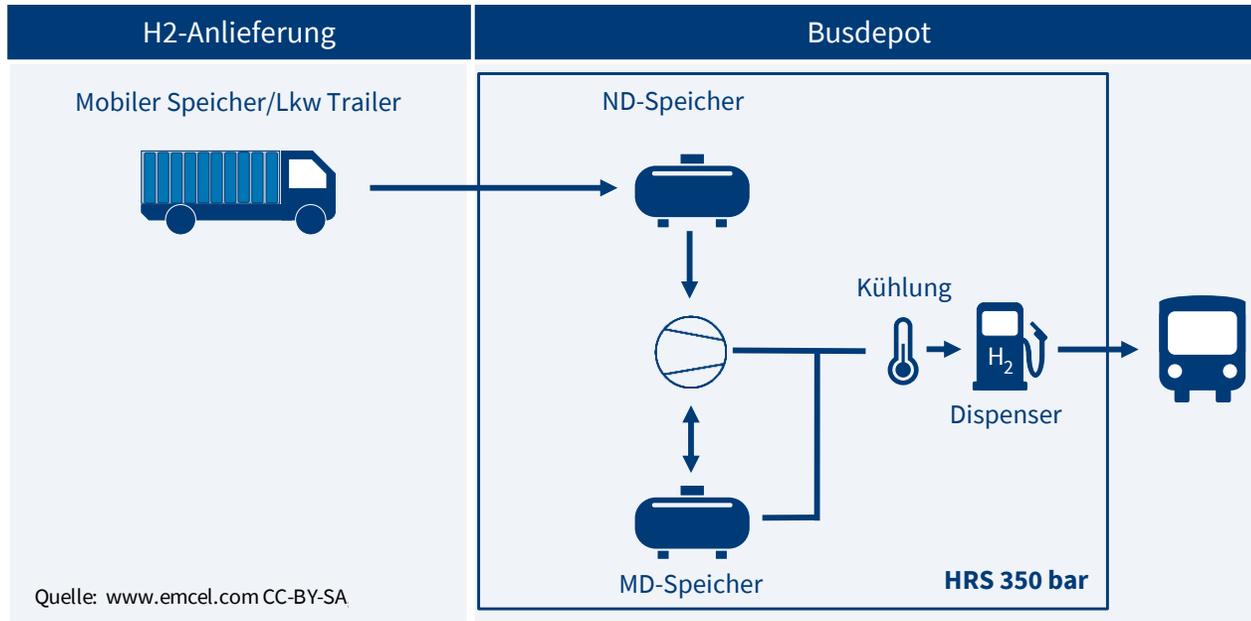
Beispiel für die Aufstellung



Quelle: IBAA

Angelieferter Wasserstoff kann in ND-Speicher überströmt werden, um kurzen Standzeit des Trailers zu gewährleisten

Anlieferungsoption 2: Kurze Trailer Standzeit



Verfahrensbeschreibung

- H₂-Anlieferung per Lkw-Trailer (200 – 500 bar) und Befüllung des ND-Speicher (ca. 40 bar) per Überströmen.
- Kompression von 40 bar auf 500 bar zur Speicherung im MD-Speicher
- Betankung u.a. vom MD-Speicher (500 bar) zum Bustank (350 bar) per Überströmen

- + Platzeinsparendes Aufstellungskonzept möglich. 10 – 20 % weniger Fläche
- + Kurze Standzeiten des H₂-Trailers
- Druckniveau des Trailers wird energetisch nicht genutzt. Mind. 20 - 30 % höherer Energiebedarf

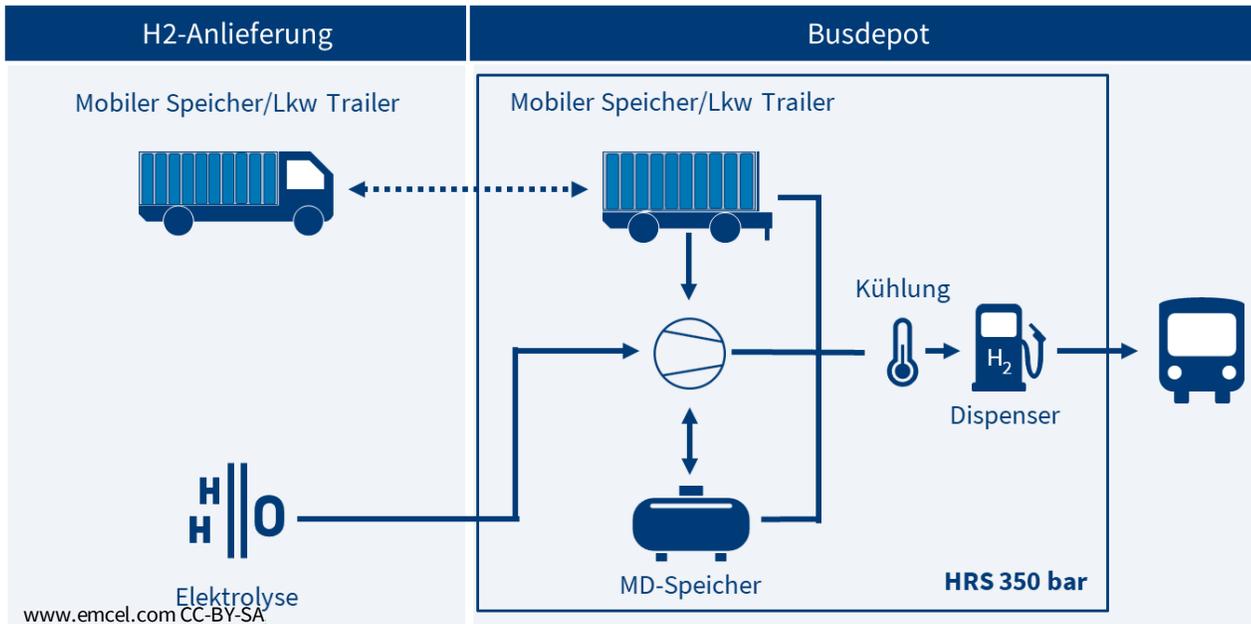
Angelieferter Wasserstoff kann in ND-Speicher überströmt werden, um kurzen Standzeit des Trailers zu gewährleisten

Anlieferungsoption 2: Kurze Trailer Standzeit



Wasserstoff kann auf dem Betriebsgelände mittels Elektrolyse produziert werden

Mischformen: Trailer als mobiler Speicher + Elektrolyse vor Ort (Mitteldruckspeicher)



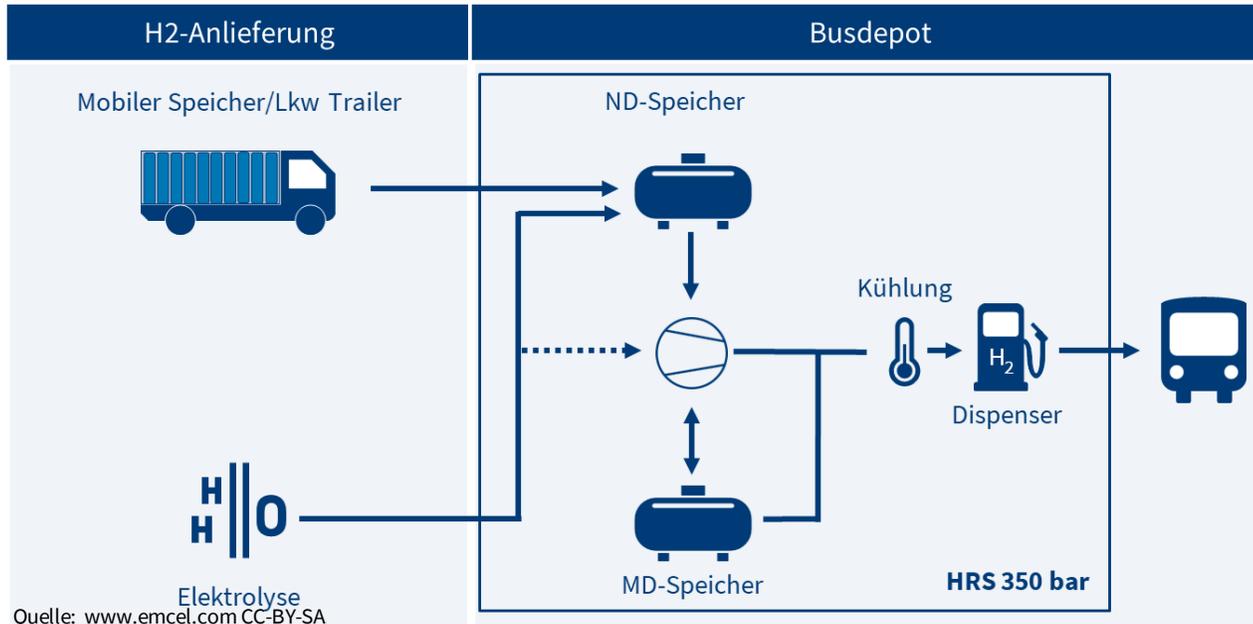
Verfahrensbeschreibung

- Ausgangsdruck Elektrolyse ca. 40 bar
- H_2 aus Elektrolyseur wird direkt komprimiert

- + Energieeffiziente Nutzung des Trailer-Anlieferungsdrucks
- + Einfache Performancesteigerung durch zusätzliche H_2 -Trailer oder höhere Anlieferungsfrequenz
- Höherer Platzbedarf durch dauerhafte Abladepositionen der Trailer inkl. Rangierfläche

Der Antransport per Trailer und die Produktion vor Ort können kombiniert werden

Mischformen: Trailer als mobiler Speicher + Elektrolyse vor Ort (Niederdruckspeicher)



Verfahrensbeschreibung

- Ausgangsdruck Elektrolyse ca. 40 bar
- H₂ aus Elektrolyseur wird idealerweise direkt in ND-Speicher geleitet (ohne Kompression)

- + Platzeinsparendes Aufstellungskonzept möglich. 10 – 20 % weniger Fläche im vgl. zu Anlieferungsoption 1
- + Kurze Standzeiten des H₂-Trailers
- Druckniveau des Trailers wird energetisch nicht genutzt. Mind. 20 - 30 % höherer Energiebedarf in vgl. zu Anlieferungsoption 1

Je größer die Tankstellenkapazität ist, desto mehr Fläche wird benötigt

H₂-Tankstellen: Tankstellendimensionierung

Tankstellengröße S	Tankstellengröße M	Tankstellengröße L
Tankstellenkapazität: 200 kg_{H2} <ul style="list-style-type: none">➤ ca. 6 - 8 Busse / LKW oder ca. 40 - 50 PKW pro Tag➤ Ungefährer Flächenbedarf: 500 m²– 1.000 m²	Tankstellenkapazität : 500 kg_{H2} <ul style="list-style-type: none">➤ ca. 15 – 20 Busse / LKW oder ca. 100 – 125 PKW pro Tag➤ Ungefährer Flächenbedarf: 1.000 m² - 1.800 m²	Tankstellenkapazität : 1.000 kg_{H2} <ul style="list-style-type: none">➤ ca. 30 – 40 Busse / LKW oder ca. 200 – 250 PKW pro Tag➤ Ungefährer Flächenbedarf: 1.800 m² - 3.000 m²

- Mögliche zusätzliche Flächenbedarfe durch Parkflächen, Verkaufsflächen, E-Ladesäulen etc.
- Flächenbedarfe abhängig von Hersteller und Aufstellungskonzept
- Verringerungspotential durch z.B. Brandschutzwände oder vertikale Anordnung

(Förderung), Ausschreibung, Genehmigungen und Lieferzeit bestimmen die Projektlaufzeit

H₂-Tankstellen: Zeitplan



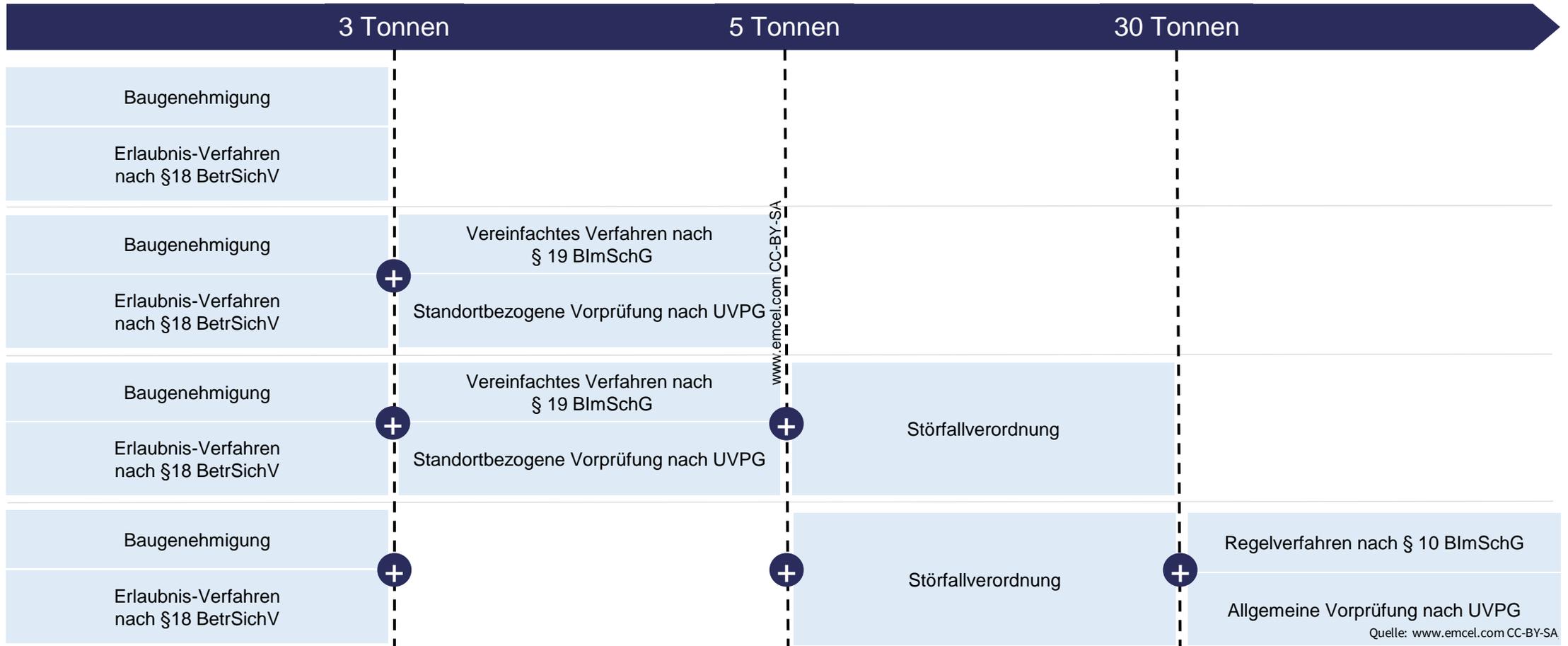
- Von Vorplanung bis zum Regelbetrieb: ca. 2,5 Jahre (Erfahrungswerte 2 - 3 Jahre)
- Erhebliche, zeitliche Verzögerung bei Bestellung der Komponenten erst nach Erhalt der Genehmigung

¹ Genehmigungsplanung

² Inbetriebnahme

Das Lagervolumen an Wasserstoff bestimmt welche Genehmigungen benötigt werden

H₂-Tankstellen: Genehmigungsverfahren



Agenda

- ▶ Einführung
- ▶ **Allgemein Grundlagen**
- ▶ Busse
- ▶ Werkstatt
- ▶ HRS
- ▶ **H2 Beschaffung**
- ▶ Schlussfolgerung
- ▶ Konkrete Anwendungsbeispiel

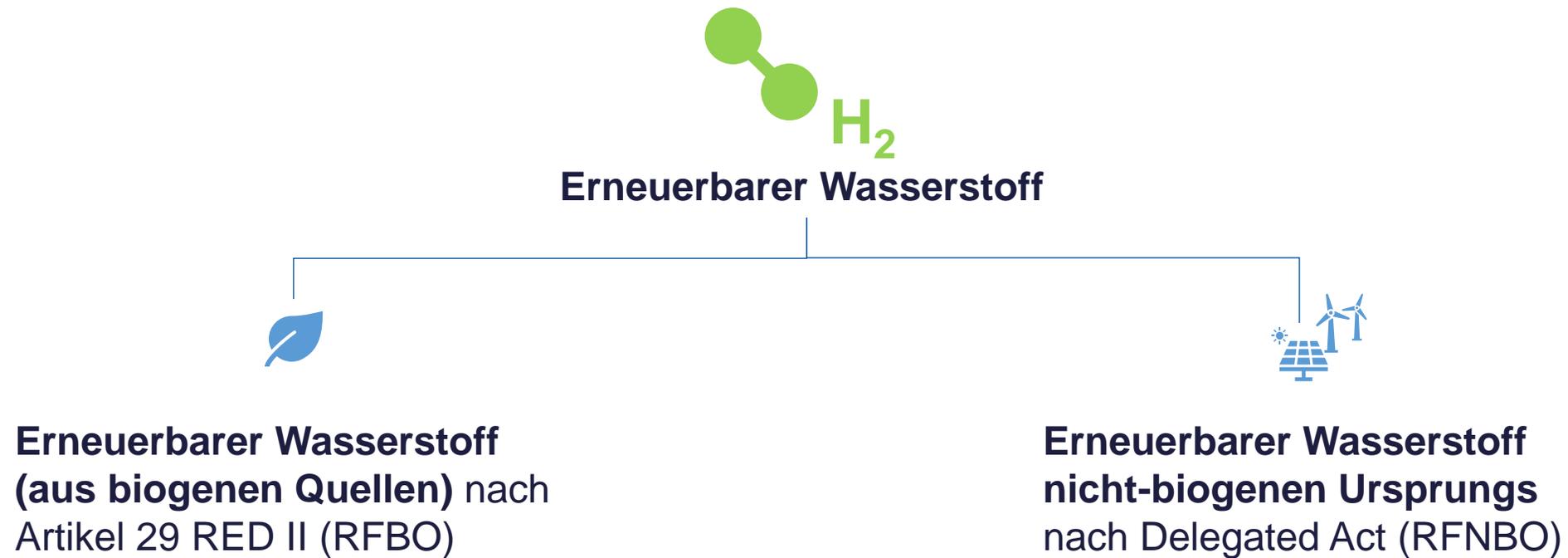
Die Detailanalyse soll Akteure befähigen eigenständige Make-or-Buy Entscheidungen hinsichtlich der H2 Beschaffung zu treffen.

Inhalte und Zielsetzung der Detailanalyse H2 Beschaffung

- Die Detailanalyse zur H2 Beschaffung soll den Akteuren einen Überblick über die wesentlichen Optionen der Eigenerzeugung und des externen Bezuges von Wasserstoff vermitteln. Dadurch sollen die Akteure auf der einen Seite für etwaige Verhandlungen zur H2-Beschaffung vorbereitet werden und auf der anderen Seite dazu befähigt werden eigenständige Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für die Eigenerzeugung von H2 durchzuführen.
- Da für die Förderung von Wasserstofftankstellen die Verwendung von erneuerbarem Wasserstoff¹ verbindlich ist, werden ausschließlich H2-Erzugungspfade betrachtet, die den nationalen Vorgaben zur Erzeugung von erneuerbarem H2 entsprechen.
- Inhaltlich werden unterschiedliche Strombeschaffungskonstellationen und deren Implikationen auf die Wasserstoffgestehungskosten (WGK) diskutiert². Weiterhin werden die WGK zu einer H2-Lieferung durch Dritte in Kontext gesetzt. In diesem Zusammenhang werden die Kosten eines regionalen H2-Erzeugers und einen dem überregionalen Import betrachtet.

¹ Die Definition von erneuerbarem Wasserstoff entsprechen den Vorgaben der AGVO // ² Die Detaillierte Analyse zu diesem Thema ist unter AP 1.3 Erzeugung dargestellt.

Für die Erzeugung von erneuerbarem H₂ sind grundsätzlich zwei Pfade möglich.



Aus den regulatorischen Vorgaben ergeben sich vier Parameter, die für die H2-Produktion relevant sind.

Anschlusstyp



Direktleitung



Netzanschluss

Stromquelle



Volatile Stromerzeugung



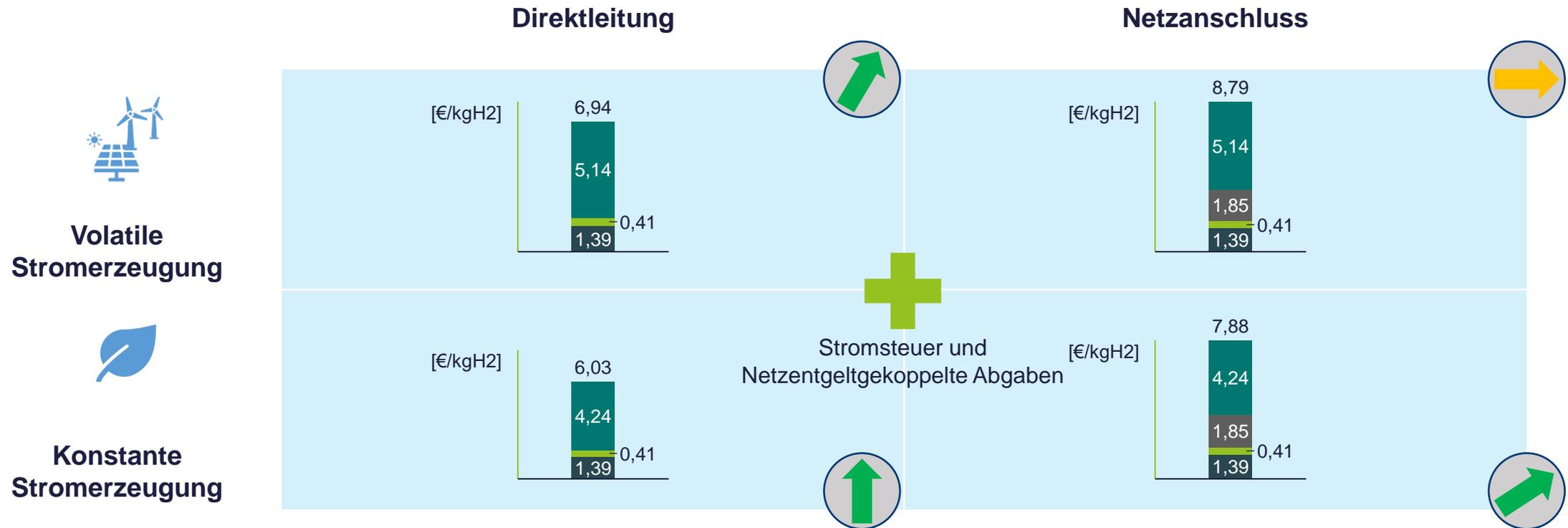
Konstante Stromerzeugung*

* Für eine konstante erneuerbare Stromerzeugung wird im Folgenden die Verstromung des biogenen Anteil durch eine Müllverbrennungsanlage / Wasserkraftwerk angenommen.

Die Kombination der 4 Erzeugungparameter haben verschieden Vor- und Nachteile.

	Direktleitung	Netzanschluss
 Volatile Stromerzeugung	<p>Die Elektrolyse ist direkt mit PV und/oder Wind verbunden.</p> <ul style="list-style-type: none">• Stromsteuer: Fallbetrachtung• Netzentgeltgekoppelte Abgaben: Nein• Grenzkostenoptimierung: Nein <p>→ Grundsätzlich positiv, Gegebenheiten nicht immer vorhanden</p>	<p>Der Strom wird über das öffentliche Netz bezogen und es besteht ein PPA mit PV oder Wind.</p> <ul style="list-style-type: none">• Stromsteuer: Fallbetrachtung• Netzentgeltgekoppelte Abgaben: Ja• Grenzkostenoptimierung: Nein <p>→ Teuerste Varianten, aber vermutlich die gängigste, da überall umsetzbar.</p>
 Konstante Stromerzeugung	<p>Die Elektrolyse ist direkt mit einer Müllverbrennungsanlage / Wasserkraftwerk verbunden.</p> <ul style="list-style-type: none">• Stromsteuer: Fallbetrachtung• Netzentgeltgekoppelte Abgaben: Nein• Grenzkostenoptimierung: Ja <p>→ Optimaler Fall, Gegebenheiten selten vorhanden.</p>	<p>Der Strom wird über das öffentliche Netz bezogen und es besteht ein PPA mit einer Müllverbrennungsanlage / Wasserkraftwerk.</p> <ul style="list-style-type: none">• Stromsteuer: Fallbetrachtung• Netzentgeltgekoppelte Abgaben: Ja• Grenzkostenoptimierung: Ja <p>→ Grundsätzlich positiv, Vertragspartner begrenzt.</p>

Je nach Kombination der Parameter ergeben sich H2-Preise zwischen 6,03 €/kg und 8,79 €/kg*.



*Die dargestellten Preise sind WGK nach der Elektrolyse. Kosten für Kompression, Transport und Tankstelle sind in diesen Kosten nicht enthalten.

Annahmen; Strombezugskosten 7,7 ct/kWh bzw. 9,35 ct/kWh; Stromsteuer 2,05 ct/kWh; ne-gek..Abg. 1,48 ct/kWh ,4000 VLS des Elektrolyseurs, 45 % Förderung der CAPEX; 5 MW Elektrolyse; Abschreibungszeitraum 10 Jahre.

Für die Kaufoptionen werden zwei Varianten betrachtet, regionale Erzeugung oder internationaler Import.

Annahmen für die Kaufoptionen



A

Erzeugung in der KielRegion:

H2 wird in der KielRegion erzeugt und von dort aus zu den Verbrauchern geliefert. H2 Kosten entsprechen den untersuchten Erzeugungskosten.

B

H2 Import:

H2 wird von außerhalb der KielRegion importiert. Der H2 landet an einer zentralen Stelle in der KielRegion und wird von dort aus zum Verbraucher transportiert. Die H2-Kosten entsprechen den internationalen Importpreisen.

↔

H2 Transport:

Zur Berechnung der Transportkosten innerhalb der KielRegion wird eine mittlere Transportdistanz von 25 km angenommen.

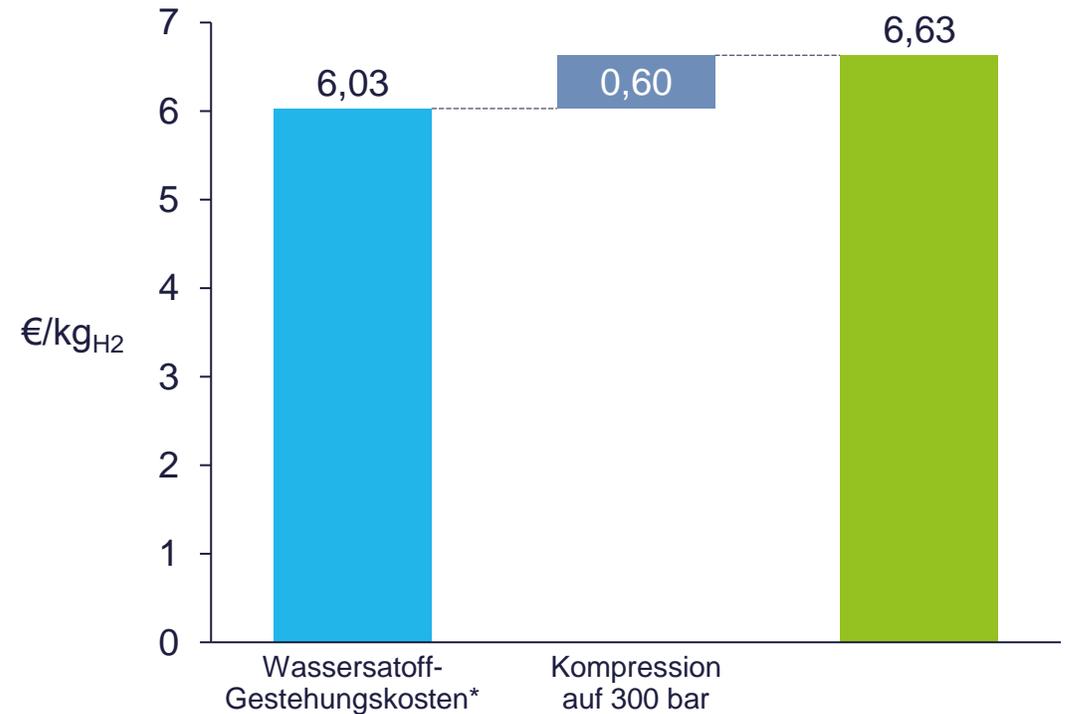
Für den Transport muss der Wasserstoff zunächst in den Trailer komprimiert werden.

A H2 Erzeugung in der KielRegion:

Erzeugungskosten:



Bei einem externen Wasserstoffbezug wird der Wasserstoff für den Transport komprimiert. Dies führt zu Aufwänden von ca. 60 ct/kg_{H2}. Diese Aufwände sind an der HRS nicht mehr zu erbringen.



* Annahmen: Für den Vergleich wurde das optimale Szenario mit konstanter Stromquelle und Grenzkostenoptimiert gewählt.

Die Transportkosten setzen sich aus verschiedenen Komponenten zusammen.

A H2 Erzeugung in der KielRegion:

Komponenten der Transportkosten:



Trailer



Zugmaschine



Personal

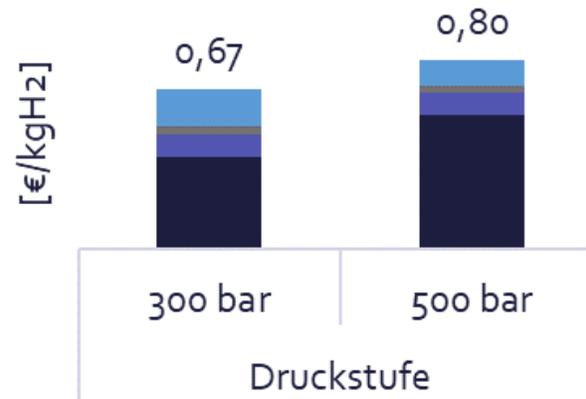


Transport zur HRS



Entstehende H2-Transportkosten:

- OPEX (Personalkosten)
- OPEX (Kraftstoff- + Mautkosten)
- OPEX (Fahrzeug + Trailer)
- CAPEX (Fahrzeug + Trailer)



Für eine Versorgung der KVG mit 1,5 tH₂/d wären 3 Umläufe mit einem 300 bar Container notwendig. Dies ist mit den angenommenen Arbeitszeiten für eine Person nicht abbildbar. Daher würde sich für die KVG die Anlieferung in 500 bar anbieten.

Die Versorgung der VKP wäre durch einen 300 bar Container gewährleistet.

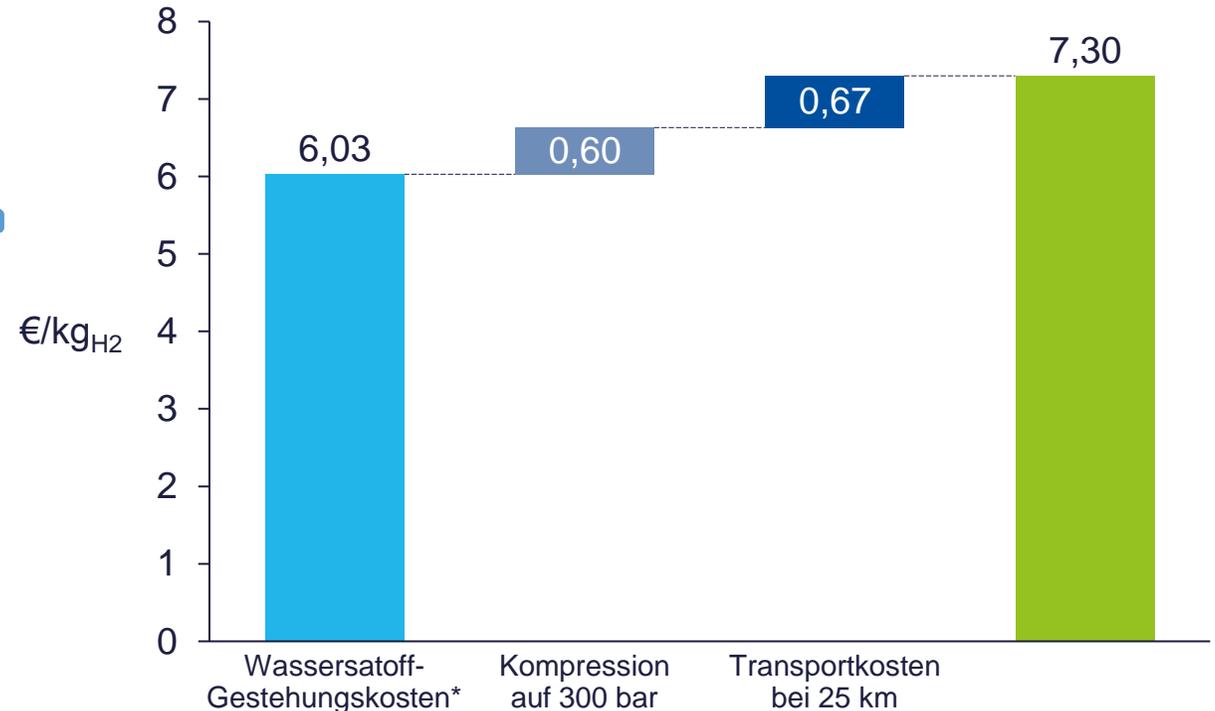
Die Gesamtkosten ergeben sich aus Erzeugung, Kompression und Transport des Wasserstoffs.

A H₂ Erzeugung in der KielRegion:

Kosten für Kompression und Transport

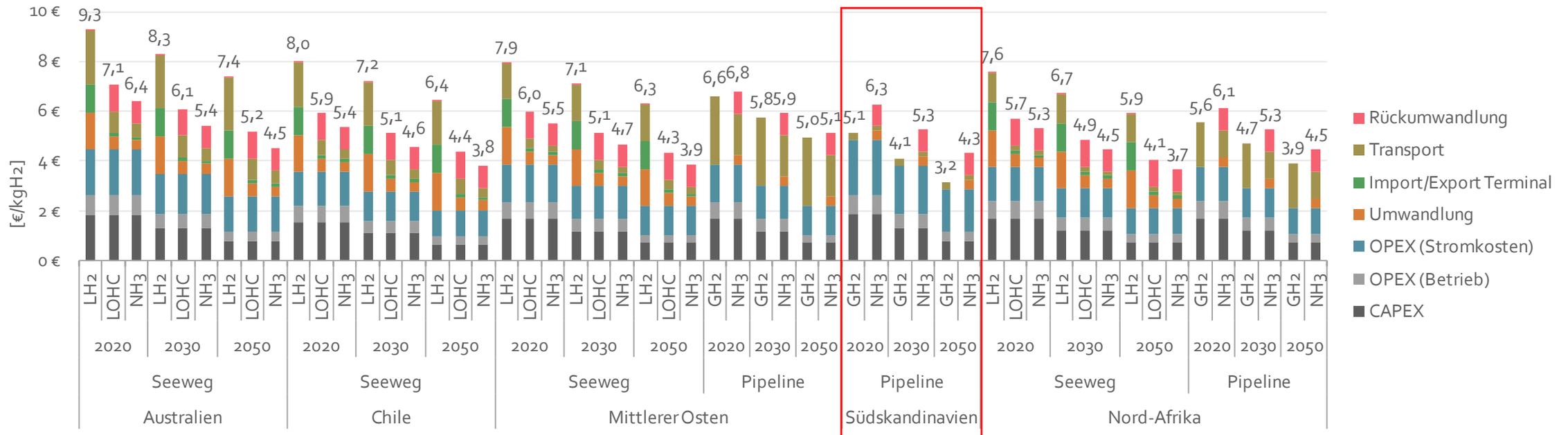


Der Trailer dient zugleich als mobiler Speicher der HRS. Somit sinken die CAPEX für Speicher an der HRS.



2030 (2050) sind Importkosten für GRÜNEN Wasserstoff von 5 (4) €/kg_{H2} realistisch.

B H2 Import:



Quelle: Eigene Analyse BBHC nach „The Future of Hydrogen“, IEA

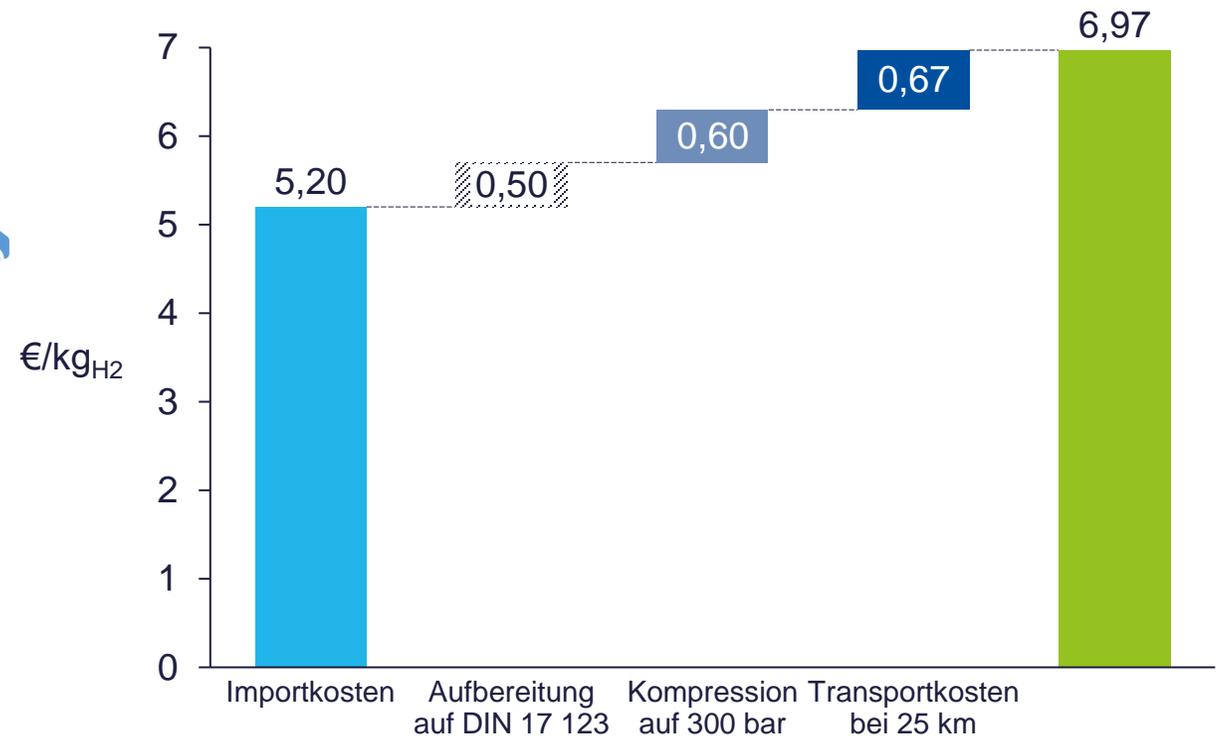
Neben der Kompression kann beim Wasserstoffimport eine weitere Aufbereitung des Wasserstoffs nötig werden.

A H2 Erzeugung in der KielRegion:

Kosten für Kompression und Transport



Für die Nutzung in Brennstoffzellenfahrzeugen ist eine Reinheit des Wasserstoffs entsprechend der DIN 17 124 notwendig. Da durch einen Pipelinetransport der Wasserstoff verunreinigt werden kann, könnte eine zusätzliche Reinigung des Wasserstoffs notwendig werden¹.

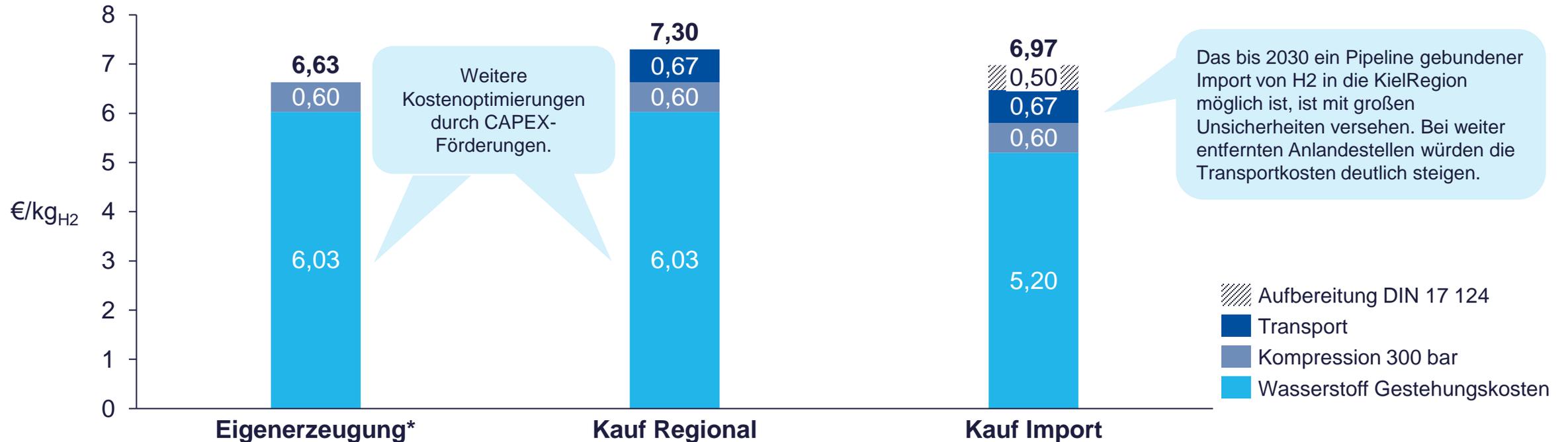


Die Mehrkosten für eine Reinigung des Wasserstoffs sind Schätzwerte und können aktuell nicht durch Erfahrungswerte belegt werden.

Importierter Wasserstoff kann am günstigsten sein, ist aber mit vielen Fragezeichen behaftet.

Vergleich aller Varianten:

► Kostenabschätzung für das Jahr 2030



* Für eine Vergleichbarkeit, wurden bei der Eigenherzeugung nochmal die Kosten für die Kompression beaufschlagt.

Agenda

- Einführung
- Allgemein Grundlagen
- **Konkrete Anwendungsbeispiel**
 - ▶ Methodik der TCO Betrachtung
 - ▶ Herleitung der spezifischen Kosten
 - ▶ TCO Betrachtung und Vergleich der Technologien
 - ▶ Schlussfolgerungen

Um die Kosten einer Flottenumstellung abzuschätzen werden neben den Anschaffungskosten auch die Betriebskosten betrachtet um eine langfristige Wirtschaftlichkeit zu bestimmen

Total Cost of Ownership einer Flottenumstellung

- Bei einer Kostenbetrachtung müssen neben den Anschaffungskosten für die Busse auch Investitionskosten für die Tankinfrastruktur und einen Werkstattumbau betrachtet werden. Da Investitionskosten derzeit attraktiv gefördert werden sind es vor allem die Betriebskosten, die eine langfristige Wirtschaftlichkeit bestimmen. Der Preis für den Wasserstoff kann hier daher ausschlaggebend sein.
- Im Folgenden werden die Total Cost of Ownership (TCO) der Umstellung einer ganzen Busflotte auf Brennstoffzellenbusse exemplarisch für eine kleine Flotte (VKP) und eine große Flotte (KVG) dargestellt. Hierbei werden die Kosten denen einer Umstellung auf rein elektrische Batteriebusse mit Depotladung und denen der Bestandsdieselflotten gegenüber gestellt.
- Da Batteriebusse momentan nur geringere Umlauflängen erreichen, werden hier zusätzliche Fahrzeuge und zusätzliche Lade-Infrastruktur benötigt. Für die Wasserstoffversorgung wird die Errichtung und der Betrieb einer Tankstelle auf dem Betriebshof angenommen. Die Größe der Tankstelle wird dem jeweiligen Verbrauch angepasst
- Busse im ÖPNV müssen jeden Tag betriebsbereit sein. Daher werden bei dieser Betrachtung hohe Ansprüche an die Ausfallsicherheit der Infrastruktur gestellt. Die Technologien sind mit entsprechenden Sicherheitsfaktoren betrachtet, die im Einzelfall zu prüfen wären.

Agenda

- Einführung
- Allgemein Grundlagen
- **Konkrete Anwendungsbeispiel**
 - **Methodik der TCO Betrachtung**
 - Herleitung der spezifischen Kosten
 - TCO Betrachtung und Vergleich der Technologien
 - Schlussfolgerungen

Die Höhe und Verteilung der jährlichen Kosten für eine Fahrzeugflotte variieren mit Antriebstechnologie. Hierbei werden sowohl Anschaffungs- als auch Betriebskosten betrachtet.

Darstellung der Kostenbestandteile der TCO-Betrachtung



Die H2-Preise werden für die TCO-Betrachtung spezifisch berechnet.

Herleitung der Kraftstoffkosten

BZ-Bus

Strom + Elektrolyse + Speicher - THG-Quote = H2-Preis → Bus

- Die H2-Preise für die TCO Betrachtung werden unter der Annahme der Eigenerzeugung am Standort der VKP bzw. KVG berechnet.
- Die H2-Preise setzen sich aus den Komponenten Strompreis, Elektrolysekosten und Speicherkosten zusammen. Die zusätzlichen Erlöse aus THG-Quoten werden den Kosten abgezogen.
- Die spezifischen H2-Kosten für VKP und KVG werden im folgenden Exkurs einmal exemplarisch für einen Betrachtungszeitraum von 10 Jahren berechnet.

E-Bus

Strom = Strompreis → Bus

- Der Ladestrom setzt sich nur aus den Strombezugskosten zusammen.
- Die THG-Erlöse für BEV werden als jährliche Pauschalen in den Betriebskosten des Busses mit berücksichtigt, da diese unabhängig von der tatsächlichen Fahrleistung des Busses sind.
- In den Strompreisbetrachtungen werden die prognostizierten Preisentwicklungen mit berücksichtigt.

Durch Förderprogramme können Errichtungskosten stark gesenkt werden. Die Betriebskosten bestimmen langfristig die Wirtschaftlichkeit

Wirtschaftliche Betrachtung der Flottenumstellung

Errichtungskosten

- Für einen Wasserstoffbedarf von 500 kg/Tag (ca. 24 Dieselbusse) entstehen Infrastrukturkosten in Höhe von ca. 3 - 4 Mio. €
- Für einen Wasserstoffbedarf von 1.500 kg/Tag (ca. 75 Dieselbusse) entstehen Infrastrukturkosten in Höhe von ca. 7- 9 Mio. €
- Die Kosten für die Infrastruktur schwanken in Abhängigkeit des Druckniveaus der Anlieferung, der Speichermengen, des Herstellers, der Redundanzen etc.
- Zusätzliche Kosten für Baumaßnahmen, Genehmigungen und Planung kommen hinzu
- Die Baukosten sind abhängig von der zur Verfügung stehenden Fläche und notwendigen Erschließungsmaßnahmen (z.B. Straßenzuführung, Parkflächen, etc.)

Betriebskosten

- Wartungs- und Instandhaltungskosten – ca. 2 – 3 % der Investitionskosten
- Stromkosten für die Betankung (Kompressor- und Kühlleistung) – ca. 2 – 4 kWh/kg_{H2}

Agenda

- Einführung
- Allgemein Grundlagen
- **Konkrete Anwendungsbeispiel**
 - ▶ Methodik der TCO Betrachtung
 - ▶ **Herleitung der spezifischen Kosten**
 - ▶ TCO Betrachtung und Vergleich der Technologien
 - ▶ Schlussfolgerungen

Für die KVG wird ein Erzeugungskonzept zur Versorgung von 76 Bussen betrachtet.

Versorgungskonzept der KVG



- Es sind 76 Busse auf H₂ umzustellen.
- Dies resultiert in einem täglichen H₂ Bedarf von 1796 kg H₂/d.
- Im Folgenden werden die H₂ Gestehungskosten berechnet, die eine kontinuierliche Versorgung der Flotte sicherstellen kann.

Je nach Betriebskonzept wird eine Elektrolysekapazität von 4 oder 8 MW benötigt.

Auslegung des Elektrolyseurs* für die KVG



Konstante Stromquelle



Volatile Stromquelle
2:1 Überbauung

	Konstante Stromquelle	Volatile Stromquelle 2:1 Überbauung
EL-Kapazität	4 MW	8 MW
Investitionskosten	3,4 Mio. €	6,3 Mio. €
Strombezugspreis	Grenzkostenoptimiert 77 € / MWh	PPA – Jahrespreis 93,50 € / MWh
Anschlussstyp	Direktleitung	Netzanschluss

- Zur Berechnung der WGK** werden zwei verschiedenen Erzeugungsszenarien betrachtet (Best-Case & Most Likely)
- Diese unterscheiden sich in der Charakteristik der Stromquelle als auch im Netzanschluss.
- Die notwendige Elektrolysekapazität variiert je nach Charakteristik der Stromquelle und entsprechen auch in den spezifischen Kosten je kW installierter Leistung.

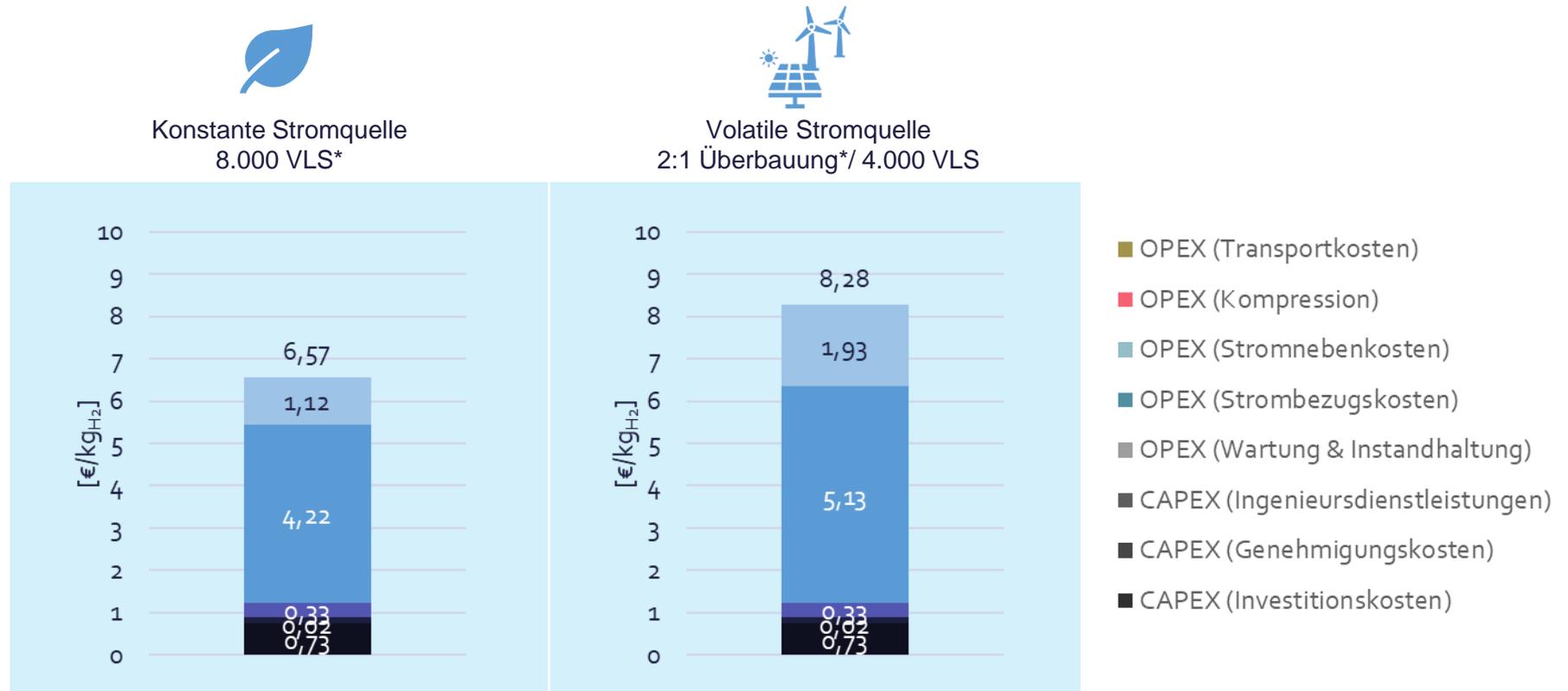
Annahme: Konst. Strom: Stromsteuer: ja; Netz.gk.Ab.: nein / ca. 4000 VLS // Volat. Strom: Stromsteuer: ja; Netz.gk.Ab.: ja / ca. 4000 VLS

* Weiterführende Informationen zur H2 Erzeugung finden Sie in der Präsentation [XXX](#)

** WGK = Wasserstoffgestehungskosten

Die Wasserstoffgestehungskosten liegen je nach Konzept zwischen 6,57 €/kg_{H2} und 8,28 €/kg_{H2}.

Wasserstoffgestehungskosten für die KVG



*Annahme: Konst. Strom: Stromsteuer: ja; Netz.gk.Ab.: nein / ca. 4000 VLS // Volat. Strom: Stromsteuer: ja; Netz.gk.Ab.: ja / ca. 4000 VLS

Für die VKP wird ein Erzeugungskonzept zur Versorgung von 23 Bussen betrachtet.

Versorgungskonzept der VKP



- Es sind 23 Busse auf H₂ umzustellen.
- Dies resultiert in einem täglichen H₂ Bedarf von 500 kg H₂/d.
- Im Folgenden werden die H₂ Gestehungskosten berechnet, die eine kontinuierliche Versorgung der Flotte sicherstellen kann.

Je nach Betriebskonzept wird eine Elektrolysekapazität von 2 oder 5 MW benötigt.

Auslegung des Elektrolyseurs für die VKP*



Konstante Stromquelle



Volatile Stromquelle
2:1 Überbauung

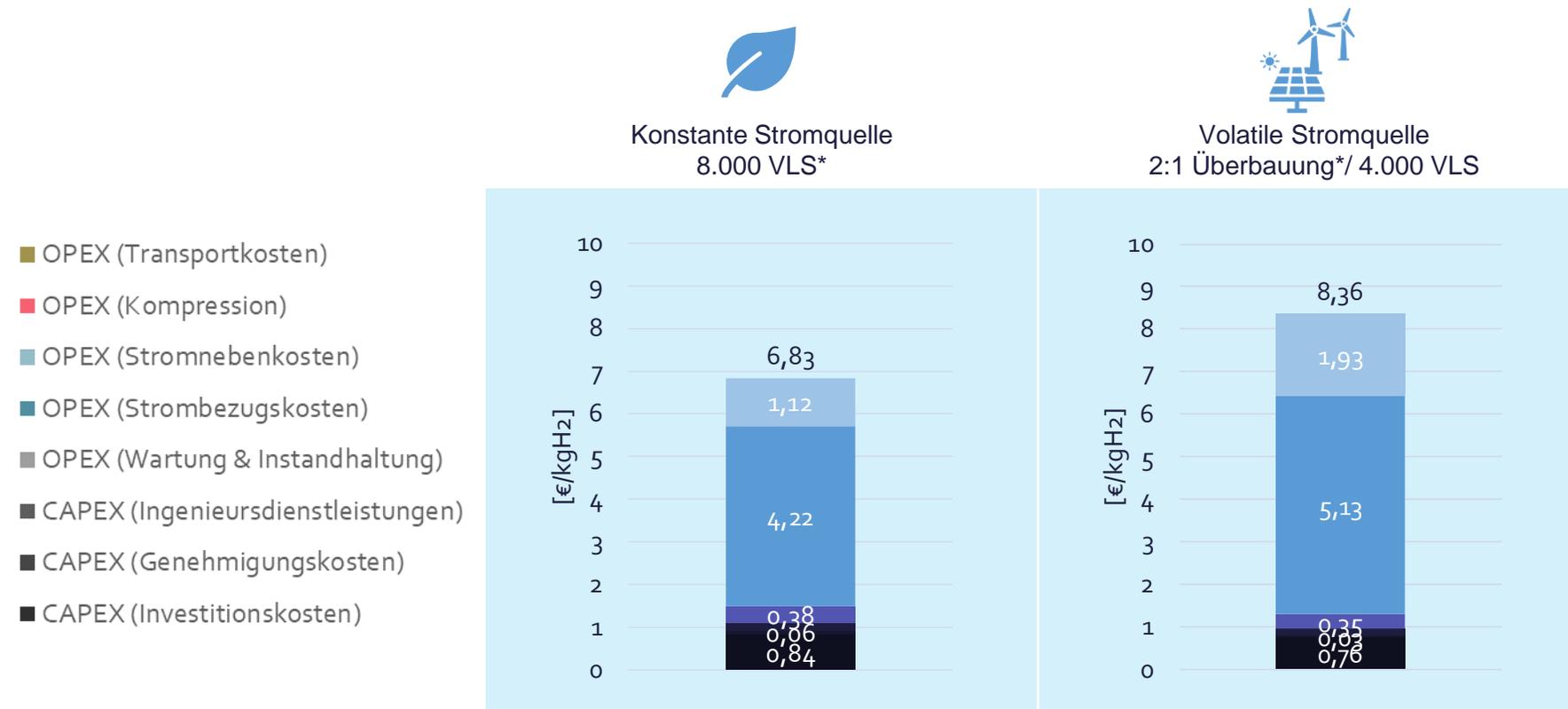
	Konstante Stromquelle	Volatile Stromquelle 2:1 Überbauung
EL-Kapazität	2 MW	5 MW
Investitionskosten	1,8 Mio. €	4,2 Mio. €
Strombezugspreis	Grenzkostenoptimiert 77 € / MWh	PPA – Jahrespreis 93,50 € / MWh
Anschlusstyp	Direktleitung	Netzanschluss

Annahme: Konst. Strom: Stromsteuer: ja; Netz.gk.Ab.: nein / ca. 4000 VLS // Volat. Strom: Stromsteuer: ja; Netz.gk.Ab.: ja / ca. 4000 VLS

*Weiterführende Informationen zur H2 Erzeugung finden Sie in der Präsentation XXX

Die Wasserstoffgestehungskosten liegen je nach Konzept zwischen 6,83 €/kg_{H2} und 8,36 €/kg_{H2}.

Wasserstoffgestehungskosten



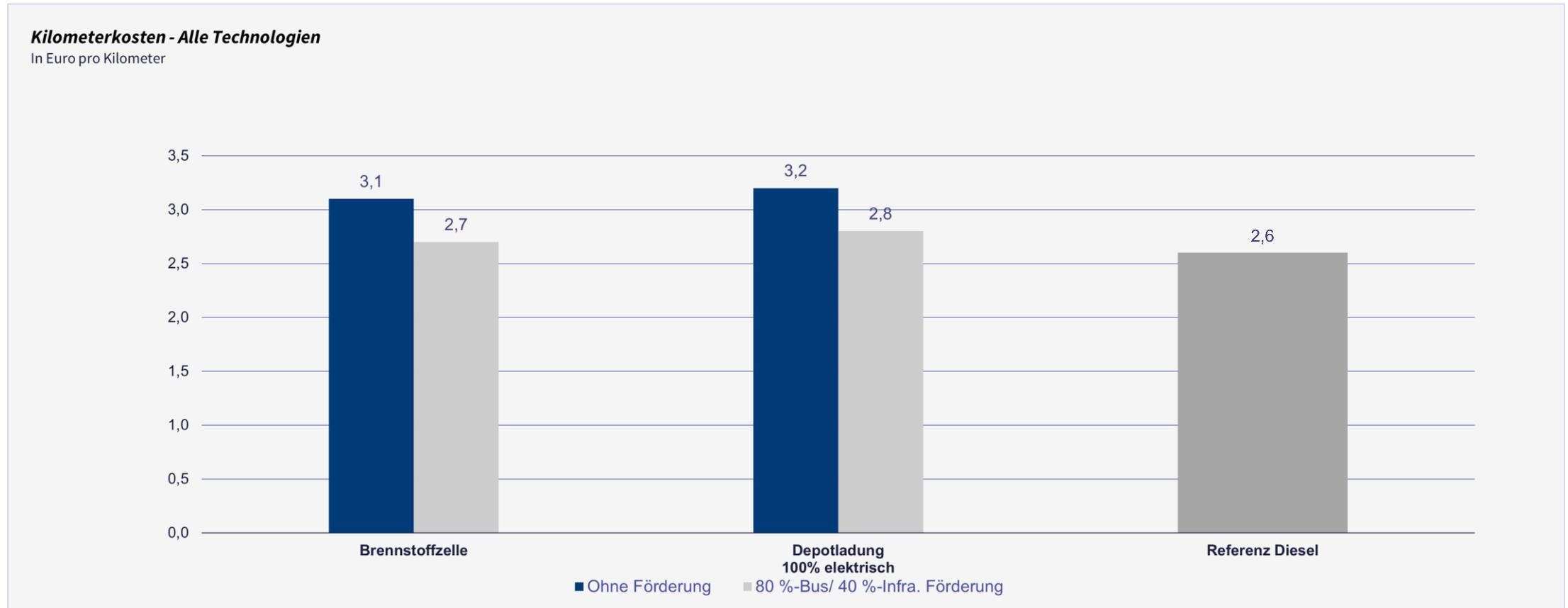
*Annahme: Konst. Strom: Stromsteuer: ja; Netz.gk.Ab.: nein / ca. 4000 VLS // Volat. Strom: Stromsteuer: ja; Netz.gk.Ab.: ja / ca. 4000 VLS

Agenda

- Einführung
- Allgemein Grundlagen
- **Konkrete Anwendungsbeispiel**
 - ▶ Methodik der TCO Betrachtung
 - ▶ Herleitung der spezifischen Kosten
 - ▶ **TCO Betrachtung und Vergleich der Technologien**
 - ▶ Schlussfolgerungen

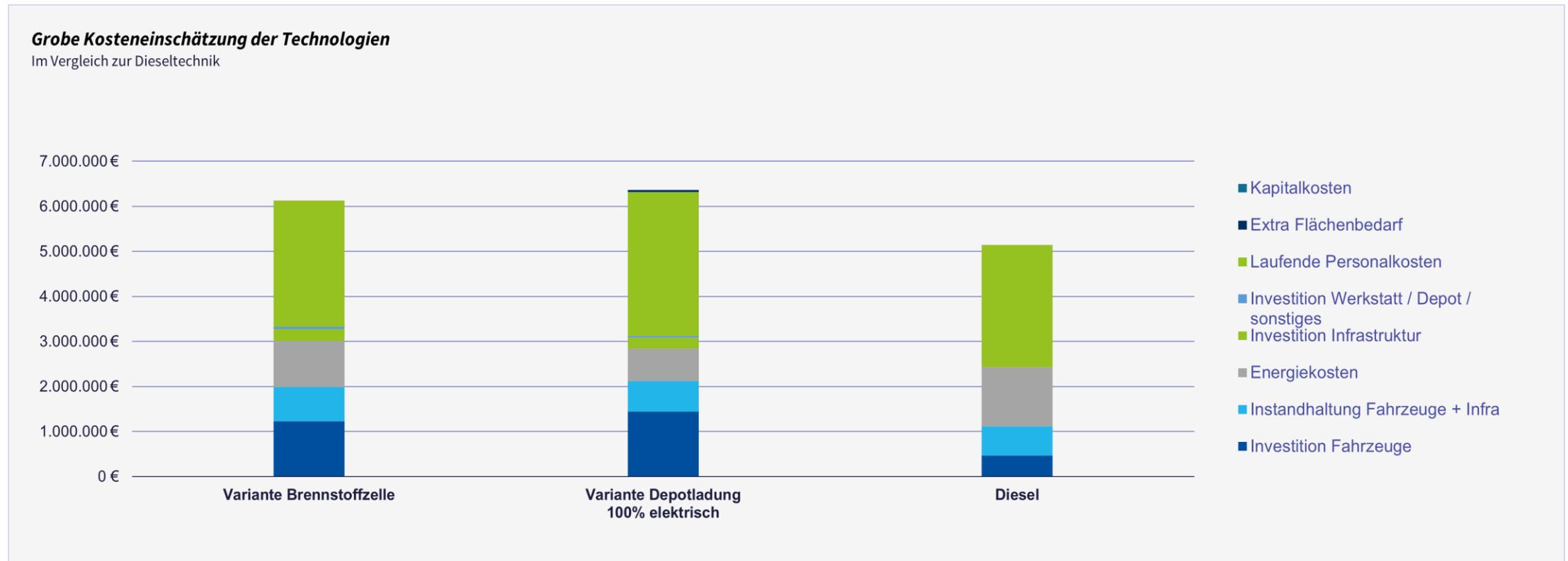
Mit einer Förderung für die Fahrzeuge und Infrastruktur kann Kostenparität zum Diesel erreicht werden

Vollkostenrechnung für die VKP – ca. 24 Dieselbusse – mit und ohne Förderung



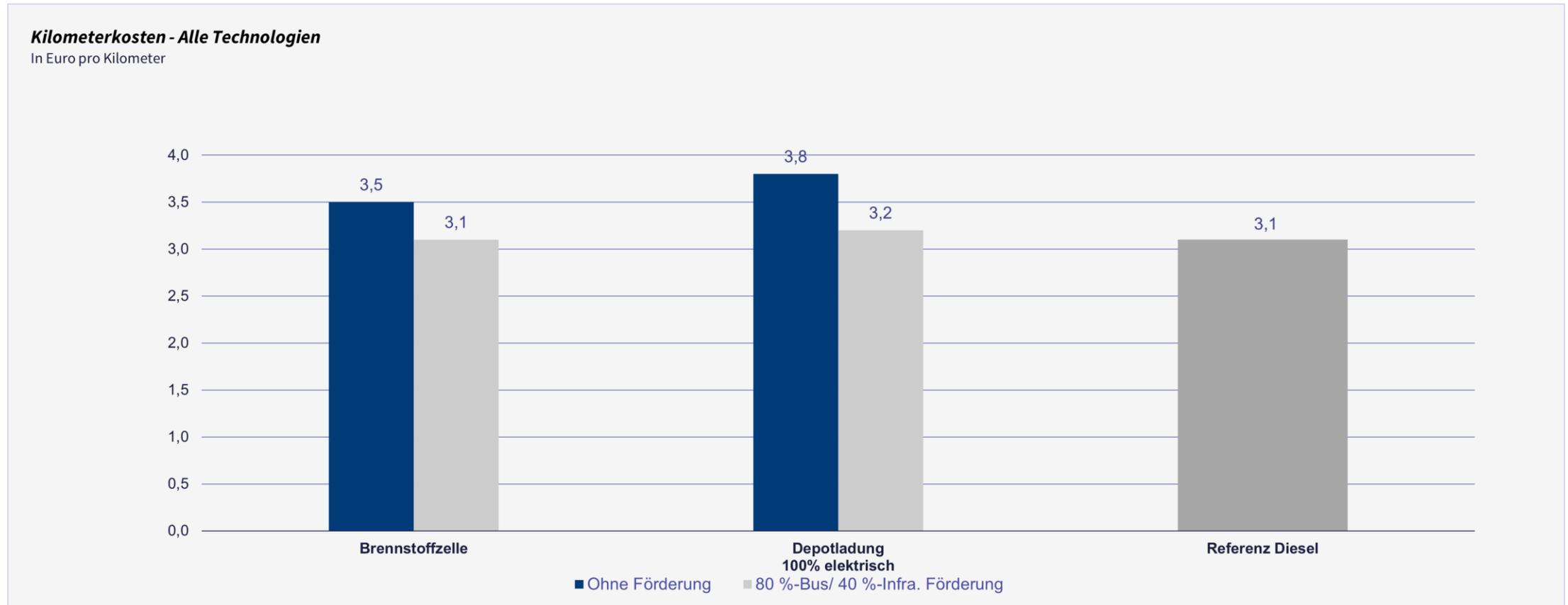
Ohne Förderung liegen Fahrzeug- und Infrastrukturkosten deutlich über denen des Diesels, die Energiekosten sind geringer.

Jährliche Kostenverteilung für die VKP – ca. 24 Dieselbusse – ohne Förderung



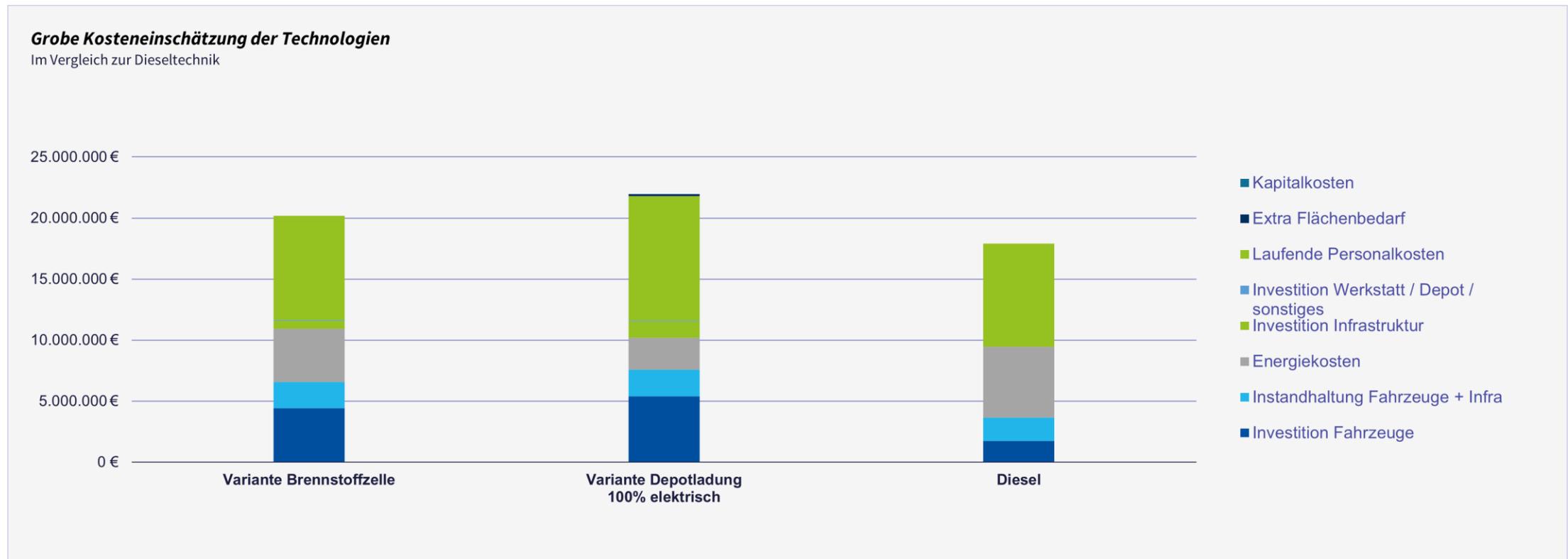
Mit einer Förderung für die Fahrzeuge und Infrastruktur kann Kostenparität zum Diesel erreicht werden

Vollkostenrechnung für die KVG – ca. 75 Dieselbusse – mit und ohne Förderung



Ohne Förderung liegen Fahrzeug- und Infrastrukturkosten deutlich über denen des Diesels, die Energiekosten sind geringer.

Jährliche Kostenverteilung für die KVG – ca. 75 Dieselbusse – ohne Förderung



Mit Förderungen für die Investitionskosten und kompetitiven Wasserstoffkosten stellen Brennstoffzellenbusse eine wirtschaftlich attraktive Alternative zum Diesibus dar.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer Flottenumstellung

- Die Fahrzeug- und Infrastrukturkosten von alternativen Bussen liegen über denen der Dieselsechnologie
- Aufgrund der besseren Energieeffizienz alternativer Antriebe liegen deren Kraftstoffkosten niedriger
- Die geringere Reichweite von Batteriebusse erfordert zusätzliche Fahrzeuge, zusätzliche Ladeinfrastruktur und ggf. zusätzliches Fahrpersonal
- Die Total Cost of Ownership einer Brennstoffzellenbusflotte liegen über denen einer konventionellen Dieselflotte
- Mit einer Förderung für die Fahrzeug- und Infrastrukturmehrkosten können Kosten entscheidend gesenkt werden
- Die Entwicklung der Wasserstoffkosten entscheiden langfristig die Wirtschaftlichkeit mit

The background features a dark blue field with several thin, bright yellow lines. These lines form a series of interconnected, angular shapes that resemble a stylized, abstract architectural or geometric pattern. The lines are primarily vertical and diagonal, creating a sense of depth and structure.

Vielen Dank!